



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN DEL PATRIMONIO CONSTRUIDO: DESARROLLO Y APLICACIÓN

Trabajo realizado por:

Daniel Gonzalo Pérez Herreros

Dirigido:

Ignacio Lombillo Vozmediano

Luis Villegas Cabredo

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, Septiembre de 2014

TRABAJO FINAL DE GRADO





RESÚMEN

Las estructuras presumen de su belleza a través del diseño y sufren de sus problemas como consecuencia de sus daños. Como evidencia de lo primero, las estructuras históricas constituyen una parte importante del patrimonio arquitectónico y cultural, reconocido como un frágil e insustituible recurso que debe ser conservado y transmitido a las generaciones futuras, en su máximo esplendor de materiales y formas. Y es que al mismo tiempo son la prueba evidente de la vida y la historia de las sociedades modernas, poniendo de manifiesto la existencia de una identidad cultural tangible que supone un importante recurso para el desarrollo económico y social.

Pero del mismo modo, acontecimientos como el colapso de algunas estructuras o el deterioro y la pérdida de muchas otras debido a la falta de conservación, ponen de manifiesto la gran importancia y necesidad de monitorizar ciertas estructuras para poder evaluar su seguridad estructural en tiempo real, y de ese modo evitar que en ellas acontezcan este tipo de sucesos. En este contexto adquiere aún más sentido la aplicación de una tecnología específica de monitorización que determine el estado de conservación, prevea situaciones de riesgo y se adelante al deterioro del patrimonio.

No obstante, el éxito de esta tarea depende fundamentalmente de dos aspectos. Por un lado, los sistemas y sensores empleados deben ser precisos y fiables y, a la vez, deben posibilitar una instrumentación segura, fácil y económica. Y por otro lado, es necesario contar con pautas generales de monitorización de distintas tipologías estructurales que proporcionen una guía sobre cómo debe instrumentarse una estructura.

En este contexto general, este Trabajo final de Grado plantea un amplio abanico de aspectos asociados con la monitorización del patrimonio construido. Comienza presentando una revisión del estado del arte de acuerdo con el orden lógico seguido en cualquier sistema de monitorización, desde los sistemas de sensores encargados de llevar a cabo la recepción de las señales, pasando por los sistemas de transmisión existentes, hasta evaluar la recepción y el tratamiento de dichas señales. Una vez evaluada la situación de la temática desarrollada, expone una completa y variada muestra de ejemplos de aplicación en estructuras singulares, en los que visualizar de manera práctica todo lo abordado con anterioridad de una forma mucho más teórica. Como continuación se plantea una propuesta de monitorización, dejando así constancia de la incipiente necesidad de monitorizar



estructuras que por desconocimiento u omisión de su incalculable valor se encuentran a merced del transcurso del tiempo y su inherente deterioro. En última instancia se aventuran algunas pautas de desarrollo futuro al tiempo que se extraen las conclusiones derivadas de todo el proceso previo.

De modo complementario, se incorporan anexos en los que poder visualizar tablas, gráficos o encuestas que sin duda enriquecen y justifican algunas partes de la información expuesta con anterioridad.

PALABRAS CLAVE: Patrimonio cultural, monitorización, sensores, fibra óptica, sistemas de transmisión, tecnología wireless, acelerómetros.



ÍNDICE

RESÚMEN.....	3
ÍNDICE	5
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1. Introducción a la monitorización de estructuras	10
1.2. Necesidades de los sistemas de monitorización actuales.....	14
1.2.1. CARENCIAS DE LOS SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN ACTUALES	14
1.2.2. ASPECTOS A REUNIR POR UN NUEVO SISTEMA DE MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL	17
1.3. Objetivos y estructura del Trabajo.....	18
2. ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1. Impotancia de la monitorización.....	21
2.1.1. MONITORIZACIÓN DE LA SALUD ESTRUCTURAL: IDENTIFICACIÓN DINÁMICA	21
2.2. Sensórica: La toma de señales, comienzo de todo el proceso	29
2.2.1. SISTEMAS DE MEDIDA.....	29
2.2.2. APROXIMACIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA PARA LA MONITORIZACIÓN: SENSORES Y TRANSDUCTORES	30
2.2.3. TECNOLOGÍAS DE LOS SENSORES.....	63
2.3. Sistemas de monitorización de acuerdo con la variable a monitorizar	79
2.3.1. VARIABLES DE ESPECIAL INTERÉS PARA LLEVAR A CABO SU MONITORIZACIÓN	79
2.3.2. VARIANTES DE LA MONITORIZACIÓN: DOS CARAS DE LA MISMA MONEDA	84
2.3.3. INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE	85
2.4. Sistemas de transmisión de la información captada	107
2.4.1. LOS SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN COMO UN CONJUNTO INTEGRADO	107
2.4.2. MONITORIZACIÓN CONVENCIONAL CON CABLE.....	109
2.4.3. TECNOLOGÍA WIRELESS	111
2.4.4. LA FIBRA ÓPTICA COMO ELEMENTO DE TRANSMISIÓN	113
2.4.5. ELECCIÓN FIBRA ÓPTICA vs CABLE	115
2.4.6. MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL CON TECNOLOGÍA GNSS	117



2.4.7. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GPS: SISTEMA DE MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO CENTRAL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE NÁPOLES	123
2.5. Tratamiento de datos e interpretación de los resultados obtenidos.....	128
2.5.1. APROXIMACIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL DE DATOS: CONTROL REMOTO	128
2.5.2. EJEMPLO DE CONTROL DE DATOS EN LA VIGILANCIA DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE LA BASÍLICA DE SAN GAUDENCIO: “MÉTODO DEL UMBRAL”	129
2.5.3. MONITORIZACIÓN DE VARIABLES DINÁMICAS.....	130
3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN: LA VERSATILIDAD HECHA VIRTUD.....	164
3.1. Metodología empleada y puesta en marcha de la monitorización de la iglesia del Seminario Mayor de Comillas.....	165
3.1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	165
3.1.2. REGISTRO DE LOS DAÑOS EXISTENTES EN LA IGLESIA	168
3.1.3. INSTALACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL.....	170
3.1.4. EVOLUCIÓN DE LOS DATOS REGISTRADOS.....	175
3.1.5. INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA.....	183
3.1.6. CONCLUSIONES.....	191
3.2. La torre de la Silla de la Reina en la Catedral de León. Análisis numérico en combinación con monitorización estructural	192
3.2.1. INTRODUCCIÓN	192
3.2.2. RESTAURACIÓN Y MONITORIZACIÓN	197
3.2.3. FUNCIONAMIENTO DE LA INSTRUMENTACIÓN Y RESULTADOS PRELIMINARES	205
3.2.4. CONSIDERACIONES FINALES.....	211
3.3. Evaluación y monitorización de las cubiertas del Hipódromo de la Zarzuela de Madrid.....	213
3.3.1. INTRODUCCIÓN	213
3.3.2. ESTUDIO DEL GRADO DE DETERIORO.....	215
3.3.3. EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN.....	218
3.3.4. INTERVENCIÓN	224
3.3.5. MONITORIZACION DE LA ESTRUCTURA	226
3.3.6. CONCLUSIONES.....	233



3.4. Caracterización dinámica en relación con los campanarios de las estructuras religiosas: métodos, propósitos y desarrollos en el campanario de la Iglesia del Carmine.....	235
3.4.1. LA DINÁMICA DE LA TORRE DEL CAMPANARIO DE LA IGLESIA DEL CARMINE.....	235
3.4.2. TIPOLOGÍA DE PRUEBA ADOPTADA.....	235
3.4.3. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA.....	236
3.4.4. EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	236
3.4.5. MODO DE PROCESAMIENTO	238
3.4.6. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DURANTE UN DÍA	239
3.4.7. EFECTOS DE LAS CAMPANAS	241
3.4.8. EVOLUCIÓN TEMPORAL.....	242
3.4.9. ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA.....	243
3.5. Caracterización Dinámica de la torre del campanario perteneciente al monasterio de Santa Clara de los baluartes situados en la ciudad de Castello	244
3.5.1. PLANTEAMIENTO DE LA INTERVENCIÓN REALIZADA	244
3.5.2. PRUEBA CON LAS CAMPANAS	245
3.5.3. CONSIDERACIONES FINALES	247
3.6. Investigaciones y caracterizaciones dinámicas asociadas al edificio Intramoenia (Avellino): métodos, finalidad y desarrollos.....	248
3.6.1. DESCRIPCIÓN GENERAL Y CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA.....	248
3.6.2. DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	249
3.6.3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS PRUEBAS DINÁMICAS	250
3.6.4. IDENTIFICACIÓN DE FRECUENCIAS Y ANÁLISIS MODAL.....	252
3.6.5. TÉCNICAS PARA LA EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS MODALES Y LA IDENTIFICACIÓN DE LAS FRECUENCIAS NATURALES DE LA ESTRUCTURA.....	252
3.6.6. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	253
4. PROPUESTA DE MONITORIZACIÓN: LA COLEGIATA DE SANTA JULIANA Y LA NECESIDAD DE PRESERVAR UNA BELLEZA ANCLADA EN EL TIEMPO ...	256
4.1. Introducción	257
4.2. Patologías identificadas durante las visitas	257
4.3. Propuesta de monitorización.....	258
4.3.1. MONITORIZACIÓN DE LA INCLINACIÓN DE LA TORRE OESTE	258



4.3.2. MONITORIZACIÓN DE LAS FISURAS BAJO EL ÓRGANO	260
4.3.3. MONITORIZACIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD.....	263
5. PERSPECTIVAS FUTURAS.....	266
5.1. Últimas tendencias	267
5.2. Una mirada al pasado, garantía de un futuro alentador	268
5.2.1. EL PRECURSOR DE LA VIGILANCIA ESTRUCTURAL MODERNA: LA EXPERIENCIA DEL PADRE ALFANI	268
5.2.2. EL SISMÓGRAFO ZHANG HENG	273
5.2.3. TÉCNICAS DE VIGILANCIA MEDIANTE SENSORES MÁS AVANZADOS: REDES NEURONALES	274
6. CONCLUSIONES	280
7. ANEXOS	292
7.1. Encuesta realizada para conocer el grado de conocimiento de la población sobre la temática abordada: Tablas y gráficos con los resultados obtenidos	293
7.1.1. PREGUNTAS PLANTEADAS EN LA ENCUESTA.....	293
7.1.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA ENCUESTA: PRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS MISMOS.....	295
7.2. Encuesta para discernir la importancia de la ejecución de estudios previos a la fase de proyecto y obra, en relación con la intervención en construcciones existentes	302
7.3. Tablas y gráficos comparativos de sensores.....	303
7.3.1. GALGAS EXTENSOMÉTRICAS	303
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	304



1 . INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



1.1. Introducción a la monitorización de estructuras

La monitorización de estructuras es una rama de la ingeniería estructural dedicada al desarrollo de sistemas que proporcionen información sobre cualquier cambio significativo o daño que se produzca en una estructura, y cuyo establecimiento con carácter formal es relativamente reciente, pese a que el interés por conocer el comportamiento real de las estructuras es muy anterior.

En España, probablemente sea Eduardo Torroja el gran pionero de la instrumentación estructural. Su deseo por desarrollar nuevas formas con estructuras laminares como la cubierta del Mercado de Algeciras y la cubierta del Frontón Recoletos en Madrid (Figura 1.1), le llevó a crear modelos reducidos de las mismas, y en el segundo caso, incluso a instrumentar también la obra real.

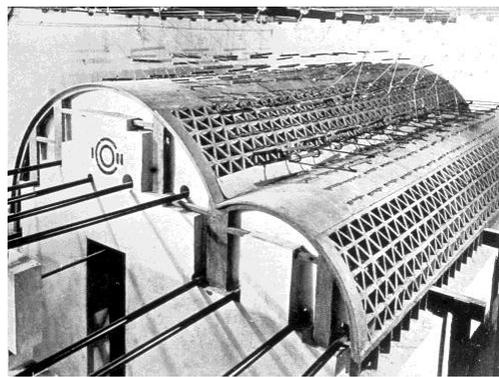


Figura 1.1. Frontón Recoletos

La monitorización estructural tiene una gran importancia y desarrollo hoy en día, siendo algunas de las causas de este auge las siguientes:

- Conforme aumenta el nivel de desarrollo de los países tienen menos infraestructuras nuevas que construir y más infraestructuras antiguas que mantener y conservar. Los SHM permiten disponer de datos que ayuden a optimizar la gestión de infraestructuras y garantizar su seguridad.
- Los avances científicos y tecnológicos hacen que hoy en día sea posible proyectar y construir estructuras cada vez más complejas. En estos casos, los datos proporcionados por los SHM permiten comprobar que el comportamiento real de las estructuras se corresponde con el previsto en



proyecto. De este modo, se garantiza tanto la seguridad de la estructura como los grados de confort requeridos por el propietario.

- Los accidentes de algunas estructuras han sensibilizado a la opinión pública sobre la importancia de invertir en el mantenimiento y gestión de las infraestructuras.



Figura 1.2 Colapso de un puente sobre el río Missisipi en Mineapolis, USA.

Un sistema de monitorización se compone de los siguientes elementos: Transductores, sistemas de procesado y acondicionado de la señal, líneas de transmisión, y sistemas de procesado y registro de datos.

Existe actualmente una amplia variedad de sistemas de monitorización que son aplicables a la instrumentación y evaluación de las estructuras. Los más conocidos y empleados son:

- Inspección visual.
- Métodos topográficos.
- Métodos basados en radar.
- Métodos basados en rayos X.
- Métodos acústicos.
- Métodos fotogramétricos.



- Métodos basados en termografía.
- Métodos basados en flujos magnéticos.
- Sensores elastomagnéticos.
- Métodos GPS.
- Galgas eléctricas.
- Fibra óptica.

En la Tabla 1.1 se muestran las principales aplicaciones que se pueden llevar a cabo con las distintas técnicas enumeradas:



<i>Sistemas de monitorización</i>	<i>Aplicación, parámetros a medir.</i>
Inspección visual	Problemas estructurales que impliquen grandes deformaciones o patologías en avanzado estado de degradación (Vurpillot et al. 1998).
Métodos topográficos	Deformaciones relativamente grandes, del orden de milímetros (Inaudi, 1997).
Métodos basados en radar	Fisuración, exploración de anclajes, localización de armaduras, detección de objetos en el suelo, instalaciones enterradas y cimentaciones (Otsuka et al. 2003).
Métodos basados en rayos X	Localización de diámetro y distribución de armaduras, inspección de cables de pretensado, fisuración y homogeneidad del hormigón (Joachim, 2003).
Métodos acústicos	Fisuración del hormigón (Yuyama et al. 2007, Baifeng y Weiliam 2008).
Métodos fotogramétricos	Desplazamientos, deformaciones y aberturas de fisuras (Whiteman et al. 2002, Lange et al. 2006, Torres et al. 2010).
Métodos basados en termografía	Fisuración, coqueas y otros defectos en el hormigón (Clark et al. 2003, Carosena 2006).
Métodos basados en flujos magnéticos	Estado de las armaduras en una estructura de hormigón armado y, en general, de aquellos materiales que puedan ser magnetizados por la acción de un campo magnético, como el caso del acero (Villalba, 2006).
Sensores elastomagnéticos.	Fuerza en elementos lineales metálicos (Molignoni, 2011).
Método GPS	Grandes desplazamientos en estructuras (Knecht y Manetti 2001, Inaudi 1997).
Galgas eléctricas	Deformaciones (www.hbm.com).
Fibra óptica	Temperaturas, deformaciones, aceleración, desplazamientos (Moyo et al. 2005).

Tabla 1.1. Aplicaciones de los sistemas de monitorización actuales más comunes.

Por ejemplo, la inspección visual sirve para detectar problemas que impliquen grandes deformaciones, a pesar de sus evidentes limitaciones. Los métodos basados en el empleo del radar o de rayos X ofrecen ventajas para la inspección de una zona local de una estructura, como el



estado de las armaduras, anclajes o la fisuración en un determinado punto. Los métodos acústicos, fotogramétricos y basados en termografía han ofrecido buenos resultados bajo condiciones muy controladas y por tanto, son muy aptos para su aplicación en trabajos y ensayos en laboratorio. Las galgas eléctricas son el método más empleado en la actualidad para la obtención de deformaciones. Sin embargo, su naturaleza eléctrica impide su aplicación en determinados escenarios.

1.2. Necesidades de los sistemas de monitorización actuales

Como se ha indicado en el apartado anterior, existen técnicas que permiten realizar el seguimiento y la evaluación de un parámetro estructural. Sin embargo, el estudio de las mismas ha permitido comprobar que:

- Algunas de estas técnicas como los métodos basados en el radar o los rayos X sirven para la inspección local de una zona de la estructura y se limitan a realizar mediciones instantáneas, no pudiendo funcionar como un sistema de monitorización continuo en el tiempo.
- Algunas de estas técnicas no son aplicables en determinados escenarios y por tanto no satisfacen algunas necesidades actuales.

1.2.1. CARENCIAS DE LOS SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN ACTUALES

Algunos de los sistemas de monitorización actuales no responden totalmente a las expectativas de sus usuarios. En ocasiones, los resultados obtenidos inspiran poca confianza debido fundamentalmente a afecciones de todo tipo sobre los sistemas de medición. Así, algunas de las principales carencias son:

- Complejidad en su uso, lentitud e ineficiencia, lo que obliga a los operadores del sistema a alcanzar cierta experiencia en el manejo del sistema y en la interpretación de sus medidas.
- Dificultad para llevar a cabo mediciones remotas y a grandes distancias.
- Necesidad de calibración y recalibración del sistema de medida cada vez que se realiza una toma de datos.



- Elevada sensibilidad frente a ciertos factores ambientales. Los de mayor importancia son la humedad y la temperatura, los cuales pueden llegar a alterar considerablemente las mediciones obtenidas. Por tanto, resulta de vital importancia el empleo de sensores cuya respuesta ante este tipo de acciones esté totalmente calibrada.
- Algunos sistemas de medida son muy sensibles a la radiación solar y a cambios en la iluminación sobre el objeto a medir. Este hecho limita su aplicación a ensayos donde todos estos factores se encuentran altamente controlados.
- En general, los sistemas de medida actuales presentan un mal comportamiento en ambientes vibratorios, presentando muy poca estabilidad en sus medidas.
- Elevada sensibilidad a las interferencias electromagnéticas producidas por tormentas y líneas eléctricas. Esta sensibilidad afecta de forma notable a aquellos sistemas basados en señales eléctricas, llegando a hacer totalmente inapropiado su uso.
- Algunos sistemas son muy sensibles a la corrosión, lo cual puede llegar a dejar fuera de servicio el sistema de medida.
- En ocasiones, se trata de sistemas de gran tamaño, lo que dificulta la instrumentación de puntos o zonas de difícil acceso.
- Presentan elevados costes de operación y de mantenimiento.
- Necesidad de estudiar y conocer la interacción de los elementos sensores con el comportamiento de la estructura. El hecho de que los sensores deban ir encapsulados en un material huésped y en ocasiones embebidos en el material que forma la estructura causa una perturbación en el campo de deformaciones que afecta a la exactitud de la medición.
- Necesidad de mejorar la transferencia de deformaciones entre la estructura, el material huésped que forma el sensor y el sensor. En el caso de la tecnología de la fibra óptica, ésta no puede ser instalada sin ser encapsulada previamente debido a su fragilidad.
- Necesidad de integrar las variaciones de deformación en materiales fisurables o heterogéneos a través de sensores de longitud o sensores distribuidos. En ocasiones, el empleo de sensores puntuales puede



proporcionar valores incorrectos en cuanto a la obtención de deformaciones.

En el caso de materiales heterogéneos como el hormigón, es necesario el empleo de sensores que sean capaces de integrar en la medida los defectos puntuales como las oclusiones de aire, coqueras o fisuración. En algunos escenarios, la monitorización de estructuras de hormigón a partir de sensores puntuales puede proporcionar resultados totalmente incorrectos y del lado de la inseguridad.

Un nuevo sistema de monitorización estructural debería resolver, al menos, algunos de estos inconvenientes y problemas para tener éxito frente a las tecnologías ya existentes. Ello posibilitaría aplicaciones de los sistemas de monitorización como las siguientes:

- Geoestructuras. Cada vez más, y debido a recientes accidentes ocurridos en obras subterráneas.
- Puentes de ferrocarril y túneles. Debido a la presencia de campos electromagnéticos resulta muy costoso llevar a cabo la monitorización de este tipo de estructuras, en cuyo caso es necesario emplear sistemas y métodos que sean inmunes a las radiaciones electromagnéticas.
- Presas. Las presas son estructuras que suelen estar instrumentadas con sistemas de distinta tipología. Algunos de estos sistemas podrían ser reemplazados por otros más eficientes permitiendo ciertas ventajas como una mayor precisión o la captura remota y a distancia de los datos.
- Campañas experimentales de laboratorio. El diseño de sistemas de monitorización sencillos de implementar y más económicos que los actuales permitiría incrementar su aplicación en los ensayos de elementos estructurales que se realizan en laboratorio con fines de investigación o para probar y homologar elementos estructurales.

Existe un gran número de estructuras que no se encuentran suficientemente instrumentadas debido a la falta de un sistema de instrumentación eficaz. Por un lado, este hecho pone de manifiesto la necesidad de desarrollar nuevas técnicas que aventajen a las ya existentes. Pero por otro lado, este hecho manifiesta indirectamente que la monitorización estructural no se encuentra todavía totalmente



integrada como parte del proceso proyecto-construcción en la ingeniería estructural.

1.2.2. ASPECTOS A REUNIR POR UN NUEVO SISTEMA DE MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL

Todo nuevo sistema de monitorización debe cumplir las condiciones siguientes:

- *Seguridad.*

Un nuevo sistema de monitorización deberá proporcionar información fiable que garantice una explotación segura de la estructura y una intervención inmediata en caso necesario. Existen dos factores determinantes para cubrir el aspecto de la seguridad: la estrategia de monitorización, y el funcionamiento del sistema de monitorización. Mientras que el diseño de la estrategia de monitorización depende del ingeniero responsable de la seguridad de la estructura, el funcionamiento del sistema depende de la tecnología en la que se base.

- *Rendimiento y aplicabilidad.*

Aprovechando la existencia de las nuevas tecnologías emergentes, un nuevo sistema de monitorización deberá ofrecer mayores rendimientos que los actuales (mayores precisiones y resoluciones, más durabilidad, menores dimensiones...) y deberá ser aplicable en escenarios donde los sistemas actuales no son operativos.

- *Economía.*

La economía hace referencia al ratio entre la inversión realizada para la implantación del sistema de monitorización en la estructura y los beneficios económicos obtenidos con su implantación.

Existen dos enfoques de instrumentación que tienen una repercusión directa sobre el aspecto económico: Inspecciones periódicas y monitorización permanente.

Las inspecciones periódicas se realizan por grupos de expertos que analizan algún parámetro de la estructura y toman decisiones sobre posibles reparaciones o refuerzos, en caso de ser necesarios. En este caso, una intervención sobre la estructura (reparación, refuerzo o rehabilitación) sólo puede realizarse tras una inspección. Tanto los costes



de la intervención como los costes de la inspección pueden llegar a ser muy elevados por dos motivos. Primero porque la intervención no se realiza a tiempo y el daño se ha propagado y segundo porque en la inspección se emplea algún sistema de monitorización que necesite ser dirigido por personal especializado.

En el caso de las monitorizaciones permanentes, la estructura se encuentra monitorizada y se puede conocer la evolución de los parámetros instrumentados (deformación, temperatura, desplazamientos...) en tiempo real. En este caso, es posible una intervención inmediata sobre la estructura, evitando los problemas derivados de la inspección periódica. Los sistemas de monitorización alcanzan su máximo rendimiento cuando se encuentran en funcionamiento durante toda la vida útil de la estructura y durante este periodo, el ingeniero es el responsable de proponer y llevar a cabo el calendario de medidas.

- *Estética.*

Existen estructuras que forman parte del patrimonio histórico y cultural de la sociedad. La mayoría de ellas no se encuentran instrumentadas, pero existen casos en los que es necesario un seguimiento de las mismas. En caso de que una estructura antigua sea instrumentada, un nuevo sistema de monitorización no deberá afectar a su apariencia estética y deberá ser lo más transparente posible para el usuario. Análogamente, este aspecto debe ser aplicado a estructuras en general que tengan un importante valor estético.

1.3. Objetivos y estructura del Trabajo

Los objetivos fundamentales de este Trabajo fin de Grado son:

- a) Proporcionar una visión global acerca de la monitorización estructural con todos los aspectos que engloba.
- b) Presentar multitud de ejemplos prácticos en los que poder visualizar todo cuanto se desarrolla a lo largo del trabajo.

Para ello, el contenido está organizado del modo siguiente:

- a) En primer lugar se presenta un estado del arte de la monitorización estructural.



- b) Tras ello se presentan varios ejemplos de aplicación, los cuales muestran los trabajos de monitorización sobre estructuras reales.
- c) Continúa con una propuesta de monitorización sobre un edificio existente.
- d) En los apartados siguientes se recogen futuras líneas de desarrollo de la monitorización y se extraen las principales conclusiones del trabajo realizado.
- e) Finalmente se muestran múltiples anexos que contienen información que complementa el trabajo realizado.



2. ESTADO DEL ARTE



2.1. Importancia de la monitorización

2.1.1. MONITORIZACIÓN DE LA SALUD ESTRUCTURAL: IDENTIFICACIÓN DINÁMICA

2.1.1.1. INTRODUCCIÓN

La intervención de conservación de un edificio histórico, cualquiera que sea su valor arquitectónico y artístico, es, en general, mucho más apropiado, ya que es más profundo el conocimiento de la fábrica, de su evolución a partir del estado actual de los materiales, técnicas de construcción y estructura. La experiencia adquirida en las últimas décadas en el campo de la conservación y restauración de edificios históricos revelan la necesidad, no sólo a partir de una percepción visual, sino de un conocimiento de las características constructivas de las técnicas de evaluación apropiada y estado actual del daño de la estructura, antes de adoptar cualquier técnica de intervención.

Este requisito también se aplica en el caso de las intervenciones preventivas (e.j. zona SÍSMICA) contra acontecimientos excepcionales, así como en aquellos casos en los que es necesario prever la intervención, como pueden ser centros de personas de avanzada edad o algunas partes de los mismos. La fase de diagnóstico no sólo es importante para la elección de las soluciones adecuadas, sino también para definir los costes y los tiempos de intervención.

En muchos casos, las intervenciones se refieren a edificios que durante mucho tiempo han estado en un estado de abandono, o bien su mantenimiento no ha sido efectivo. Debe disponerse de un borrador de las investigaciones realizadas por el diseñador que asumirá la responsabilidad de formular un diagnóstico y las propuestas de intervención. Este proyecto, sin embargo, también deberá dirigirse al aprovechamiento consciente de los resultados de las investigaciones. De hecho, en términos generales, la investigación debe primero ser capaz de dar respuesta a hipótesis ya formuladas por el mismo diseñador, proporcionar parámetros físicos y mecánicos para su uso en cálculo estructural y, si fuera necesario, controlar datos en la estructura con el tiempo. En la práctica se deben evitar costes innecesarios asociados a resultados que con posterioridad no serán utilizados y procesará los datos de la manera más apropiada, pues el diagnóstico puede ser útil en la elección de las técnicas más apropiadas de intervención. Los controles, además de ser antes de la intervención, deben utilizarse para comprobar



la efectividad de las técnicas de intervención y, así, llevarse a cabo durante y después de las diferentes operaciones.

Las investigaciones realizadas in situ deben ser no-destructivas en la medida que sea posible, pudiendo estar basadas en la transmisión de ondas elásticas o electromagnéticas u otras técnicas sofisticadas. Debe recordarse que las técnicas no destructivas a menudo requieren altos costes y requieren una calibración para cada aplicación particular. [Binda, Saisi]

La creciente demanda de vigilancia estratégica de edificios situados en zonas sísmicas ha llevado a cabo algunas investigaciones para profundizar sus estudios en el desarrollo de métodos simplificados y económicos para la identificación de vibraciones anormales y la evaluación de daños sufridos por los edificios debido a los terremotos. Los métodos clásicos utilizados para vigilar edificios incluyen la instalación de un gran número de sensores a lo largo del desarrollo de la estructura siendo monitorizado. Los costes y la complejidad inherente en el procesamiento de datos a menudo limitan el uso generalizado de estos sistemas. El desarrollo de un sistema simplificado, capaz de ofrecer en tiempo real o en tiempo real sobre el estado de salud de un gran número de edificios diseminados en el territorio puede ser una herramienta crucial en la evaluación de escenarios de daños tras terremotos y tsunamis para las organizaciones de ayuda. La práctica actual, basada únicamente en la inspección visual, parece ser cada vez más inadecuada.

En concreto, los edificios públicos como hospitales, escuelas, iglesias y municipios constituyen una riqueza de importancia estratégica para la vida de una comunidad. Su manejo requiere un seguimiento periódico de las condiciones de seguridad, tanto a corto como a largo plazo, que hoy pueden ser conducidas con eficacia y objetivamente por medio de sistemas de medición de vibraciones estructurales automáticas y permanentes. Ante la ocurrencia de un evento sísmico, tienen el mérito de capturar el comportamiento dinámico real de la estructura, lo que permite la calibración experimental de modelos numéricos, útil para una evaluación precisa del nivel de seguridad sísmica y las mejoras de diseño.



2.1.1.2. ENFOQUE DE LA MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL

En los últimos años ha crecido el enfoque hacia la seguridad estructural de grandes construcciones civiles. Estas estructuras pueden presentar también fenómenos de corrupción relevante que pueden ser causados, por sobrecargas, corrosión, vibraciones... Por lo tanto, es necesario estudiar un sistema de monitorización continuo de la salud de la estructura capaz de detectar la aparición de cualquier situación peligrosa.

Esta práctica se llama monitorización de la salud estructural (SHM). Prevé la instalación de un sistema de sensores, de modo que la transmisión de datos y el análisis de los mismos se convierten en parte integral de la estructura. Existen varias técnicas desarrolladas para este propósito que permiten medir ciertas propiedades físicas de las estructuras. El principio fundamental sobre el cual todos se basan es el hecho de que si hay un cambio en las propiedades de la estructura, la respuesta del sistema se mide por los cambios en el sistema sensor [Balageas, Fritze, Güemes]. Se encontró que un fracaso dentro de una estructura puede ser una alteración de su comportamiento dinámico, con un consecuente cambio en su frecuencia, constantes adimensionales de amortiguación y modales (Maeck, Peeters, De Roeck).

Un sistema de monitorización basado en este enfoque utiliza por lo tanto varios acelerómetros montados en el marco de tal manera que se garantice la medición de vibraciones en modo continuo. El propósito de monitorización estructural de estructuras civiles es no sólo la identificación del daño súbito o progresivo, sino también el seguimiento de la ejecución de las mismas condiciones de funcionamiento o en condiciones ambientales como terremotos [Mufti 2001]. Un sistema de vigilancia se compone de sensores para detectar los parámetros ambientales y respuesta estructural al estrés. El propósito del sistema similar no es sólo la evaluación de la resistencia a los terremotos de un edificio: dispositivo de control de la estructura las condiciones de operación, que representa un aspecto de gran interés, tanto para la protección contra las vibraciones y actualización sísmica o refuerzo de instalaciones críticas o estratégicas.

Por lo tanto, la monitorización estructural implica un gran número de aplicaciones en el campo de la ingeniería civil como el proyecto (mediante el modelo de actualización de las técnicas), evaluación de daños, mantenimiento y refuerzo de las estructuras existentes, control estructural durante los terremotos (utilizando sistemas semi activos)



[Lynch, 2002]. Una típica arquitectura de sistemas de supervisión se basa en sensores periféricos directamente conectados por cables a un sistema de adquisición de datos centralizado. El papel de dicho sistema es recopilar y procesar estos datos. Sin embargo, para aumentar el número de sensores, un gran número de medidas converge hacia el sistema de adquisición y pueden sobrecargarse, especialmente si deben procesar los datos para los propósitos de la identificación de daño: sus algoritmos son particularmente pesados desde el punto de vista computacional. Otra limitación de este tipo de arquitectura se encuentra en los altos costes de instalación y mantenimiento, debido principalmente a la utilización de cables [Lynch. 2002]. En la actualidad, la tendencia es reemplazar los sistemas cableados con sensores inalámbricos de bajo coste y distribuir conocimiento sobre toda la red de monitoreo. De esta manera, las redes locales de medida son conexas y rápidas.

Comentarios de estas correlaciones pueden hacer sistemas más eficientes y optimizar los flujos de datos y solicitudes de sistemas de transmisión. Además, los rápidos avances en el campo de la identificación de los daños que condujo al nacimiento de algoritmos pueden identificarse con buena fiabilidad existencia, ubicación y tipo de daño en la estructura basada sólo en las medidas de respuesta estructural [Lynch et al., 2002; Fujino et al., 2001]. Porque la prioridad de protección sísmica es salvar vidas, han de tomarse las siguientes medidas para garantizar dicho objetivo:

- prevención en los años anteriores a un terremoto, a través de un correcto diseño sísmico y refuerzo de edificios, o la instalación de sistemas de alerta sísmica (alerta de terremoto), o sistemas de reacción rápida de componentes y sistemas;

- alerta temprana, representado por acciones (evacuación de edificios, sistemas críticos a cerrar) que pueden ser logradas desde el momento de un evento sísmico se identifica, en un determinado lugar, de una red sísmica, que calcula en tiempo real los parámetros sísmicos y, si se excede el umbral, envía una señal de alarma a los destinatarios a fin de adoptar contramedidas apropiadas;

- gestión de emergencias, representada por todas las medidas que deben adoptarse en las primeras horas del evento o, más generalmente, cada vez que la condición estructural de edificios críticos debe ser evaluado para asegurar el rescate o funciones de emergencia dentro del edificio. En este contexto, la monitorización estructural puede ser una herramienta



útil para mejorar el conocimiento sobre el comportamiento dinámico de estructuras, así como una herramienta de apoyo en el post terremoto. Las tecnologías de internet basadas en la red y los avances en el campo de sistemas de comunicación proporcionan una monitorización en tiempo real de sus instalaciones. Con el procesamiento de datos de las mediciones es posible detectar anomalías. Los datos también pueden procesarse para evaluaciones a largo plazo o para explotar los resultados del tratamiento para un apoyo a la decisión. En el caso del análisis del riesgo sísmico, los sistemas de monitorización pueden utilizarse para crear una base de datos de medidas durante todo el ciclo de vida de la estructura. En la fase que precede a un evento sísmico, estos datos pueden ser analizados para evaluar la capacidad de la estructura para resistir eventos sísmicos basados en vibraciones, como los inducidos por el tráfico o debido al viento. Al mismo tiempo, puede mejorar los modelos estructurales disponibles mediante el aumento de la capacidad de las misma para hacer predicciones fiables sobre el desempeño sísmico de la estructura.

Finalmente, es fundamental el conocimiento de las características sísmicas del sitio (por ejemplo, la zona del epicentro, sismicidad, etc.). Para crecer con el tiempo, el análisis de base de datos tiende a proporcionar resultados más estables y fiables. El conocimiento de la sismicidad y el comportamiento de la estructura son útiles para caracterizar el comportamiento exacto de la estructura y los eventos que ocurren realmente, reduciendo el problema a una falsa alarma. [Fabbrocino, Rainieri, Verderame]



2.1.1.3. ENFOQUE DE LOS RESULTADOS DEL MODEL UPDATING

El resultado de una dinámica correcta probando también representan una base para construir modelos numéricos puede reproducir las respuestas experimentales medidas. En general los resultados obtenidos por el modelo teórico de una estructura no refleja el comportamiento real, debido tanto a la dificultad de simular vínculos constitutivos de materiales y condiciones de contorno como a diferencias con el proyecto debido a los cambios que ocurrieron durante la construcción y durante la operación. Si se tiene información sobre el comportamiento real de la estructura, el modelo teórico puede ser corregido con el fin de reproducir las diferencias entre la estructura y el modelo. Las técnicas detrás de estas revisiones se denominan "Actualización del modelo".

El modelo correcto, puede convertirse en una herramienta de diseño valioso si desea predecir el efecto de los cambios estructurales o cambios en las acciones de sollicitación. El modelo numérico actualizado en las fases de daño progresivo puede utilizarse para la localización del daño estructural a través del análisis de las soluciones. A pesar de la actualización es posible también a través de pruebas experimentales de tipo estático, integridad de experimentación dinámica resulta particularmente ventajosa. Por otro lado requiere un trabajo exigente de análisis subsecuente y el uso de técnicas avanzadas de identificación estructural. Puede ser considerado la solución del problema inverso en comparación con lo que se enfrenta en el diseño: tenga en cuenta la respuesta y las acciones a las que deba someterse en busca de sus propiedades mecánicas. Cómo llevar a cabo pruebas y técnicas de análisis debería definirse según el tipo de prueba de estructura y características que se determinarán. [Spinelli]



2.1.1.4. PROBLEMA INVERSO

Uno problema de los principales campos de estudio en ingeniería civil está representado por el análisis estructural del comportamiento dinámico de estructuras. El conocimiento de esta conducta es punible mediante el uso de dos enfoques diferentes:

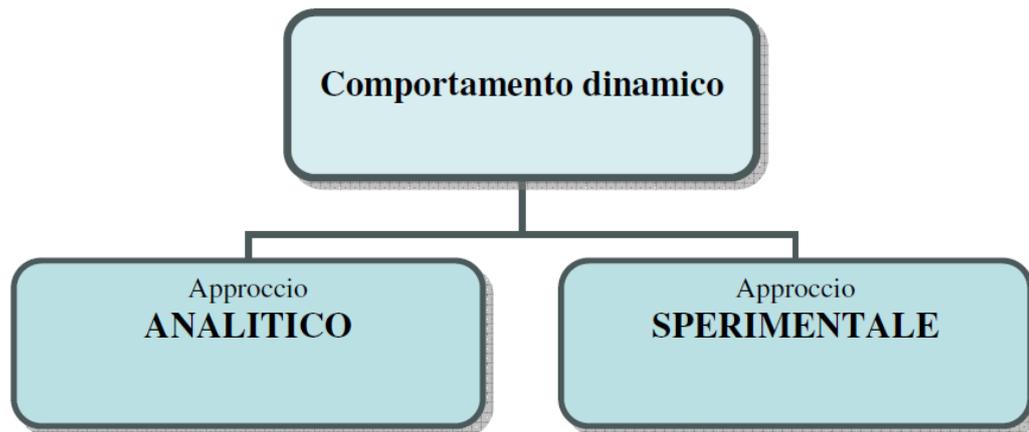


Figura 2.1.1.4.1. Comportamiento dinámico.

El enfoque analítico: a partir de los conocimientos de geometría de la estructura, las condiciones de contorno, características de los materiales, la distribución de masa, rigidez y amortiguación (con representación matricial) da, resolver un problema, valor propio parámetro modal del sistema (frecuencias naturales, modo formas y factores dismorzamiento); El enfoque experimental: a partir de la medición de la entrada dinámica de estructura y adquisición de respuesta estructural cinemático en términosevalúa las funciones de respuesta de frecuencia y estimación de ellos, los parámetros dinámicos de la estructura.

Generalizando, así que el término "detección dinámica" de una estructura es todas esas técnicas, analíticas y experimentales, que permite para identificar la respuesta dinámica de la estructura, o sus frecuencias naturales y modos de vibración de los coeficientes de amortiguación. Análisis modal experimental es conocida también como "problema inverso" (en contraposición con el llamado "directo" problema, en el cual hay entrada, la geometría de la estructura y quieres saber la respuesta), dado que las cuestiones se conocen la respuesta estructural y la entrada (de ahí el fenómeno que provoca la respuesta) y quieres saber la configuración inicial. El principal motivo de interés en materia de análisis



modal experimental está vinculado a la consideración de que el comportamiento dinámico de una estructura es una especie de "huella dactilar" porque depende sólo de sus características intrínsecas (masa, rigidez etc.) y no el tipo y la magnitud de la carga aplicada: de dónde surgen daños estructurales (internas modificaciones al artículo) el comportamiento de la estructura permanece inalterado. De lo contrario habrá variaciones en los modos de vibración y frecuencias. Otra gran ventaja es que la identificación estructural mediante formulación inversa es que una técnica no destructiva puede aplicarse tanto a las estructuras existentes o a las nuevas estructuras. Todo el proceso puede ser demostrado sucintamente:

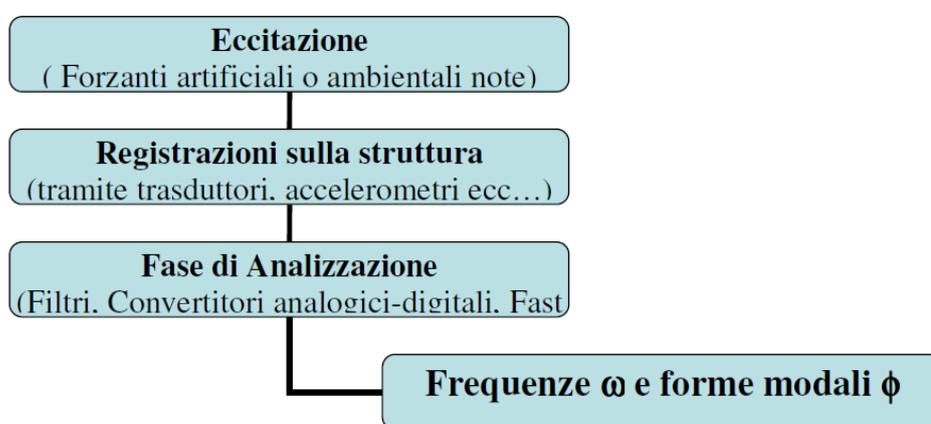


Figura 2.1.1.4.2. Diagrama de flujo del problema inverso.

La formulación inversa para el comportamiento dinámico de una estructura se basa en la suposición fundamental siguiente: -linealidad: comportamiento dinámico es lineal, entonces la respuesta a una combinación de casos emocionantes es igual a la misma combinación de sus respuestas. Es por lo tanto el principio de superposición de efectos. -observación: los datos necesarios para derivar las características dinámicas deben medirse fácilmente. Desde aquí se accede a un campo muy amplio con respecto a la teoría de la elección de los puntos por sensor de posicionamiento monitoreo sistema de medición-estacionaria: características dinámicas son independientes del tiempo. [Fiore, Poroco]



2.2. Sensórica: La toma de señales, comienzo de todo el proceso

2.2.1. SISTEMAS DE MEDIDA

Se denomina sistema a la combinación de dos o más elementos, subconjuntos y partes necesarias para realizar una o varias funciones. En los sistemas de medida, esta función es la asignación objetiva y empírica de un número a una propiedad o cualidad de un objeto o evento, de tal forma que la describa.

En la figura 2.2.1.1 se describe la estructura general de un sistema de medida y control. En un sentido amplio, la realización de una medida implica, pues, además de la adquisición de la información, realizada por un elemento sensor o transductor, también el procesamiento de dicha información y la presentación de resultados, de forma que puedan ser percibidos por nuestros sentidos. Cualquiera de estas funciones puede ser local o remota, implicando ello, en este segundo caso, la necesidad de transmitir la información. [Sensores y acondicionadores de señal, Ramòn Pallàs Areny]

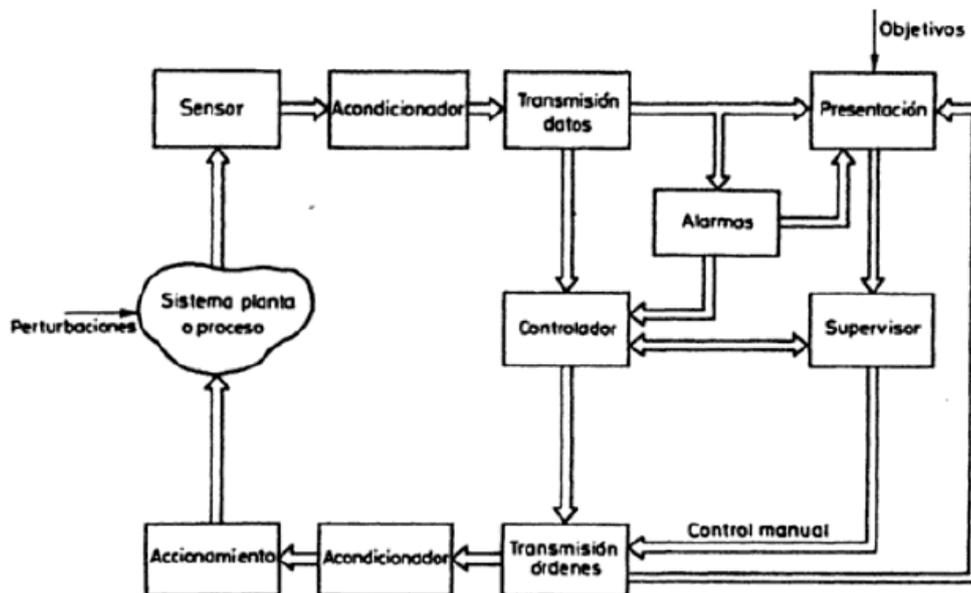


Figura 2.2.1.1 Estructura general de un sistema de medida y control



2.2.2. APROXIMACIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA PARA LA MONITORIZACIÓN: SENSORES Y TRANSDUCTORES

Comenzamos diciendo que los dispositivos de medición son elementos fundamentales de los sistemas de control de realimentación. Selección inapropiada de los dispositivos, su emplazamiento y modo de instalación puede afectar muy negativamente en el rendimiento de cualquier sistema de control. Es clara la importancia de la precisión estática de la medida, no menos importante, sin embargo, es su respuesta dinámica. Retrasos y ruido de medición deben, en la medida de lo posible, reducir al mínimo tanto por la elección cuidadosa de las características intrínsecas del instrumento, tanto por su ubicación e instalación. [Secchi, UniMoRe]

La introducción de dispositivos electrónicos llamados sensores y transductores podemos clasificarlos como dispositivos que convierten una cantidad física no eléctrica en un cantidad física eléctrica. Más detalles:

2.2.2.1. TRANSDUCTORES

Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta. Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro. Esto significa que la señal de entrada es siempre una energía o potencia, pero al medir, una de las componentes de la señal suele ser tan pequeña que puede despreciarse, y se interpreta que se mide sólo la otra componente.

Dado que hay seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas), cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un transductor, y la señal de salida podría ser de cualquier forma física «útil». En la práctica, no obstante, se consideran transductores por antonomasia aquellos que ofrecen una señal de salida eléctrica. Ello se debe al interés de este tipo de señales en la mayoría de procesos de medida.

La transmisión de señales eléctricas es más versátil que la de señales mecánicas, hidráulicas o neumáticas, y si bien no hay que olvidar que éstas pueden ser más convenientes en determinadas circunstancias, como pueden ser la presencia de radiaciones ionizantes o atmósferas explosivas, en muchos casos estos sistemas han sido sustituidos por otros eléctricos. [Sensores y acondicionadores de señal, Ramòn Pallàs Areny]

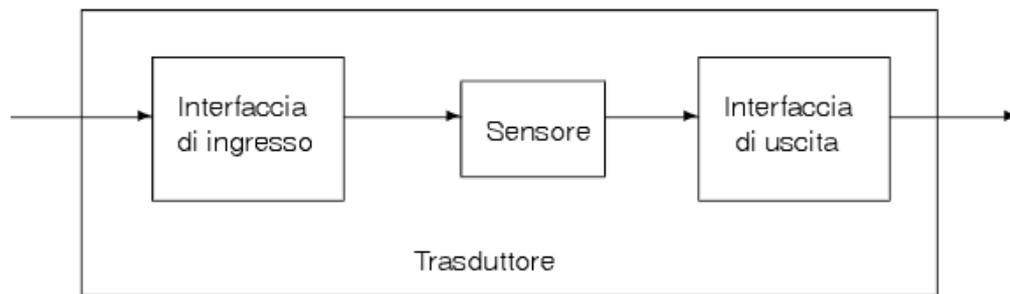


Figura 2.2.2.1. Funcionamiento de un transductor.

Los transductores miden las cantidades físicas:

- Magnitudes continuas, que pueden asumir valores continuos dentro de una cierta gama (por ejemplo, temperatura de una herramienta, velocidad de rotación de un motor, etc...)
- Magnitudes discretas, que toman un conjunto de valores discretos (por ejemplo, la dirección de rotación de un motor, el número de piezas procesadas por minuto, etc...). La información asociada a las cantidades físicas se denomina señales.

Las variables continuas se describen mediante señales analógicas. Las variables discretas se describen mediante señales codificadas o de señales lógicas. [Secchi, UniMoRe]

2.2.2.2. SENSORES

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida. Es un dispositivo que, sin necesidad de fuente de alimentación externa, es capaz de convertir una magnitud física en otra equivalente, por lo general pertenecientes a la propia unidad física del dominio del gobierno (eléctrico, neumático, hidráulico), que luego debe elaborar el contenido de información. A menudo, el sensor capta sólo la información (en su totalidad o en parte), en el sentido de que la magnitud de salida no posee las mismas características energéticas que la energía poseída por el original. [Sensores y acondicionadores de señal, Ramòn Pallàs Areny]



Figura 2.2.2.2. Funcionamiento de un sensor.

2.2.2.3. DIFERENCIAS ENTRE SENSORES Y TRANSDUCTORES

Sensor y transductor se emplean a veces como sinónimos, pero sensor sugiere un significado más extenso: la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos. Transductor, en cambio, sugiere que la señal de entrada y la de salida no deben ser homogéneas. Para el caso en que lo fueran se propuso el término «modificador», pero no ha encontrado aceptación.

La distinción entre transductor de entrada (señal física/señal eléctrica) y transductor de salida (señal eléctrica/presentación) está prácticamente en desuso. La tendencia actual, particularmente en robótica, es emplear el término sensor (o captador en bibliografía francesa) para designar el transductor de entrada, y el término actuador o accionamiento para designar el transductor de salida. Los primeros pretenden la obtención de información, mientras que los segundos buscan la conversión de energía. En esta obra utilizamos el término sensor para referimos a los transductores de entrada. [Sensores y acondicionadores de señal, Ramòn Pallàs Areny]

2.2.2.4. CONVERTIDORES

Definición de convertidor: Si el sensor da una magnitud física de salida difícil de manipular, es posible conectarlo a un circuito capaz de convertir esta magnitud en una sencilla de manipular. Dado que es un circuito electrónico real, lo que tiene que ser alimentado por un generador externo. [Secchi, UniMoRe]



Figura 2.2.2.4.1. Funcionamiento de un convertidor.

La conexión en cascada (uno tras otro) de un sensor y un convertidor se obtiene, entonces, por un transductor que es un dispositivo que, alimentado por un generador externo, es capaz de convertir las magnitudes que pertenecen a un sistema de energía en cantidades equivalentes (proporcional) que pertenece a un sistema de energía diferente (por lo general más conveniente para su uso posterior). [Secchi, Ingegneria e Tecnologia dei sistemi di controllo UniMoRe]

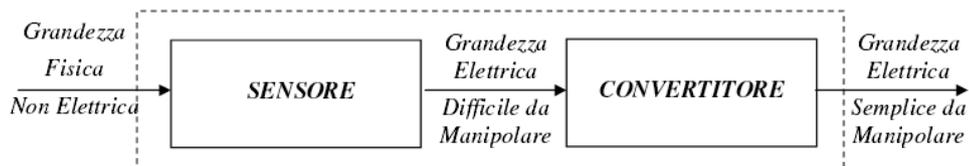


Figura 2.2.2.4.2. Combinación sensor convertidor.

Cualquier circuito eléctrico requiere sensores (o transductores) y actuadores.

2.2.2.5. ACONDICIONAMIENTO Y PRESENTACIÓN

Los acondicionadores de señal, adaptadores o amplificadores, en sentido amplio, son los elementos del sistema de medida que ofrecen, a partir de la señal de salida de un sensor electrónico, una señal apta para ser presentada o registrada o que simplemente permita un procesamiento posterior mediante un equipo o instrumento estándar. Consisten normalmente en circuitos electrónicos que ofrecen, entre otras funciones, las siguientes: amplificación, filtrado, adaptación de impedancias y modulación o demodulación.

Si se considera, por ejemplo, el caso en que una de las etapas de tratamiento de la señal de medida es digital, si la salida del sensor es analógica, que es lo más frecuente, hará falta un convertidor A/D. Éstos



tienen una impedancia de entrada limitada, exigen que la señal aplicada sea continua o de frecuencia de variación lenta, y que su amplitud esté entre unos límites determinados, que no suelen exceder de 10 V. Todas estas exigencias obligan a interponer un acondicionador de señal entre el sensor, que muchas veces ofrece señales de apenas unos milivoltios, y el convertidor A/D.

La presentación de los resultados puede ser de forma analógica (óptica, acústica o táctil) o numérica (óptica). El registro puede ser magnético o sobre papel, e incluso electrónico (memorias eléctricas), y exige siempre que la información de entrada esté en forma eléctrica.

[Sensores y acondicionadores de señal, Ramòn Pallàs Areny]

2.2.2.6. INTERFACES, DOMINIOS DE DATOS Y CONVERSIONES

En los sistemas de medida, las funciones de transducción, acondicionamiento, procesamiento y presentación, no siempre se pueden asociar a elementos físicos distintos. Además, la separación entre el acondicionamiento y el procesamiento puede ser a veces difícil de definir. Pero, en general, siempre es necesaria una acción sobre la señal del sensor antes de su utilización final. Con el término interfaz se designa, en ocasiones, el conjunto de elementos que modifican las señales, cambiando incluso de dominio de datos, pero sin cambiar su naturaleza, es decir, permaneciendo siempre en el dominio eléctrico.

Se denomina dominio de datos al nombre de una magnitud mediante la que se representa o transmite información. El concepto de dominios de datos y el de conversiones entre dominios, es de gran interés para describir los transductores y los circuitos electrónicos asociados. En la Figura 2.2.2.6.1 se representa un diagrama con algunos de los posibles dominios, detallando en particular ciertos dominios eléctricos.

En el dominio analógico, la información está en la amplitud de la señal, bien se trate de carga, corriente, tensión o potencia. En el dominio temporal, la información no está en las amplitudes de las señales, sino en las relaciones temporales: periodo o frecuencia, anchura de pulsos, fase. En el dominio digital, las señales tienen sólo dos niveles. La información puede estar en el número de pulsos, o venir representada por palabras serie o paralelo codificadas.

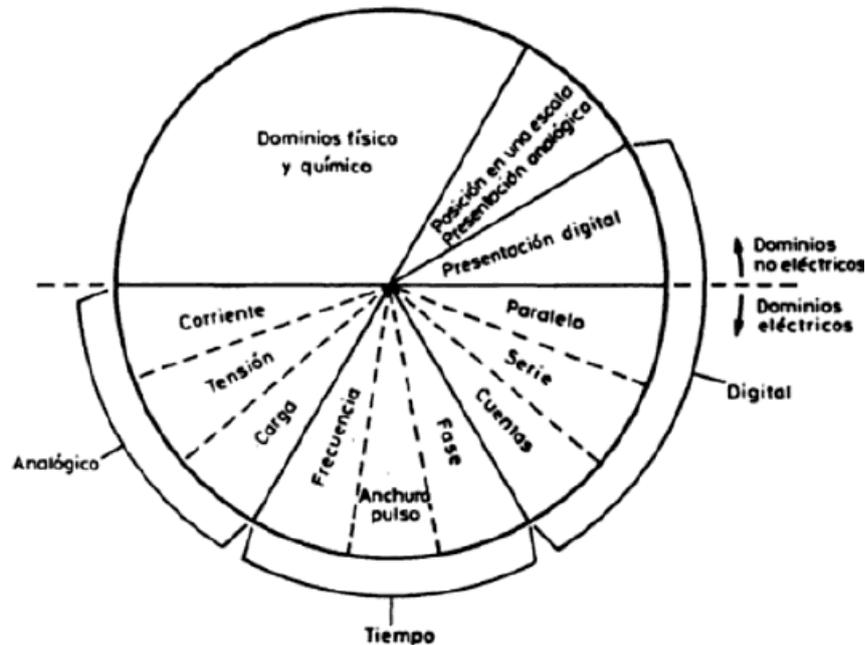


Figura 2.2.2.6.1. Dominios de datos.

El dominio analógico es, en general, el más susceptible a interferencias eléctricas. En el dominio temporal, la variable codificada no se puede medir, es decir, convertir al dominio de números, de forma continua, sino que hay que esperar un ciclo o la duración de un pulso. En el dominio digital, la obtención de números es inmediata.

La estructura de un sistema de medida refleja, pues, las conversiones entre dominios que se realizan, e influye particularmente en ella el que se trate de una medida directa o indirecta.

Una medida física es directa cuando se deduce información cuantitativa acerca de un objeto físico o acción mediante comparación directa con una referencia.

En las medidas indirectas la cantidad de interés se calcula a partir de otras medidas y de la aplicación de la ecuación que describe la ley que relaciona dichas magnitudes. Los métodos empleados suelen ser siempre eléctricos.

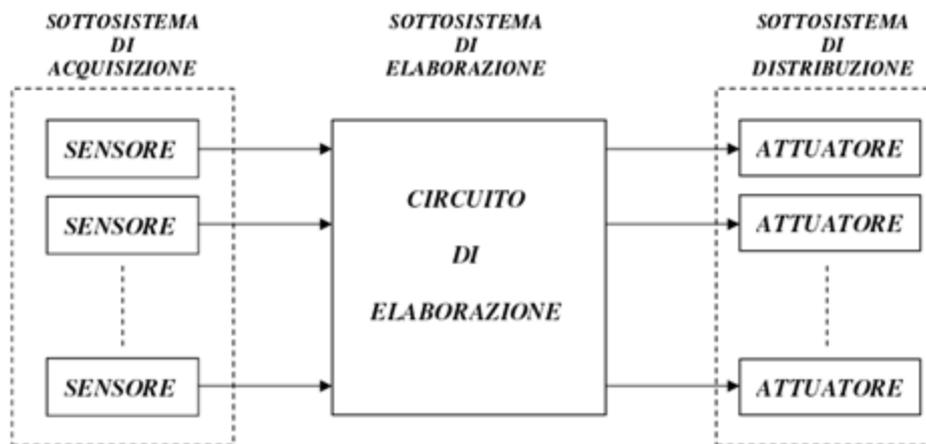


Figura 2.2.2.6.2. Esquema de un circuito.

- Los sensores (o transductores) adquieren las informaciones mediante su conversión en señales eléctricas.
- El circuito de procesamiento las procesa, manipula y transforma.
- Los actuadores las distribuyen al resto del mundo externo, convirtiéndolas en cantidades físicas que percibimos.

El sistema en su totalidad se llama el sistema de adquisición de datos, procesamiento y distribución.

En muchos casos, la distinción entre el sensor y el transductor no es tan clara y delimitada y muy a menudo en la literatura técnica y en la práctica común los dos términos se utilizan indistintamente.

2.2.2.7. INSTRUMENTACIÓN Y TÉCNICAS PARA LA MEDIDA DE LAS VIBRACIONES

Las mediciones de vibraciones se pueden hacer, a veces, con instrumentos bastante simples, tales como vibrómetros a mano, pero por lo general requieren un equipo relativamente complejo, que incluye al menos un transductor, un amplificador y un indicador.

El transductor es un instrumento sensible al desplazamiento, velocidad o aceleración, capaz de tener una tensión de salida (o una otra magnitud eléctrica) proporcional al valor instantáneo de la variable de entrada. La magnitud eléctrica de la salida del transductor se amplifica primero y luego se envía a un instrumento que indica el valor, o más bien, está



adecuadamente calibrado para indicar directamente el valor de la cantidad (desplazamiento, velocidad, aceleración) detectado por el transductor.

Una cadena de medida completa se compone generalmente de los siguientes componentes:

- Transductor,
- Pre- amplificador,
- Acondicionador de señal,
- Convertidor Analógico/Digital,
- Analizador de Señales,
- Otros dispositivos (Visor, Impresora, Plotter...)

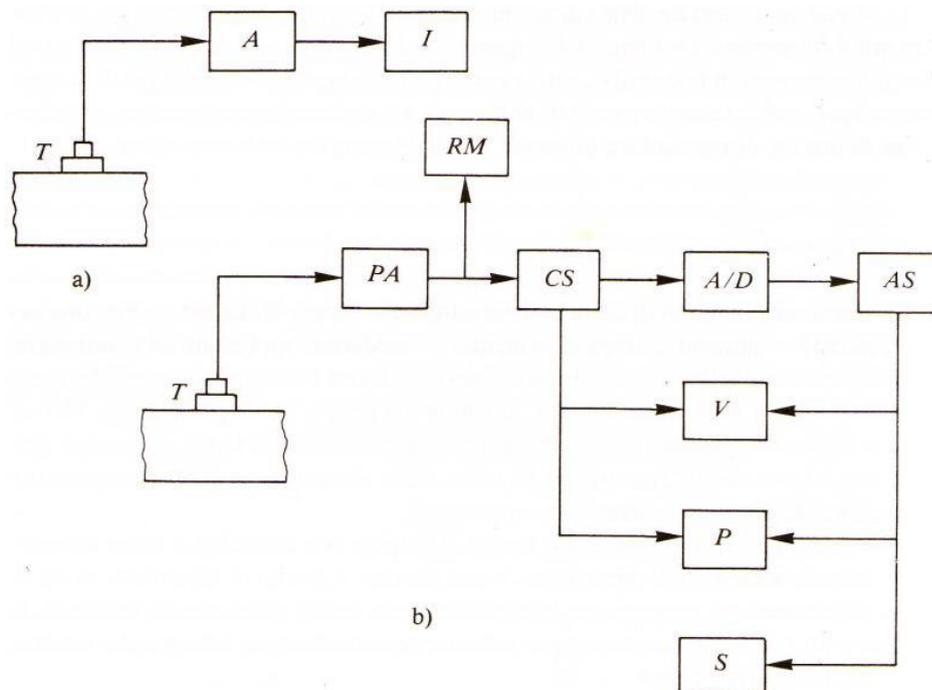


Figura 2.2.2.7.1. Cadenas de medida.

La señal (es decir, la cantidad eléctrica cuyo valor es proporcional a la de la magnitud registrada) desde el transductor T primero se amplifica por el pre - amplificador de megafonía, y posteriormente enviado a un aparato de CS, que por lo general amplifica y hace más cualquier otra operación, como el filtrado de frecuencias o la integración. El filtrado de frecuencia se puede hacer ya sea con filtros analógicos (en el que la señal de entrada es continua) tanto con filtro digital colocado abajo del convertidor A/D y internos en el aparato.



El filtrado de la frecuencia de operación en la señal de entrada permite el paso sólo de armónicos específicos en la señal de salida. Un filtro de paso bajo, por ejemplo, permite el paso sólo de los componentes de frecuencia inferiores a un valor impuesto (frecuencia de corte del filtro). Un filtro de paso de banda permite que filtrar todos los armónicos de una banda de frecuencias asignada. El análisis de frecuencia de banda estrecha (Fast Fourier Transform) se realiza abajo del convertidor A/D después que la señal ha sido cuantificada.

La posible presencia adicional de un integrador aparato permite que pasar desde la aceleración a la velocidad y/o desde velocidad al desplazamiento.

La señal condicionada es enviada por lo general a un convertidor analógico a digital convertidor A/D, que lleva a cabo el muestreo a una frecuencia elegida por el usuario, mediante la detección del valor numérico a intervalos regulares de tiempo t . La señal desde el transductor es una señal de "análogo" de forma continua, la tendencia de los cuales es similar a la de la cantidad medida; el convertidor A/D detecta el valor instantáneo de la señal a intervalos regulares de tiempo, transformándolo en un conjunto de números discretos (señal "digital") que puede ser manejado y procesado por un ordenador. La señal finalmente llega a la señal del analizador AS, que puede operar en señal analógica por medio de circuitos electrónicos (filtros, derivaciones, suplementos); si en vez que la señal ha sido digitalizada por el convertidor A/D, el analizador está constituido por un ordenador, que analiza la señal muestreada tratándolo como un conjunto de entrada de datos numéricos, realizando en ello la mayoría de las diversas operaciones matemáticas. [UNICT, medición de vibraciones]

Para la representación de la vibración es, en principio, irrelevante cuál de los tres parámetros cinemáticos (aceleración, velocidad o desplazamiento) se utiliza. Sin embargo, por razones relacionadas con la sensibilidad de la medición, la detección del desplazamiento es más conveniente en el caso de vibraciones de baja frecuencia, mientras que las medidas de velocidad y aceleración son más convenientes en presencia de componentes armónicos de la frecuencia. A los efectos de la ejecución del análisis de la frecuencia de respuesta estructural, normalmente se elige el parámetro de la velocidad o el parámetro de aceleración, de acuerdo con las indicaciones de la regla que se aplica.

Además, en los últimos años ha establecido más y más, por razones de practicidad de uso y también de coste, el uso de acelerómetros y, en



particular, de los piezoeléctrico . Si la medida en términos de la velocidad es esencia , se determina indirectamente a partir de la aceleración por la integración numérica, la puesta en marcha de todas las precauciones necesarias con el fin de obtener resultados fiables .

El esquema de funcionamiento de un sistema de medición de la vibración se representa en forma esquemática en la Figura 2.2.2.7.2. En ella reconocemos el sensor y el sistema de suministro de energía , el dispositivo para la integración de la señal, el filtro de paso bajo y el sistema de representación de los resultados.

[A. L. Materazzi, 2001 Problemi di vibrazioni nelle strutture civili e nelle costruzioni meccaniche]

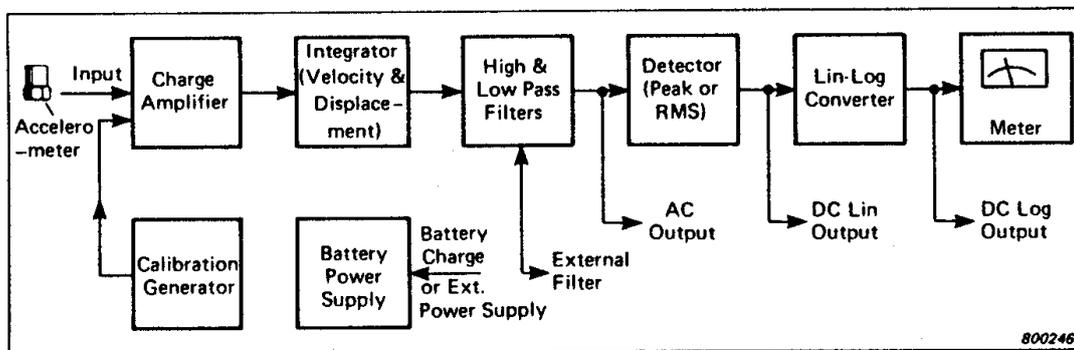


Figura 2.2.2.7.2. Representación esquemática de un sistema de medida de las vibraciones.

2.2.2.8. TIPOS DE SENSORES

El número de sensores disponibles para las distintas magnitudes físicas es tan elevado que no se puede proceder racionalmente a su estudio sin clasificarlos previamente de acuerdo con algún criterio.

Según el aporte de energía, los sensores se pueden dividir en moduladores y generadores. En los sensores moduladores o activos, la energía de la señal de salida procede, en su mayor parte, de una fuente de energía auxiliar. La entrada sólo controla la salida. En los sensores generadores o pasivos, en cambio, la energía de salida es suministrada por la entrada.

Los sensores moduladores requieren en general más hilos que los generadores, ya que la energía de alimentación suele suministrarse



mediante hilos distintos a los empleados para la señal. Además, esta presencia de energía auxiliar puede crear un peligro de explosiones en algunos ambientes. Por contra, su sensibilidad se puede modificar a través de la señal de alimentación, lo que no permiten los sensores generadores. Según la señal de salida, los sensores se clasifican en analógicos o digitales. En los analógicos la salida varía, a nivel macroscópico, de forma continua. La información está en la amplitud, si bien se suelen incluir en este grupo los sensores con salida en el dominio temporal. Si es en forma de frecuencia, se denominan, a veces, «casidigitales», por la facilidad con que se puede convertir en una salida digital.

En los sensores digitales, la salida varía en forma de saltos o pasos discretos. No requieren conversión A/D y la transmisión de su salida es más fácil. Tienen también mayor fidelidad y mayor fiabilidad, y muchas veces mayor exactitud, pero lamentablemente no hay modelos digitales para muchas de las magnitudes físicas de mayor interés.

Atendiendo al modo de funcionamiento, los sensores pueden ser de deflexión o de comparación. En los sensores que funcionan por deflexión, la magnitud medida produce algún efecto físico, que engendra algún efecto similar, pero opuesto, en alguna parte del instrumento, y que está relacionado con alguna variable útil. Un dinamómetro para la medida de fuerzas es un sensor de este tipo en el que la fuerza aplicada deforma un muelle hasta que la fuerza de recuperación de éste, proporcional a su longitud, iguala la fuerza aplicada.

En los sensores que funcionan por comparación, se intenta mantener nula la deflexión mediante la aplicación de un efecto bien conocido, opuesto al generado por la magnitud a medir. Hay un detector del desequilibrio y un medio para restablecerlo. En una balanza manual, por ejemplo, la colocación de una masa en un platillo provoca un desequilibrio, indicado por una aguja sobre una escala. El operario coloca entonces una o varias masas en el otro platillo hasta alcanzar el equilibrio, que se juzga por la posición de la aguja.

Las medidas por comparación suelen ser más exactas porque el efecto conocido opuesto se puede calibrar con un patrón o magnitud de referencia de calidad.

El detector de desequilibrio sólo mide alrededor de cero y, por lo tanto, puede ser muy sensible y no necesita estar calibrado. Por contra, tienen en principio menor respuesta dinámica y, si bien se pueden automatizar



mediante un servomecanismo, no se logra normalmente una respuesta tan rápida como en los de deflexión.

Según el tipo de relación entrada-salida, los sensores pueden ser de orden cero, de primer orden, de segundo orden o de orden superior. El orden está relacionado con el número de elementos almacenadores de energía independientes que incluye el sensor, y repercute en su exactitud y velocidad de respuesta. Esta clasificación es de gran importancia cuando el sensor forma parte de un sistema de control en lazo cerrado.

En la tabla 2.2.2.8 se recogen todos estos criterios de clasificación y se dan ejemplos de sensores de cada clase. Cualquiera de estas clasificaciones es exhaustiva, y cada una tiene interés particular para diferentes situaciones de medida. Ahora bien, para el estudio de un gran número de sensores se suele acudir a su clasificación de acuerdo con la magnitud medida. Se habla, en consecuencia, de sensores de temperatura, presión, caudal, humedad, posición, velocidad, aceleración, fuerza, par, etc. Sin embargo, esta clasificación difícilmente puede ser exhaustiva ya que la cantidad de magnitudes que se pueden medir es prácticamente inagotable.

<i>Criterio</i>	<i>Clases</i>	<i>Ejemplos</i>
Aporte de energía	Moduladores	Termistor
	Generadores	Termopar
Señal de salida	Analógicos	Potenciómetro
	Digitales	Codificador de posición
Modo de operación	De deflexión	Acelerómetro de deflexión
	De comparación	Servoacelerómetro

Tabla 2.2.2.8. Clasificación de sensores.

Desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, es más atractiva la clasificación de los sensores de acuerdo con el parámetro variable: resistencia, capacidad, inductancia, añadiendo luego los sensores generadores de tensión, carga o corriente, y otros tipos no incluidos en los anteriores grupos. Si bien este tipo de clasificación es poco frecuente, es el elegido en este texto, pues permite reducir el número de grupos a unos pocos. [Sensores y acondicionadores de señal, Ramòn Pallàs Areny]



2.2.2.9. PARÁMETROS Y CARACTERIZACIÓN DE SENSORES Y TRANSDUCTORES

Las propiedades o características que describen cada sensor y el transductor se llaman parámetros. Los principales son:

- Característica de entrada / salida (I/O)
- Offset
- Linealidad
- Histéresis
- Sensibilidad
- Tiempo de respuesta
- Rango de operación
- Fiabilidad
- Trazabilidad
- Precio

2.2.2.9.1. Característica de entrada/salida

La función de entrada/salida nos dice lo que es el valor de la salida de un sensor o transductor en función de cada posible valor de entrada y viceversa. Se puede representar en forma matemática o gráfica.

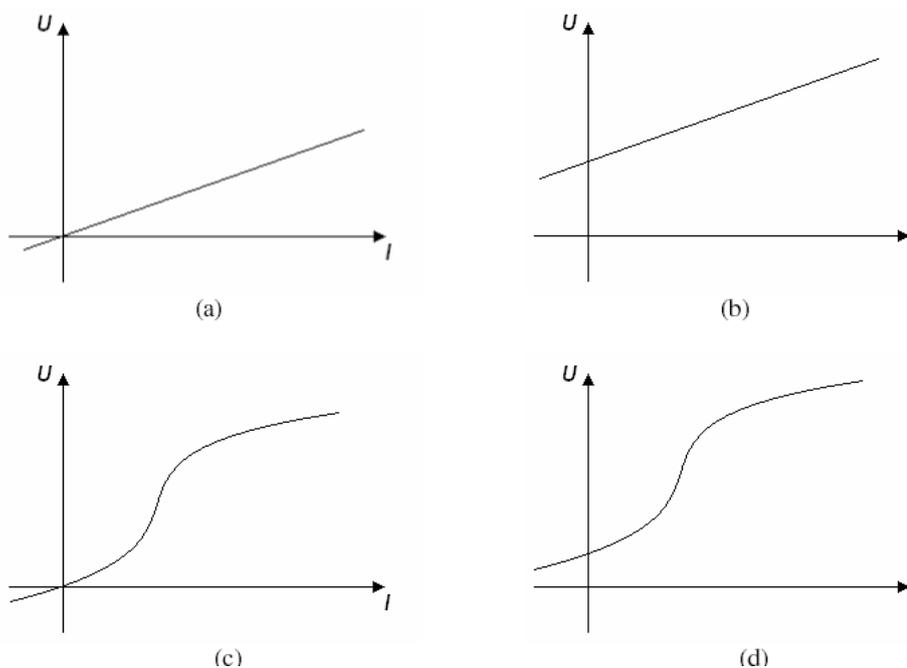


Figura 2.2.2.9.1. Función de entrada/salida



2.2.2.9.2. Offset

La observación de las características de E / S que se muestran en la figura, se ve que las de la izquierda pasan por el origen, mientras que las hacia la derecha no lo hace. Los primeros han de traslados de origen, mientras que los otros tienen un desplazamiento distinto de cero. En general, un buen sensor o transductor tiene un desplazamiento deferente de cero. Llamada así por el desplazamiento de un sensor o transductor dal'uscita el valor asumido cuando la entrada es nula.

2.2.2.9.3. Linealidad

La característica de E / S de un sensor o transductor, expresada en forma matemática, se utiliza a menudo en los cálculos y la más fácil de usar es la de la línea recta, la otra, en general, de plomo (aportan a) cálculos para bastante complejas.

Es por lo tanto, es claro que los sensores o transductores más fáciles de usar son aquellos que tienen como característica una línea recta, mejor si pasa preferentemente a través del origen. Un sensor o transductor se dice que es lineal si la característica de E / S es una línea recta.

2.2.2.9.4. Histéresis

Algunos sensores y transductores tienen dos características de E / S diferentes y utilizan uno u otro en función de si la señal de entrada aumenta o disminuye.

Esta característica se llama histéresis, una propiedad indeseable, conocida debido a que para el valor de salida, no siempre es posible conocer el valor de la entrada que lo generó. Un sensor o transductor se dice con histéresis si posee dos características diferentes de entrada / salida y utiliza el uno o el otro dependiendo de si la señal de entrada crece o disminuye. Es bien sabido que un buen sensor o transductor no debería tener histéresis.

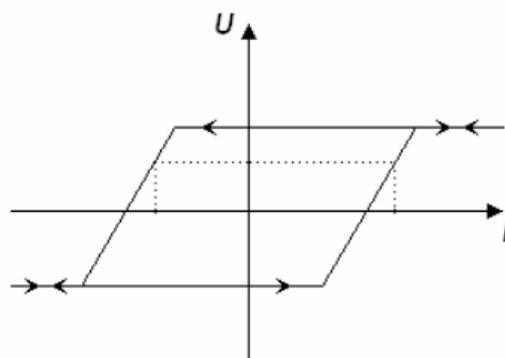


Figura 8

Figura 2.2.2.9.4. Histéresis.

2.2.2.9.5. Sensibilidad

La sensibilidad de un sensor o transductor nos dice lo grande que es el cambio de la señal de salida igual a la variación en la señal de entrada. Se define como la relación entre el cambio en la variable de salida ΔU y la variación de la entrada de Delta ΔI

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

Como se puede observar para una variación dada de la señal de entrada, la variación de la señal de salida es la más grande, mayor es la sensibilidad del sensor o transductor. Típicamente un buen sensor o transductor debe tener una gran sensibilidad.

2.2.2.9.6. Tiempo de respuesta

Es el Intervallo del tiempo empleado por el sensor o transductor debido a que su salida alcanza el valor final (o esquema). Este tiempo coincide con la transición. Un buen sensor debe tener un tiempo de respuesta muy reducido.

2.2.2.9.7. Rango de operación

El rango de operación es de ese rango de valores de entrada para el que el sensor o transductor está funcionando correctamente y que no hay



riesgo de daño.

Un sensor o transductor debe tener un rango de operación de la mayor cantidad posible.

2.2.2.9.8. Fiabilidad

Es la capacidad de un sensor o transductor para durar. Nos dice cuánto tiempo o cuántas veces se puede utilizar antes de que sea dañado sin posibilidad de reparación. Es claro que tiene que durar tanto como sea posible.

2.2.2.9.9. Precio y reparabilidad

El precio es el costo de compra de la sonda o transductor. Depende de muchos factores. Denotamos por la disponibilidad, por otro lado, la facilidad con que se puede comprar un sensor o transductor. Algunos son de fácil acceso, muchos otros no lo son.

2.2.2.10. ESPECIFICACIONES SOBRE LA FUNCIONALIDAD DE LOS SENSORES

2.2.2.10.1. Características estáticas

Característica estática. La característica estática se obtiene cambiando muy lentamente la variable de entrada del sensor y el registro de la variable de salida correspondiente.

2.2.2.10.2. Características dinámicas

Cuando la variable de entrada varía muy rápidamente, el transductor puede tener un comportamiento dinámico, es decir, la variable de salida presenta un cierto retraso y cierta atenuación a la característica estática. Por lo tanto, es claro que la característica dinámica del transductor coloca un límite en el bando de pasa de todo el sistema de control.

2.2.2.10.3. Dependencia de las variables ambientales

El transductor está diseñado para detectar una cierta cantidad física, sin embargo, es muy difícil construir un dispositivo selectivo que no parece



influenciado por otras magnitudes físicas. Por ejemplo, la temperatura influye en las características físicas de casi todos los materiales, y en particular los semiconductores.

2.2.2.10.4. Fiabilidad

La fiabilidad del transductor es de fundamental importancia para el buen funcionamiento del sistema de control. La fiabilidad se mide en un sentido estadístico, proporcionando el tiempo medio antes de fallo del dispositivo (MTBF Mean Time Between Failure).

2.2.2.10.5. Características estáticas ideales

La característica estática es el enlace estático entre las variables a medir y la salida del transductor. Lo ideal sería que esta característica es lineal.

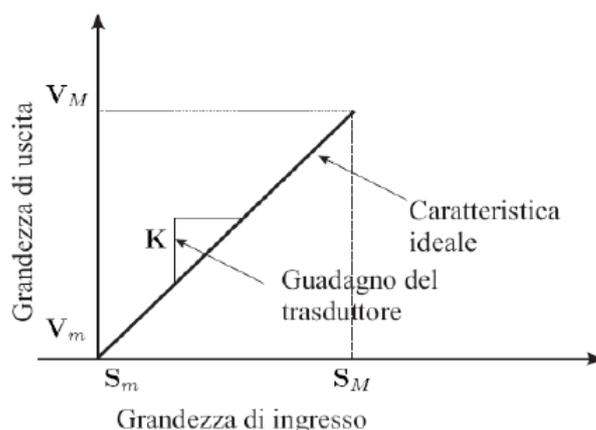


Figura 2.2.2.10.5.1. Características estáticas.

Sin embargo, los transductores comerciales tienen una característica estática que difiere de la ideal debido a las imperfecciones de fabricación inevitables. La calidad de un sensor se mide de acuerdo con lo que la característica verdadera se desvía de la ideal. Los fabricantes de transductores ofrecen algunos índices que miden la calidad del sensor como el error de linealidad:



$$e_L \% = \frac{\Delta V}{V_M - V_m} 100$$

Donde ΔV es la desviación máxima de la característica lineal.

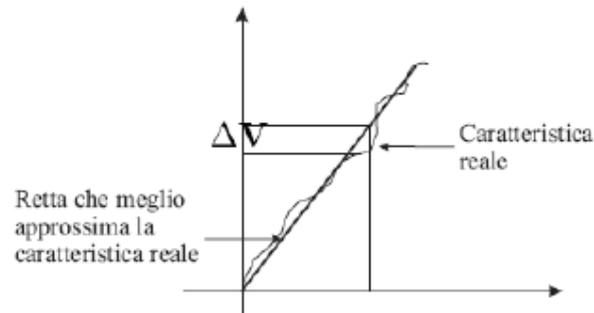


Figura 2.2.2.10.5.2. Desviación máxima de la característica lineal.

2.2.2.10.6. Errores en las características estáticas

Error de fuera cero (error de desplazamiento). Este es el valor que toma la salida del transductor cuando la cantidad a medir es cero.

Error de ganancia (gain error). Es la diferencia entre la ganancia de la característica ideal del transductor (K) y la ganancia de la línea recta (K_1) que aproxima en el mejor la característica ideal del transductor. El error de ganancia se expresa generalmente como un porcentaje:

$$e_G \% = \frac{|K_1 - K|}{K} 100$$

Resolución: Es la variación máxima de la entrada que no da lugar a ningún cambio en la salida.



$$e_R \% = \frac{\Delta V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} 100$$

2.2.2.10.7. Precisión

Precisión (precisión, repetibilidad). Es una medida de cómo la salida del sensor es repetible en experimentos repetidos. En esencia, puede suceder que al repetir el mismo experimento muchas veces el sensor no da el mismo resultado. La repetibilidad de un sensor se indica generalmente proporcionando una gama de error máximo (\pm SEM) o un porcentaje de error con respecto al rango de salida:

$$e_p \% = \frac{|e_{MAX}|}{V_M - V_m} 100$$

Precisión (Accuracy). Es una medida de la cantidad de la salida del transductor se aleja de lo que debería ser su salida ideal, es decir, la salida que tendría un transductor ideal que mide la misma magnitud que la real.

$$e_A \% = \frac{\text{errore}}{\text{valore vero}} 100$$

2.2.2.10.8. Características dinámicas

El transductor es un sistema físico que tiene necesariamente un comportamiento dinámico que es evidente cuando su variable de entrada cambia rápidamente.

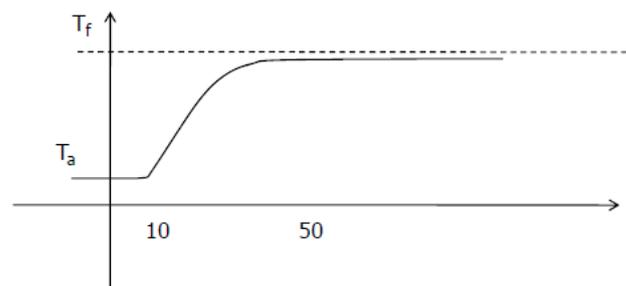




Figura 2.2.2.10.8.1. Respuesta de un termopar a temperatura T_a sumergida en un fluido a temperatura T_f .

Un sensor puede ser descrito por una función de transferencia $F(s)$. Por lo general, los fabricantes simplemente proporcionan algunos elementos característicos que califican la $F(s)$, tales como banda de paso, respuesta y resonancias. La dinámica del sensor es a menudo despreciable comparado con la del proceso, pero en algunos casos puede tener una influencia significativa en el comportamiento global del bucle de control. La velocidad de respuesta es entonces un elemento a ser evaluados con cuidado en la selección, la ubicación y la instalación de un sensor a un bucle de control de rendimiento.

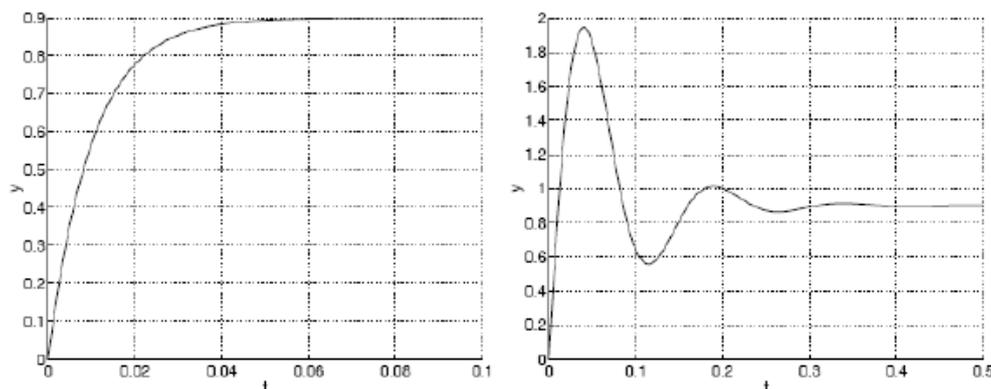


Figura 2.2.2.10.8.2. Respuesta del sistema supone en la fase de diseño (a la izquierda) y real (a la derecha).

2.2.2.10.9. Criterios para la elección de un sensor

- El campo de selección, o el rango (por ejemplo, 200 a 600 ° C) y el rango o intervalo (400 ° C) de medida
- La exactitud, la precisión y la resolución que desee
- Las características dinámicas
- El nivel de fiabilidad (por ejemplo, en términos de tiempo medio entre fallos)
- Los costes (compra, instalación y mantenimiento)
- Los problemas especiales de la instalación y el peligro



- El material de construcción

2.2.2.11. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LOS SENSORES

En lo que a continuación se sigue se exponen, sin ningún tipo de demostraciones especiales, algunas leyes y principios utilizados en la creación de los sensores más comunes.

La ley de Ohm: En un circuito eléctrico en el que una resistencia está presente la relación entre las magnitudes eléctricas es la siguiente:

$$V=RI$$

Esta ley se utiliza a menudo para darse cuenta de sensores "modulación" en la que la resistencia del circuito varía en función de la cantidad física que debe medirse de acuerdo con algún principio o sus efectos entre los que se describen posteriormente.

2.2.2.11.1. Efecto piezoresistivo

Variación de la resistencia eléctrica de un material (de metal o semiconductor) debido a su deformación mecánica. El cambio de resistencia en los metales es mucho menor que en el silicio.

2.2.2.11.2. Efecto termoresistivo

Variación de la resistencia eléctrica de un material (de metal o semiconductor) debido a la calefacción. El cambio de resistencia en los metales puros (especialmente de platino) no es muy alto, pero varía muy linealmente con la temperatura. La resistencia en los semiconductores o en los óxidos es muy alta, pero varía de forma no lineal con la temperatura.

2.2.2.11.3. Efecto termoeléctrico

Cuando una diferencia de temperatura está presente entre dos partes de un sistema que consiste en dos conductores metálicos unidos en una unión producirse dos efectos: efecto Seebeck: si la unión se mantiene a una temperatura diferente de la de las dos partes con metal libre, que genera una diferencia de potencial (voltaje) entre los dos extremos libres.



El voltaje generado es bastante pequeño (decenas de mV), pero depende casi linealmente de la diferencia de temperatura.

Efecto Peltier: si una corriente se hace pasar a través de la unión en que se genera o absorbe calor en relación con la dirección de la corriente circulante.

2.2.2.12. PRINCIPALES TIPOLOGÍAS DE SENSORES

Los sensores basan su funcionamiento en las leyes naturales que regulan la relación entre las cantidades físicas. Así que con el fin de diseñar un sensor que revela una cierta magnitud física es necesario conocer la naturaleza física que gobierna la relación entre esta magnitud y la magnitud de la salida del sensor.

2.2.2.12.1. Sensores de tipo resistivo

Los sensores basados en la variación de la resistencia eléctrica de un dispositivo son probablemente los más abundantes. Ello se debe a que son muchas las magnitudes físicas que afectan al valor de la resistencia eléctrica de un material.

En consecuencia, ofrecen una solución válida para numerosos problemas de medida. En el caso de los resistores variables con la temperatura, ofrecen también un método de compensación térmica aplicable en los sistemas de medida de otras magnitudes.

Abajo se describen los sensores más frecuentes basados en la variación de resistencia, exponiendo, en este orden, su fundamento, tecnología, circuito eléctrico equivalente y aplicaciones. Para la clasificación de los diversos sensores de esta clase se toma como criterio el tipo de magnitud física medida.

Sensores de tipo resistivo: Estos sensores convierten la magnitud a medir en una variación de la resistividad. La resistividad se puede expresar como:

$$R_s = \rho \frac{l}{A}$$

Donde ρ es la resistividad del material (por lo general depende de la temperatura), L y A son la longitud y la sección transversal del material.



La variación de la resistencia puede ser producida por:

- Variación de la geometría: producida por los contactos (potenciómetros) deslizantes o fuerzas de deformación (galgas extensiométricas).
- Los cambios en la temperatura (termistores).
- Iluminación (fotorresistores).

2.2.2.12.2. Galgas extensiométricas (medidores de deformación)

Las galgas extensométricas se basan en la variación de la resistencia de un conductor o un semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico.

Las galgas extensiométricas son unos dispositivos eléctricos utilizados para medir la deformación, presión, carga, torque, posición, entre otras cosas, utilizando el efecto piezorresistivo, el cual es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia eléctrica cuando se le someten a ciertos esfuerzos.

Los materiales empleados para la fabricación de galgas extensométricas son diversos conductores metálicos, como las aleaciones constantan, advance, karma, isoelastic, y también semiconductores como el silicio y el germanio. Las aleaciones metálicas escogidas tienen la ventaja de un bajo coeficiente de temperatura, porque en ellas se compensa parcialmente la disminución de la movilidad de los electrones al aumentar la temperatura con el aumento de su concentración. Las galgas pueden tener o no soporte propio, eligiéndose en su caso en función de la temperatura a la que se va a medir.

En la Tabla 2.2.2.12.2 se muestran las características de diversos tipos de galgas extensométricas. Las galgas metálicas con soporte pueden ser de hilo bobinado o plegado con soporte de papel, o impresas por fotograbado. En este caso puede observarse en la figura que se dispone de una gran variedad de configuraciones, adaptadas a diversos tipos de esfuerzos. Hay modelos para diafragma, para medir torsiones, para determinar esfuerzos máximos y mínimos y sus direcciones (rosetas múltiples), etc.



Parámetro	Metálicas	Semiconducadoras
Margen de medida, $\mu\epsilon$	0,1 a 40.000	0,001 a 3000
Factor de sensibilidad	1,8 a 2,35	50 a 200
Resistencia, Ω	120, 350, 600...5000	1000 a 5000
Tolerancia en la resistencia, %	0,1 a 0,2	1 a 2
Tamaño, mm	0,4 a 150 estándar: 3 a 6	1 a 5

Tabla 2.2.2.12.2. Características normales de las galgas extensométricas metálicas y semiconduc toras.

Las galgas extensométricas se pueden aplicar a la medida de cualquier variable que pueda convertirse, con el sensor apropiado, en una fuerza capaz de provocar deformaciones del orden de 10 μm e incluso inferiores.

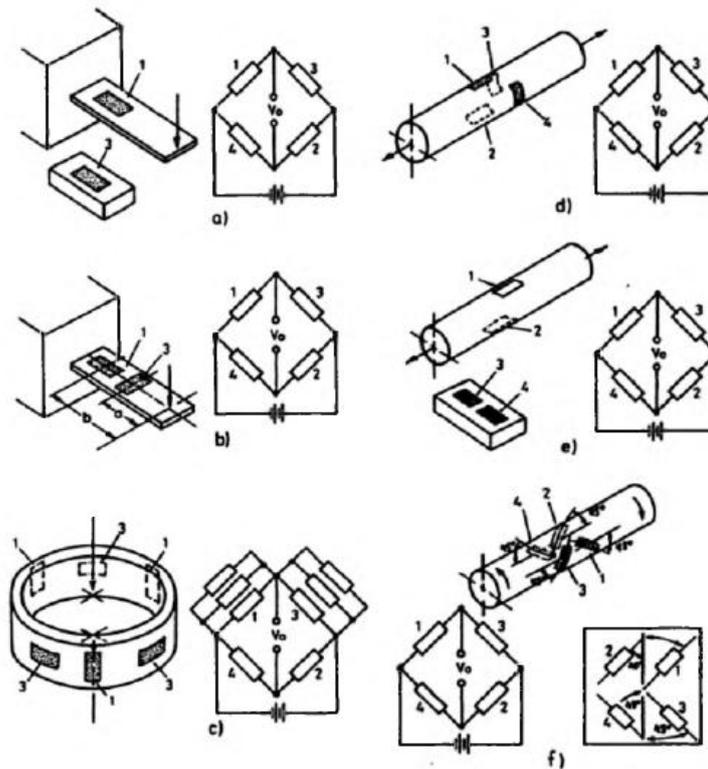


Figura 2.2.2.12.2. Diversas aplicaciones de las galgas extensométricas para la medida de magnitudes mecánicas (Documentación BLH Electronics).

En la Figura 2.2.2.12.2 se presentan diversas aplicaciones relativas a la medida de fuerza y par con elementos elásticos. En el caso a se emplea un voladizo con una galga activa y, aparte, una galga pasiva para



compensación. En el caso b se emplean dos galgas activas en el mismo voladizo, pero una de ellas transversal. En el caso c hay una célula de carga con tres galgas activas en dirección longitudinal y otras tres en dirección transversal. En el caso d se emplean cuatro galgas activas, dos longitudinales y dos transversales. En el caso e hay sólo dos galgas activas; aparte hay dos galgas pasivas para compensación. En el caso f se emplean cuatro galgas activas para detectar esfuerzos de torsión, con sentidos opuestos dos a dos. La medida de presiones, caudal, aceleraciones, etc., se puede realizar con técnicas similares. [Sensores y acondicionadores de signal]

2.2.2.12.3. Detectores de temperatura activos

Los detectores de temperatura basados en la variación de una resistencia eléctrica se suelen designar con sus siglas inglesas RTD (Resistance Temperature Detector). Dado que el material empleado con mayor frecuencia para esta finalidad es el platino, se habla a veces de PRT (Platinum Resistance Thermometer).

El símbolo general para estos dispositivos es el de la Figura 2.2.2.12.3 La línea recta en diagonal sobre el resistor indica que varía de forma intrínseca lineal, y la anotación junto a dicha línea denota que la variación es debida a la temperatura y tiene coeficiente positivo.

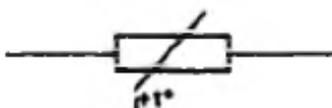


Figura 2.2.2.12.3. Símbolo para una resistencia con dependencia intrínseca de la temperatura y variación lineal (Publicación CEI 117-6).

El fundamento de las RTD es la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. En un conductor, el número de electrones disponibles para la conducción no cambia apreciablemente con la temperatura. Pero si ésta aumenta, las vibraciones de los átomos alrededor de sus posiciones de equilibrio son mayores, y así dispersan más eficazmente a los electrones, reduciendo su velocidad media.

Esto implica un coeficiente de temperatura positivo, es decir, un aumento de la resistencia con la temperatura. Esta dependencia se puede expresar de la forma:



$$R = R_0 (1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n)$$

Donde R_0 es la resistencia a la temperatura de referencia y T el incremento de temperatura respecto a la de referencia.

El empleo de un conductor para la medida de temperaturas, basándose en el comportamiento descrito por la ecuación anterior, está sometido a varias limitaciones. En primer lugar, es obvio que no se podrán medir temperaturas próximas ni superiores a la de fusión del conductor. En segundo lugar, para poder medir una temperatura determinada con este método, es necesario que el sensor esté precisamente a dicha temperatura. Habrá que evitar, pues, autocalentamientos provocados por el circuito de medida. Como en cualquier otro sensor, su validez práctica depende de su estabilidad.

Las principales ventajas de estos sensores son que su sensibilidad es unas diez veces mayor que la de los termopares, la alta repetibilidad, estabilidad a largo plazo y exactitud en el caso del platino, y el bajo coste en el caso del cobre y del níquel, que son tres de los metales empleados con esta finalidad. Para éstos, en su margen lineal, la ecuación anterior se reduce a:

$$R = R_0 (1 + \alpha T)$$

En la Tabla 2.2.2.12.3 figuran los parámetros de estos y otros metales empleados.

Parámetro	Platino	Cobre	Níquel	Molibdano
Resistividad a 20°C, $\mu\Omega\text{cm}$	10,6	1,673	6,844	5,7
α , $\Omega/\Omega/\text{K}$	0,00385	0,0043	0,00681	0,003786
R_0 , Ω a 0°C	25, 50, 100, 200, 500...	10 (20°C)	50, 100, 120	100, 200, 500, 1000, 2000
Margen, °C	- 200 a + 850	- 200 a + 260	-80 a + 320	-200 a + 200

Tabla 2.2.2.12.3. Especificaciones de diversos detectores de temperatura resistivos.



Puede observarse que el níquel ofrece mayor sensibilidad, pero su margen lineal es menor que el del platino. Éste es el que ofrece mejores prestaciones, y la sonda de 100Ω , designada como Pt100, es uno de los sensores de temperatura más comunes.

La aplicación más inmediata de los detectores de temperatura resistivos es, obviamente, la medida de temperaturas. El empleo del platino con esta finalidad fue propuesto por W. Siemens en 1871. La sonda de platino ofrece una medida estable y exacta, hasta el punto de que se emplea como patrón entre las temperaturas de $-182,96^{\circ}\text{C}$ y $630,74^{\circ}\text{C}$. En aquellas aplicaciones donde puede resultar excesivamente caro, se prefieren el níquel o aleaciones de este.

2.2.2.12.4. Termistores

Los termistores son resistores variables con la temperatura, pero no están basados en conductores como las RTD, sino en semiconductores. Si su coeficiente de temperatura es negativo se denominan NTC (Negative Temperature Coefficient), mientras que si es positivo se denominan PTC (Positive Temperature Coefficient). Los símbolos respectivos son los de la Figura 2.2.2.12.4, donde el trazo horizontal en el extremo de la línea inclinada indica que se trata de una variación no lineal.



Figura 2.2.2.12.4. Símbolo para una resistencia con dependencia intrínseca de la temperatura y variación no lineal, con sensibilidad positiva o negativa.

El fundamento de los termistores está en la dependencia de la resistencia de los semiconductores con la temperatura, debida a la variación con esta del número de portadores.

Las aplicaciones de los termistores se pueden dividir entre las que están basadas en un calentamiento externo del termistor, que son todas las relativas a la medida, control y compensación de temperatura, y las que se basan en calentarlo mediante el propio circuito de medida. Están entre estas últimas las medidas de caudal, nivel y vacío (método Pirani) y el análisis de la composición de gases, todos ellos son casos en que varía la



conductividad térmica del medio alrededor del termistor, y también el control automático de volumen y potencia, la creación de retardos de tiempo y la supresión de transitorios.

En la Tabla 2.2.2.12.4 se resumen algunas características generales de los modelos de NTC más frecuentes.

<i>Parámetro</i>	
Margen de temperatura	- 100°C a 450°C (no en un mismo modelo)
Resistencia a 25°C	0,5 Ω a 100 MΩ (± 5% o ± 10%) 1 kΩ a 10 MΩ es lo habitual
<i>B</i>	2000 K a 5500 K
Temperatura máxima	> 125°C 300°C habitual en régimen permanente 600°C habitual en régimen intermitente
Coefficiente de disipación, δ	1 mW/K en aire en reposo 8 mW/K en aceite
Constante de tiempo térmica	1 ms a 22 s
Potencia disipable	1 mW a 1 W

Tabla 2.2.2.12.4. Características generales de los termistores NTC de uso más frecuente.

2.2.2.12.5. Higrómetros resistivos

La humedad es la cantidad de vapor de agua presente en un gas o de agua adsorbida o absorbida en un líquido o un sólido (en inglés, «moisture»). La masa de vapor de agua contenida en un volumen dado de gas (g/m³) se denomina humedad absoluta. Normalmente se mide la denominada humedad relativa que es la relación entre la presión parcial del vapor de agua presente y la necesaria para que hubiera saturación a una temperatura dada. Se expresa en tanto por ciento.

La mayoría de los aislantes eléctricos presentan un descenso de resistividad brusco (y un aumento de su constante dieléctrica), al aumentar su contenido de humedad. Si se mide la variación de su resistencia se tiene un higrómetro resistivo («humistor»). Si se mide la variación de capacidad, se tiene un higrómetro capacitivo.

La relación entre la humedad relativa y la resistencia es no lineal.

Como materiales se han empleado soluciones acuosas de una sal higroscópica (CaLi, F₂Ba, P₂O₅) depositadas sobre un sustrato plástico,



en forma de zigzag entre dos electrodos. Actualmente se dispone de elementos con la misma forma pero basados directamente en los cambios de resistividad del sustrato (un polímero), sin necesidad de película higroscópica, a base de tratar químicamente la superficie (Figura 2.2.2.12.5). Los higrómetros resistivos son más adecuados que los capacitivos cuando la humedad relativa es alta.

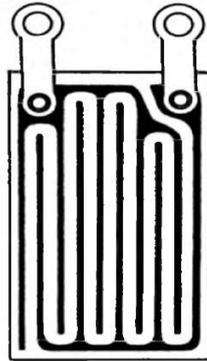


Figura 2.2.2.12.5. Disposición física del sensor

2.2.2.12.6. Sensores de tipo termoeléctrico (termopares)

Este sensor convierte un flujo de calor (diferencia de temperatura) en una diferencia de potencial.

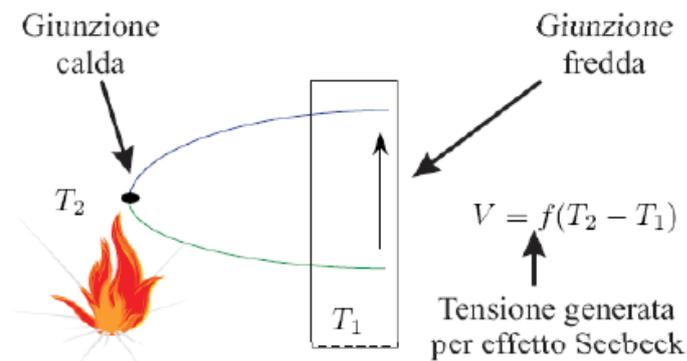


Figura 2.2.2.12.6.1. Funcionamiento termopar



El termopar es un sensor basado en una serie de efectos relativos a la relación entre la corriente eléctrica y la temperatura. De hecho, una variación de temperatura en un circuito eléctrico genera efectos termoeléctricos, estos pueden ser de tres tipos:

- Efecto Seebeck
- Efecto Peltier
- Efecto Thomson

El primero toma su nombre a partir del experimento realizado por el físico de Estonia Seebeck en 1821: la conexión de dos conductores diferentes si las dos uniones se encuentran a diferentes temperaturas, entonces luego en el circuito formado de esta manera y fluye corriente (similar que abrir el circuito en un punto y hay una diferencia de potencial que es la fuerza electromotriz).

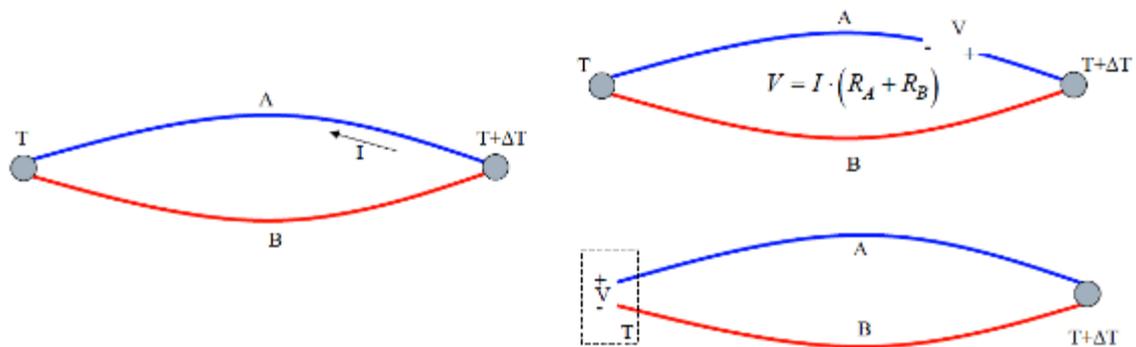


Figura 2.2.2.12.6.2. Efecto Seebeck.

El par de conductores se dice termopar y su corriente y la tensión son directamente proporcionales a la variación de temperatura que existe entre las dos uniones y no depende de la magnitud de los conductores. Este tipo de sensor se utiliza para medir la temperatura de dos guinzioni diferente, por que una esta a una temperatura de referencia (por ejemplo, 0 ° C), mientras que las otras mide la temperatura desconocida. De hecho, cuando se abre el circuito en cualquier punto se puede medir la diferencia de potencial (ver circuito en la parte inferior derecha de la figura apenas expuesto):

$$V=KDt$$

De la fórmula se conoce como excepto que una constante que depende de la temperatura, V es directamente proporcional a la diferencia de temperatura (ΔT). Finalmente este componente representa un sensor de



temperatura excelente, ya que no se disipa energía y crea una diferencia de potencial (V) sin tener un paso de la corriente, pero sólo al poner en contacto dos conductores diferentes que tienen diferente temperatura. El efecto Peltier se utiliza para el efecto termoeléctrico de calefacción / refrigeración, ya que tiene una dinámica opuesta diferente a la que el efecto Seebeck.

De hecho, teniendo en cuenta el termopar descrito anteriormente, ahora se desplaza la corriente en los dos conductores diferentes; esto genera el calentamiento de una unión y el enfriamiento de la otra. De hecho, cuando la corriente fluye en la misma dirección del efecto Seebeck, el calor es absorbido desde la unión más caliente y se libera de la más fría.

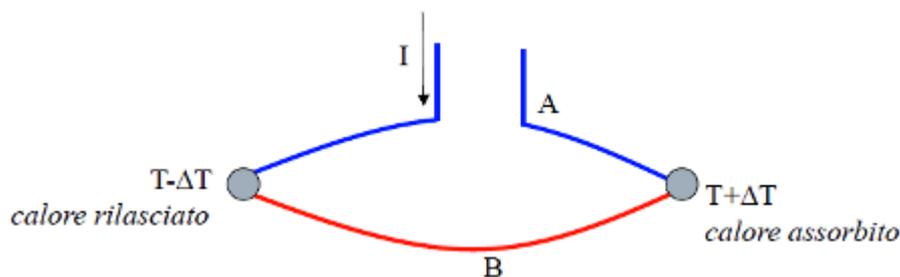


Figura 2.2.2.12.6.3. Efecto Peltier.

Cuantitativamente este efecto se define como el cambio de la cantidad de calor debido a una carga de un Coulomb que corre a través de la unión. Por último, este tipo de efecto se aplica en las células Peltier que permiten enfriar o calentar en un amplio rango de temperaturas. El efecto de Thomson se manifiesta como una asimetría en la distribución de la temperatura de un conductor homogéneo y es debida a la presencia de un gradiente térmico constante.

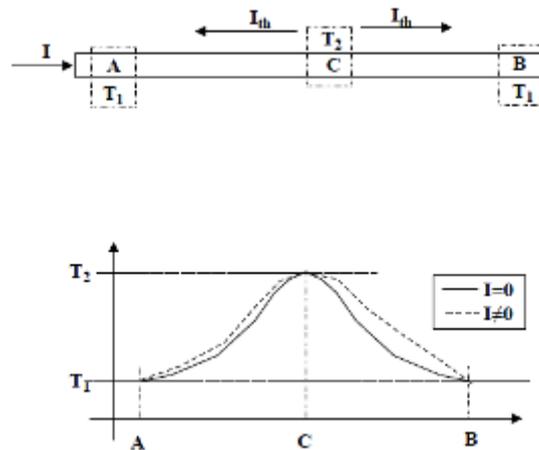


Figura 2.2.2.12.6.4. Efecto Thomson

[Jacob Fraden, “Handbook of modern sensors Physics, Designs, and Applications”]

2.2.2.12.7. Sensores de tipo capacitivo

Para un condensador con caras planas paralelas, la capacidad se aplica:

$$C_s = \varepsilon \frac{A}{d}$$

Donde ε es la constante dieléctrica, A es el área de las caras y la distancia entre las dos caras. El sensor capacitivo convierte la variación de la magnitud a medir en una variación de uno de estos parámetros.

El sensor capacitivo convierte la variación de la magnitud a medir en una variación de uno de estos parámetros:

- La variación de la geometría del sensor, por ejemplo, cambiando la posición relativa de las placas, obtendrá un sensor de posición
- Otra aplicación es para medir el nivel de líquidos. La constante dieléctrica entre dos electrodos sumergidos parcialmente en un líquido varía con el nivel del líquido.

[Secci, UniMore]



2.2.2.12.8. Sensores de tipo piezoeléctrico

Estos sensores se basan en el fenómeno físico por el cual algunos materiales cristalinos (por ejemplo, cuarzo) producen una diferencia de potencial eléctrico cuando se someten a una cierta presión.

2.2.2.12.9. Sensores para la adquisición de señales

Sensores para magnitudes mecánicas

- Posiciones: Potenciómetro, transformador lineal diferencial (LVDT), Resolver, codificadores.
- Velocidad: Tacogenerador
- Deformación, fuerza y presión: Medidor de deformación (extensómetro), célula de carga.
- Aceleración: Acelerómetros

Sensores de temperatura

- Termopar y RTD (termoresistencia)

Sensores de corriente

- Sensor de corriente aislada de efecto Hall

Sensores de proximidad

- Contacto Reed, de efecto Hall, inductivos, capacitivos, ultrasónicos, optoelectrónico.



2.2.3. TECNOLOGÍAS DE LOS SENSORES

2.2.3.1 FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un componente bien conocido, debido principalmente a su empleo en el campo de las telecomunicaciones. Algo menos conocido es su uso en el campo de los sensores: de hecho, el uso de componentes de fibra óptica es posible asociarlo con sensores de temperatura, tensión, aceleración, etc. Aunque el uso de estos sensores no es todavía ampliamente utilizado a nivel industrial, las ventajas que presentan, y el nivel avanzado de la industrialización de las herramientas disponibles en el mercado, hacen una alternativa viable y prometedora para los sensores convencionales, eléctricos y electromecánicos.

Los sensores de fibra óptica son de varios tipos, dependiendo del principio físico que explotan para transducir la cantidad que debe medirse en un decodificable señal óptica.

[www.studiotau.net/FBG%20Diagnostica%20Strutturale; 13_06_2014]

Estos sensores de fibra óptica ofrecen muchas ventajas sobre los métodos tradicionales: la cantidad y la calidad de los parámetros medibles, la posibilidad de realizar medidas a distancia y medidas automáticas, la insensibilidad a los campos magnéticos y a la corrosión, el pequeño tamaño y facilidad de instalación.

[Il monitoraggio di opere del genio civile tramite sensori a fibre ottiche; Ballerini, Inaudi, Casanova]

Estos sensores se pueden utilizar fácilmente para estudiar los mecanismos de la fatiga y la corrosión. En particular se pueden usar para caracterizar los estados de tensión y deformación de los materiales ensayados cerca del vértice de una camarilla o medir cualquier fenómeno de cierre de la misma camarilla.



2.2.3.1.1. Sensores FBG (Fiber Bragg Grating) y principio de funcionamiento

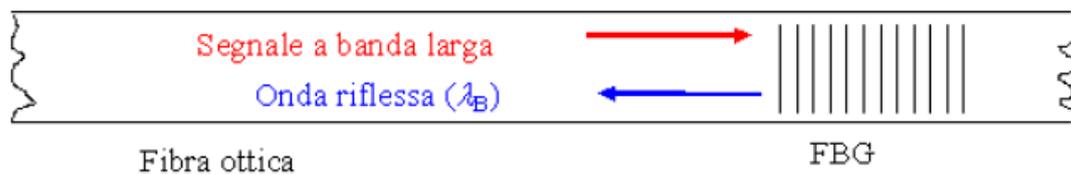


Figura 2.2.3.1.1. Principio de funcionamiento del sensor FBG

Los sensores de fibra óptica son particularmente atractivos en comparación con los sensores convencionales debido a que tienen varias ventajas. De hecho, puesto que son de vidrio, son químicamente y eléctricamente pasivos e inmunes a las interferencias electromagnéticas, también son pequeñas y transparentes. Particularmente interesantes son la FBG sensores (Fiber Bragg Grating). Ellos pueden ser embebidos dentro del material a ser supervisado que pegados en su superficie. De esta manera se puede obtener en tiempo real el seguimiento in situ del estado de deformación de una estructura. El sensor FBG es prácticamente un medidor de deformación óptica obtenido fotoincidiendo en el núcleo de fibra óptica por la rejilla de un material caracterizado por un índice de refracción diferente. Tal fotografado se lleva a cabo mediante la iluminación de la fibra óptica oblicuamente, a través de una máscara de fase adecuado, con un haz coherente de luz UV.

La consecuencia final es que el paso de un haz de luz de banda ancha a lo largo de la fibra, la rejilla de modo photoetched refleja una longitud de onda específica llamada "longitud de onda de Bragg" (λ_B) (ver Fig. 1). Cada deformación (strain) de la fibra crea un cambio de la longitud de onda correlacionada con la deformación. Se pueden medir con precisión las deformaciones de menos de 1 μ strain (1 micras por metro).

[“Impiego di sensori in fibra ottica per il monitoraggio di fratture statiche e dinamiche”; Felli, Brotzu]

2.2.3.1.2. Esquema o patrón de uso de los sensores FBG

Las partes componentes de un sistema de medición que utiliza los sensores FBG son esencialmente (Figura 2.2.3.1.2):

- la fibra óptica con los sensores FBG



- el cable de fibra óptica de conexión entre los sensores y la electrónica de control
- la electrónica de control
- un PC conectado a la electrónica de control a través de un cable, red local, Internet o un módem GSM.

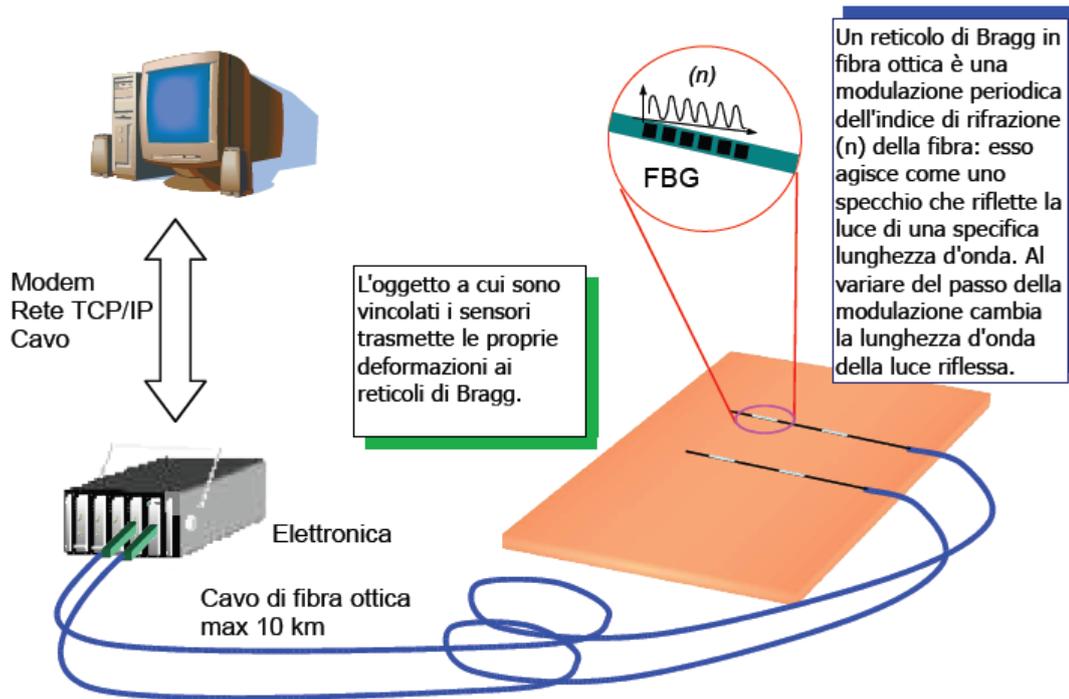


Figura 2.2.3.1.2. Diagrama del sistema de medición que emplean los sensores FBG.

Los sensores FBG se enlazan con el objeto a ser controlado de una manera tal como para reproducir los movimientos o deformaciones de su superficie: los cambios inducidos a la estructura de la red de Bragg están codificados en forma de variaciones de la longitud de onda, en la señal óptica que llega a la electrónica de control.

La electrónica decodifica la señal óptica y transmite los datos de medición a un PC, que proporciona la visualización y el almacenamiento de datos.



2.2.3.1.3. Ventajas del uso de sensores basados en la tecnología de la fibra óptica

Las ventajas de los sensores de fibra óptica basados en rejillas de Bragg, con respecto a los sensores tradicional eléctricos o mecánicos, son:

- Alta resolución, precisión y dinámica

Los sensores basados en redes de Bragg ofrecen alta resolución. Estos sensores pueden medir deformaciones mínimas ($\Delta\epsilon_{\min}$) igual a 1 microepsilon (1×10^{-6}). Cuando se utilizan como sensores de temperatura, la resolución de la

medición es de $0,1 \text{ } ^\circ \text{C}$. Ellos ofrecen un alto rango dinámico (capacidad de medir una cantidad física en una amplia gama de su variación con una cierta resolución) y alta precisión (es decir, la desviación máxima entre el valor medido y el valor real de la cantidad física)

- Inmunidad al ruido electromagnético

El sensor de fibra óptica FBG son intrínsecamente inmunes al ruido electromagnético: esta característica es debido al material de que están hechos de fibras ópticas, el vidrio: ser un material dieléctrico, los campos electromagnéticos no pueden obviamente inducir corrientes eléctricas en el mismo, como ocurre en la presencia de cables de cobre. Además, los campos electromagnéticos no pueden cambiar la luz que pasa a través de la fibra óptica.

Por lo tanto, los sensores de fibra óptica FBG pueden cruzar o ser colocados en ambientes con ruido electromagnético, por ejemplo debido a la maquinaria eléctrica, líneas eléctricas, antenas, etc.

- Estabilidad en el tiempo

El sensor de fibra óptica FBG se caracterizan por una alta estabilidad en el tiempo: esta característica está relacionada con el material que constituye la fibra óptica, el vidrio, que nunca "envejece ". Después de instalar los sensores FBG ellos operan por años sin sufrir las derivas habituales debido al envejecimiento de los materiales, a la corrosión, a la acción de las intemperias que sean objeto de los sensores electromecánicos tradicionales. Esta característica es especialmente importante en los casos en los que es necesario controlar las estructuras a largo plazo o permanentes a ser protegido por su alto valor artístico, arquitectónico, industrial o civil.



- Instalación a gran distancia

Los FBG sensores de fibra óptica pueden ser instalados a distancias del orden de decenas de kilómetros de la electrónica de control: esta característica está relacionada con la muy baja atenuación que las señales ópticas se someten durante su propagación a lo largo de la fibra óptica. Así que tanto las grandes estructuras tales como puentes, plantas industriales, torres, campanarios, iglesias, etc. se pueden controlar desde un único sistema centralizado que dirige sensores instalados incluso a gran distancia.

- Bajo intrusismo

Los sensores FBG constan esencialmente de una fibra óptica, cuyas dimensiones exteriores son muy pequeñas (diámetro de la fibra óptica = 250 micras): Esta función se puede aprovecharse plenamente cuando es necesario colocar los sensores en espacios muy pequeños o evitar la sobrecarga de las estructuras que son muy sensibles al peso del sensor. Un ejemplo es la necesidad de instalar sensores de tensión (galgas extensiométricas) en un fresco o un viejo lienzo.

- Transferencia de datos a través de la red y / o inalámbrica

La unidad de control electrónico está diseñada para interactuar con el control del PC a través de la tarjeta de red: de esta manera desde cualquier estación de trabajo conectada a la misma red, como Internet o una red local, puede establecer las mediciones, comprobar en tiempo real el funcionamiento de los sensores, descargar los datos capturados. En ausencia de la red, se puede conectar a la electrónica de forma remota a través del módulo GSM cuyo se instala un panel electrónico que controla la tarjeta de PC.

2.2.3.1.4. Aplicación de sensores de fibra óptica para la restauración del patrimonio arquitectónico

Un innovador campo de la aplicación de los sensores de fibra óptica FBG es la preservación del patrimonio arquitectónico. Las intervenciones de consolidación estructural de hecho, deberían basarse en un conocimiento preciso de las causas y la dinámica de la inestabilidad. Los sensores de fibra óptica son una herramienta de diagnóstico para el monitoreo de la salud estructural que ofrece una mejor resolución, flexibilidad de uso y menos intrusivo que los instrumentos tradicionales: estas características



se traducen en medidas y, por lo tanto, en las evaluaciones técnicas más precisas, menos tiempo y costes de investigación, en menor impacto en la obra de arte o de la estructura que se está analizando.

Los sensores de fibra óptica son transductores de deformación: dependiendo de cómo se aplica el sensor a la estructura y la banda de frecuencia en la que se adquiere la señal, tales sensores se actúan como indicador de tensión, inclinómetro o vibrómetro.

2.2.3.1.5. Ejemplo de aplicación: Frescos con grietas

La vida de los frescos está estrechamente relacionada con la estructura a la que se aplicaron: las inestabilidades de la estructura se manifiestan como grietas o separaciones que dañan el mismo fresco (Figura 2.2.3.1.5.1).



Figura 2.2.3.1.5.1. Grieta en las paredes verticales de unos frescos (casa privada).

El uso de un sistema de seguimiento de la grieta puede entonces solicitar la instalación de los sensores directamente en los frescos. Esto implica un daño inevitable para el fresco: Los sensores de fibra óptica FBG ofrecen pero la gran ventaja de que puede estar unido a el fresco con yeso de fraguado rápido o cal: estos materiales pueden, de hecho, ser retirados de el fresco al final de las mediciones sin dañarlo.

En la Figura 2.2.3.1.5.2 se muestra el esquema de fijación de un FBG sensor de fibra óptica en una hendidura.

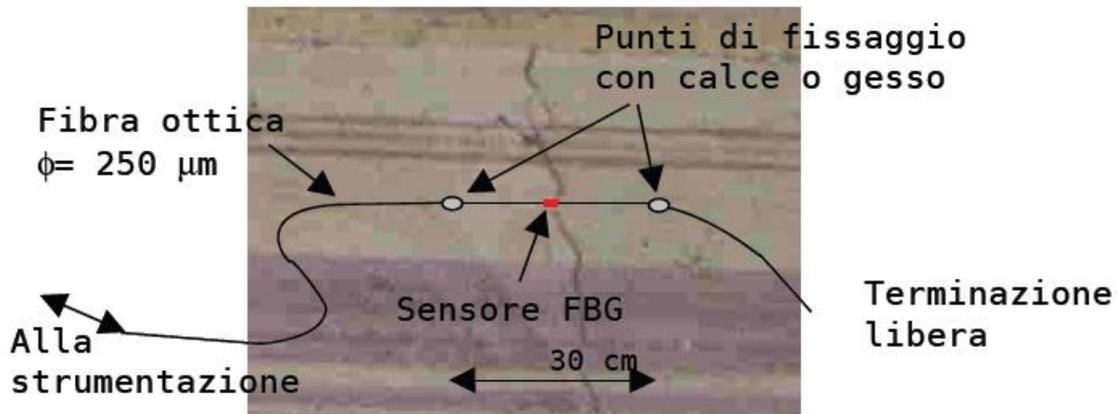


Figura 2.2.3.1.5.2. Diagrama de la unión de un sensor FBG en una hendidura.

Esta técnica de medición se puede aplicar a la condición de que la acción de tracción que se ejercida por los desplazamientos relativos de la pared o en el techo a los lados de la hendidura no conduce a la rotura de los puntos de fijación.

2.2.3.1.6. Monitorización de vibraciones

La estabilidad de los edificios viejos se puede deteriorar o ver comprometida por el efecto de esfuerzos externos debido a las actividades de diversos tipos. En los centros urbanos, la presencia del tráfico pesado (autobuses, tranvías, trenes, metro, etc.) en las inmediaciones de los edificios de interés histórico implica una tensión vibratoria periódica que se transmite a sus estructuras. Otro ejemplo es el movimiento de las campanas de los campanarios: la masa de la campana en movimiento genera una tensión periódica similar a una vibración de baja frecuencia que produce un momento de flexión a lo largo de la estructura.

La verificación del efecto real que las diversas tensiones producen sobre las estructuras requiere el uso de herramientas de alta resolución y con una respuesta de frecuencia apropiada (hasta cientos de hertzios): los sistemas de medición que emplean sensores de fibra óptica basados en celosías Bragg cumple estos requisitos.

En la figura 2.2.3.1.6 se muestra la medición de vibraciones que se realiza con sensores FBG montados sobre una estructura experimental en hormigón armado, subrayados por una mesa vibratoria para pruebas



sísmicas, llevadas a cabo en los laboratorios de ENEA Casaccia: el espectro de la tensión es del tipo "ruido blanco". La medida se expresa en longitud de onda. En este caso los sensores FBG se aplican directamente sobre la estructura. Alternativamente, es posible emplear transductores que emplean un sensor FBG como elemento de detección.

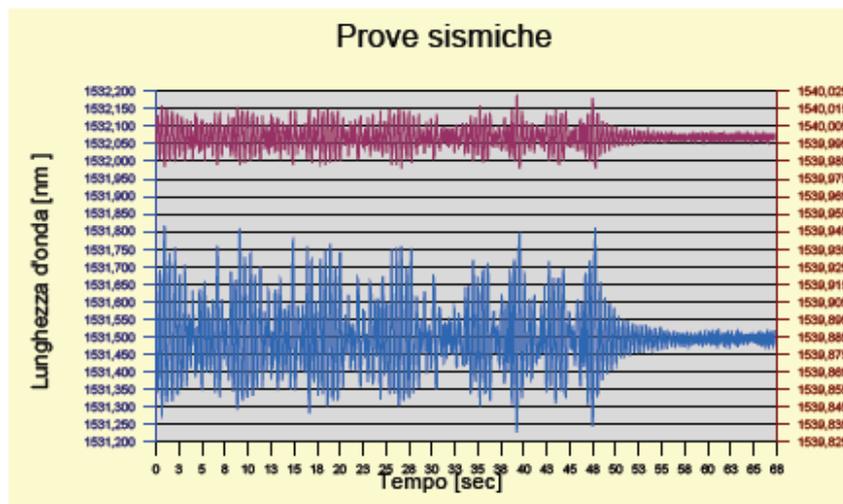


Figura 2.2.3.1.6. Arriba, las mediciones de las vibraciones inducidas en una estructura de hormigón en los laboratorios de ENEA Casaccia. Abajo en la gráfica, las dos pistas hacen referencia a dos sensores FBG en diferentes posiciones.

De la medición de las vibraciones de una estructura se puede derivar su característica dinámica: los modos normales y las frecuencias de vibración de la estructura constituyen la respuesta al estrés y una variación de estos parámetros indica la presencia de una modificación de la estructura.



2.2.3.1.7. Monitorización estructural

Los edificios antiguos suelen tener huecos de tamaño considerable, que rara vez saben la fuente y cuyo es necesaria para predecir la evolución de la fuente.

La cuestión fundamental que se plantea es si la lesión se ha estabilizado o si usted está aumentando continuamente su tamaño, una señal de que la causa de la falla estructural que se manifiesta con la ranura está todavía presente.

Los sensores de fibra óptica FBG se pueden instalar directamente en la ranura. En este caso actúan como fessurímetro (con la misma técnica de la propuesta de restricción para los frescos), o aplicados a los transductores, que consisten esencialmente en barras de metal de tamaño adecuado, que a su vez se fijan a la estructura con anclajes.



Figura 2.2.3.1.7. Hendidura en la pared exterior de una iglesia: el acceso a la zona requiere el uso de andamios o de elevación.

El uso de sensores FBG le permite colocar la unidad de control electrónico en un lugar fácilmente accesible, incluso a una distancia considerable de la ranura, evitando el uso repetido de equipos de



elevación o de protección para aquellos que llevan a cabo las mediciones. El mismo tipo de técnica se puede aplicar para el control de la estabilidad de las estructuras verticales, tales como paredes o columnas: el desplazamiento de la vertical (en este caso la función realizada es “metros fuera plomo”) se puede medir con transductores que emplean sensores FBG para leer las deformaciones que el desplazamiento de la vertical de una masa conocida produce en el brazo que soporta la masa en sí misma.

[www.studiotau.net/FBG%20Diagnostica%20Strutturale; 13_06_2014]

2.2.3.1.8. Ejemplo de aplicación de un sensor FBGE

A continuación se muestra un ejemplo de instalación de sensores FBG en un importante edificio histórico de Venecia, en particular, en el arco de acceso al Salón de Tintoretto en la Scuola Grande di San Rocco.

La ubicación del sensor instalado se muestra esquemáticamente en la Figura 2.2.3.1.8.1 (dorsal SR1, n. 1 sensor, que se caracteriza como "SR11).

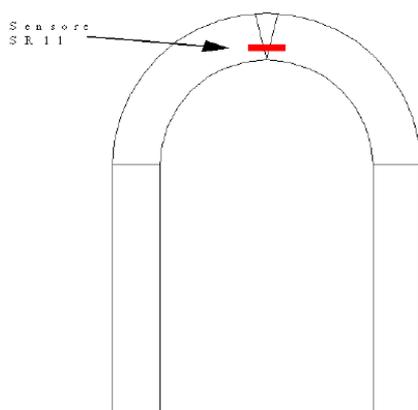


Figura 2.2.3.1.8.1. Posición de los sensores conectados en el SR1 dorsal.

El sensor se instaló en la azotea del arco, a caballo entre la grieta que se desarrolla en el interior del Salón de Tintoretto, en la dirección vertical, las figuras 2.2.3.1.8.2, 2.2.3.1.8.3 y 2.2.3.1.8.4.



Figura 2.2.3.1.8.2. Salón de Tintoretto, Gran Escuela de San Rocco. Sensor SR11 instalado para vigilar la grieta.



Figura 2.2.3.1.8.3. Salón de Tintoretto, Escuela de Gran Sanrocco. Terminación del SR1 dorsal, lado sensor SR11.



Figura 2.2.3.1.8.4. Salón de Tintoretto, Gran Escuela de San Rocco. SR11 sensor instalado para vigilar la grieta.

El sensor se instala en la configuración Strain Gage, con el fin de supervisar el tamaño de la grieta en la cornisa del arco dentro del Salón de Tintoretto. La instalación del sensor se hizo pegando todo el sensor en la cama adhesiva estructural Wishay AE10, con la posterior aplicación de protector Wishay M-CoatC Wishay y protector de silicona RTV-3145.

Después de la instalación del sensor, se realizó una prueba para verificar el correcto funcionamiento de la misma, haciendo una adquisición corta de la señal.

Las adquisiciones realizadas, que se muestra en la Figura 2.2.3.1.8.5 confirman el correcto funcionamiento.

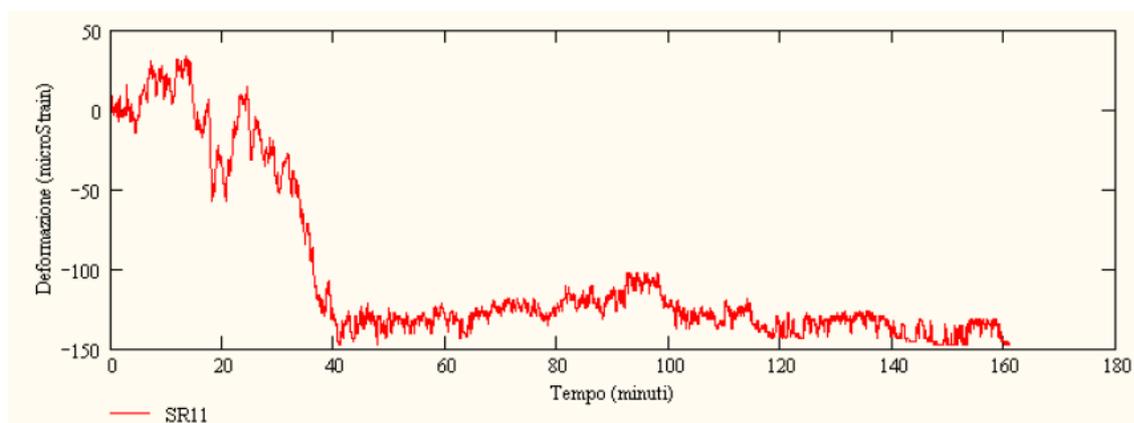


Figura 2.2.3.1.8.5. Verificación del correcto funcionamiento del sensor conectado en el SR1 dorsal, después de la instalación.



En el eje horizontal se puede leer el tiempo transcurrido de la inicio de la medición; en el eje vertical se puede leer la medición realizada por la unidad de control en el instante de tiempo correspondiente. Si la señal no cambia con el paso del tiempo, significa que la deformación de la estructura monitorizada no varía, y por lo tanto es mecánicamente imperturbable; si en vez varía, significa que la estructura se somete a, más o menos rápidamente, una deformación más o menos extensa. Si el valor de la señal aumenta (si "sube" la curva hacia arriba), la estructura monitorizada está sujeta a una elongación; si el valor de la señal disminuye (si la curva "cae" hacia abajo), la estructura monitorizada está sujeta a una contracción; si en un corto tiempo de intervalo de la señal aumenta y disminuye en repetidas ocasiones, la estructura monitorizada se somete a una vibración.

[“Impiego di sensori in fibra ottica per il monitoraggio di fratture statiche e dinamiche”; Felli, Brotzu].

2.2.3.2. DRAW WIRE

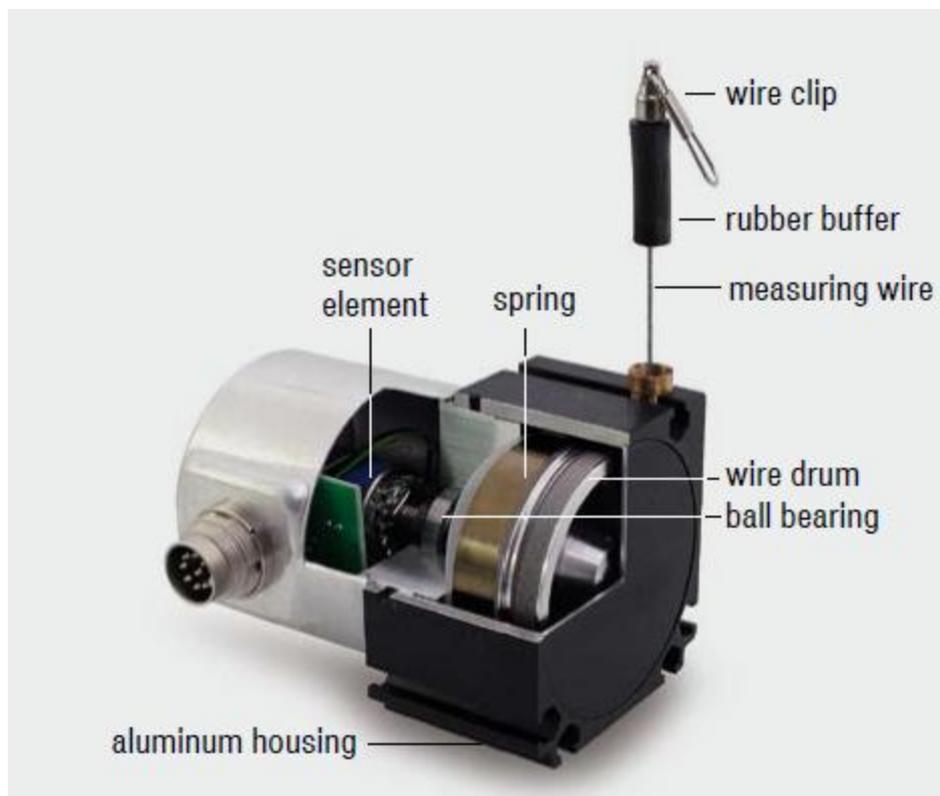


Figura 2.2.3.2. Esquema de un sensor Draw – wire.



Los sensores de desplazamiento Draw-wire miden los movimientos lineales usando un cable de acero altamente flexible. El tambor de cable está unido a un elemento sensor que proporciona una señal de salida proporcional. Las mediciones se realizan con alta precisión y alta respuesta dinámica, al tiempo que el uso de componentes de alta calidad garantiza una larga vida útil y alta fiabilidad de funcionamiento. Este tipo de sensores, habituales en laboratorios, requieren de una fuente de alimentación, batería, acondicionador de señal y equipo de adquisición de datos y control y transmisión hasta PC.

2.2.3.3. HILO VIBRANTE

La menor frecuencia de oscilación transversal de una cuerda o hilo tenso vibrante viene dada por:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{m}}$$

Donde l es su longitud, F la fuerza mecánica al que está sometido, y m la densidad longitudinal de masa (masa/longitud). Si la posición de uno de los extremos se hace variable mediante un soporte móvil, el periodo de oscilación es directamente proporcional al desplazamiento. Si se aplica una fuerza, la frecuencia de oscilación resultante es directamente proporcional. Para la medida de deformaciones, la relación deducida de la ecuación anterior es:

$$\varepsilon = \frac{4l^2 m}{EA} f^2$$

Siendo E el módulo de Young y A la sección transversal del hilo.

La frecuencia de oscilación se mide con un hilo de reluctancia variable, y cae dentro de la banda audible. Normalmente se dispone un sistema auto oscilante en el que la señal detectada es amplificada y realimentada a un excitador electromagnético. A veces el propio excitador actúa alternativamente como detector. Para que la frecuencia de oscilación no



dependa de las características eléctricas del excitador, el factor de calidad Q del resonador mecánico debe ser del orden de 1000 o superior.

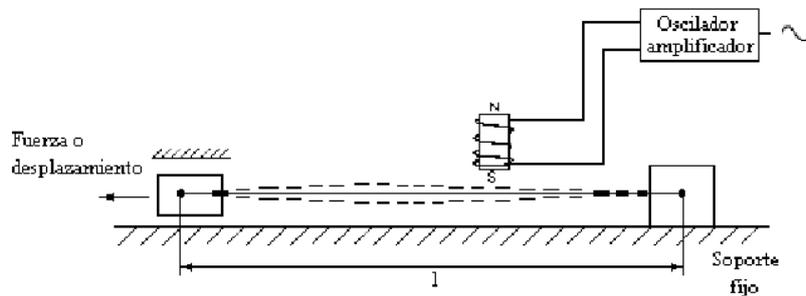


Figura 2.2.3.3. Sensor hilo vibrante

Dado que interesa que el hilo sea fino, se encierra en una cámara sellada para evitar los ataques químicos y el depósito de polvo en él, que afectaría su masa.

Basándose en este principio, se puede medir cualquier magnitud que provoque un cambio en I, F o m. De todas estas aplicaciones, una muy habitual es la medida de deformaciones. Su aplicación no requiere que se trate de un estado plano de deformación. Además, son insensibles a los cambios de resistencia de los hilos de conexión, debidos por ejemplo a los cambios de temperatura. Por otra parte, dado que ésta afectará a la longitud l del hilo sensor, falseando la medida, se puede determinar midiendo la resistencia eléctrica del hilo de la bobina, igual que en las RTD. Otras magnitudes que se pueden medir son: presión, fuerza, peso y masa.

Una variante del hilo o cuerda vibrante son las cintas vibrantes. Su menor frecuencia natural de oscilación longitudinal es:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\delta}}$$

Donde l es la longitud, E el módulo de Young y p la densidad. Se emplea, por ejemplo, para medir la masa de polvo depositado, es un sistema donde el excitador y el detector son ambos piezoeléctricos.



Un sistema algo distinto es el clásico diapasón, que se ha empleado también para medir pequeños cambios de masa, como los debidos a los depósitos de polvo. Si, en cambio, se sumerge en un líquido, la frecuencia de vibración depende de su densidad.



2.3. Sistemas de monitorización de acuerdo con la variable a monitorizar

2.3.1. VARIABLES DE ESPECIAL INTERÉS PARA LLEVAR A CABO SU MONITORIZACIÓN

Los materiales históricos y las estructuras históricas han estado bajo las influencias ambientales durante siglos o incluso milenios. Estas influencias inducen procesos de daño en los materiales que eventualmente llevan al estado de degradación de las estructuras de la construcción. Los efectos de la degradación pueden sumar y destruir el objeto tan valioso que una sociedad tiene el deber de conservarlo para las generaciones futuras.

Las influencias ambientales son múltiples y tienen su origen en los efectos físicos y químicos. Estos forman parte de la degradación por la luz, la lluvia, las sales, los gases agresivos y otros factores. Para evitar la degradación o la destrucción de objetos históricos, restauradores y conservadores tratan de conservar y proteger el objeto mediante la aplicación de tratamientos químicos y físicos y, en algunos casos, la reconstrucción de las partes perdidas. Para restauradores y conservadores es de gran importancia para conocer y comprender los principales factores responsables de los daños.

2.3.1.1. TEMPERATURA, HUMEDAD Y DATOS METEOROLÓGICOS

La temperatura y la humedad, entre otros parámetros que influyen en las condiciones ambientales interiores y exteriores de la estructura, son los factores más importantes, no sólo con respecto a los procesos de daño, sino también con respecto a otros valores de medición que son de interés, por ejemplo, la tensión, el estrés, la formación de grietas y muchos otros. Hay varios sensores analógicos estándar comercial y MEMS basados en temperatura y humedad disponibles que se ajustan a los requisitos para la vigilancia de la salud estructural.

También los sensores infrarrojos sin contacto han demostrado su aplicabilidad para medir la temperatura con una precisión suficiente en superficies sin siquiera tocar el objeto. Por lo tanto, es hasta que el usuario elija un sensor conveniente. Esto es válido también para la adquisición de datos meteorológicos para los cuales se puede utilizar una gran cantidad de sensores comerciales.



2.3.1.2. VELOCIDAD DEL VIENTO Y BAJAS VELOCIDADES DEL AIRE

Mediciones de viento y la velocidad del aire son de interés si el flujo de aire puede tener un impacto en los procesos de daño. Estos pueden incluir, posiblemente, el transporte de la humedad, calor, polvo o incluso el deterioro causado por la presión directa o abrasión (por ejemplo, en combinación con pequeños granos de arena, etc).

Si velocidades de aire son motivo de preocupación, hay que distinguir entre las mediciones internas y externas, porque en los dos entornos de velocidades de aire son muy diferentes.

Para mediciones exteriores, una gran cantidad de sensores meteorológicos (anemómetros para el viento) están comercialmente disponibles para controlar la velocidad y dirección del viento con la precisión adecuada. Los sensores para mediciones en interiores tienen que ser mucho más sensible, es decir, las sensibilidades de hasta 0,1 m/s o incluso más bajos son de interés. Para ello, se utilizan principalmente película caliente o anemómetros de hilo caliente, donde una corriente eléctrica aumenta la temperatura de un resistor. El aire que fluye provoca una reducción de esta temperatura.

El efecto de enfriamiento es directamente proporcional al caudal másico y, por consiguiente a una velocidad de aire e inversamente proporcional a la temperatura del aire. En el equilibrio, la temperatura de la superficie del sensor es la medida de flujo de masa. La sensibilidad de un sensor de velocidad del aire está fuertemente relacionada con la diferencia entre la temperatura del elemento de calefacción y el aire que fluye. Se ha de señalar que la colocación del sensor es un aspecto importante con respecto a la consecución de datos correctos y útiles. Por lo tanto, el conocimiento de la construcción de la física es obligatorio.

2.3.1.3. LA HUMEDAD Y LAS SALES

Mientras que las técnicas y los sensores están disponibles de manera suficiente para la medición de temperatura del aire y la humedad relativa, la determinación del contenido de humedad de un material es altamente compleja. Todos los materiales porosos contienen diversas cantidades de humedad en función de su composición química específica y porosidad y su exposición al medio ambiente circundante.

Una gran cantidad de materiales de construcción como piedra natural, madera, morteros, etc son higroscópicas. Higroscopicidad es la capacidad



de una sustancia para atraer a las moléculas de agua del ambiente circundante. El contenido de humedad de un material higroscópico depende tanto de la humedad relativa y la temperatura y representa la cantidad constante de agua alcanzado por los procesos de adsorción o desorción en condiciones ambientales dadas. Por lo tanto, también se le llama contenido de humedad de aire seco. Una gran cantidad de intentos se han hecho para controlar el contenido de humedad de equilibrio mediante la medición de la humedad relativa en pozos de sondeo.

Aunque tales mediciones pueden dar alguna indicación de humedad del material y el cambio de humedad con el tiempo, la determinación de la humedad absoluta por este método puede ser una fuente de errores graves, porque el contenido de humedad de equilibrio depende fuertemente de sustancias higroscópicas tales como sales en el interior del material. La determinación del contenido de humedad se hace aún más compleja si se refiere a la gama sobrehigroscópicas. En hay un exceso de humedad higroscópica, (o capilar) libre de humedad adicional llena los poros del material. El contenido de humedad libre puede variar significativamente entre diferentes materiales debido a su diferente permeabilidad y porosidad y capacidades, por tanto, que transportan la humedad, así como diferentes contenidos de sal.

Hay algunas tecnologías de sensores disponibles para la determinación continua del contenido de humedad que se basa en el principio de medición resistiva o capacitiva. Sin embargo, todavía es difícil de calcular el contenido de humedad de las lecturas de medidor de humedad eléctrica, porque incluso cantidades muy pequeñas de sales pueden causar altos cambios en las propiedades eléctricas y la temperatura también juega un papel importante. Debido al hecho de que las mediciones de resistencia también pueden sufrir de los efectos de los electrodos, las mediciones de impedancia de corriente alterna utilizan para la caracterización de los procesos de transporte de humedad y sal, es decir, la impedancia eléctrica de un material describe su resistencia dependiente de la frecuencia de la corriente alterna.

La impedancia puede ser medida por el uso de electrodos incrustados en pequeñas perforaciones. Cuando una solución de sal entra en el espacio entre los electrodos, se incrementa la cantidad de electrones libres que están disponibles para la transferencia de carga y por lo tanto la impedancia se reduce. La velocidad de disminución depende de la cantidad de agua y la concentración de sal en el agua. Ambos parámetros influyen en la parte real e imaginaria de la impedancia de una manera



diferente. Por lo tanto, la medición de las dos partes permite conclusiones acerca de la humedad y la concentración total de sal en el material ensayado. Sin embargo, se debe prestar especial atención a la correcta interpretación de los datos medidos, ya que se necesita aún más investigación para entender completamente toda la complejidad. La participación de un experto es esencial.

2.3.1.4. LA TENSIÓN, EL ESTRÉS, LA DEFORMACIÓN Y LOS DESPLAZAMIENTOS

Un gran número de medidores de deformación son convencionales en el uso práctico para medir la tensión y el estrés bajo cargas estáticas o dinámicas. La corriente de medidores de deformación es pequeña y por lo tanto el consumo de energía es de sólo unos pocos milivatios para que medidores de tensión se pueden utilizar con los sistemas de monitoreo inalámbrico, también. Preferiblemente, medidores con alta resistividad se deben utilizar para reducir el consumo de energía. Sin embargo, la fluencia y la durabilidad de los medidores de tensión y de los adhesivos utilizados para aplicarlos a la estructura a menudo puede causar problemas, si uno mide por períodos de tiempo largos.

La compensación de temperatura se debe aplicar a todos los indicadores, si los valores de tensión absolutos deben ser obtenidos. De película delgada extensómetros resistivos son soluciones populares para la mayoría de los requisitos de laboratorio y pruebas de campo. Están disponibles comercialmente con diversas resistencias nominales y con longitudes de calibre típicas entre 0,6 y 150 mm. En aplicaciones de monitorización estructural, extensómetros resistivos requieren un cuidado especial en la prestación de una unión duradera sensor al elemento bajo condiciones de prueba y para proporcionar una protección adecuada tanto para el sensor y los cables de conexión.

Las fuentes de error comunes son cambios a largo plazo en la resistencia parásita de los cables y de la resistencia de contacto de los conectores. Por esta razón, los cables muy cortos y la calidad de soldado o el tornillo de alta conexiones de terminales son preferibles. Para el seguimiento de los cambios de tensión en los materiales que se someten a craqueo cuando tensada, como el hormigón armado típicamente, calibre longitudes más largo que el máximo de 150 mm de galgas resistivas son a veces necesarias.



La medición de distancias y desplazamientos es una necesidad frecuente en aplicaciones de monitoreo estructurales que tienen que ver con los asentamientos, los problemas de cimentación e inestabilidades geológicas. Medidores de distancia ópticos se consideran muy atractivo para este tipo de aplicaciones, especialmente cuando las condiciones de instalación prácticos traer limitaciones a la accesibilidad de los puntos de aforo, cuando las longitudes muy largas de calibre están implicados, o cuando las restricciones de conservación no permiten el uso de sensores de desplazamiento de contacto de la sonda.

Los transductores de desplazamiento también se utilizan para la monitorización de aperturas de grietas.

2.3.1.5. INCLINACIÓN

Los sensores de inclinación son ampliamente utilizados para el monitoreo estructural y geológico para evaluar los asentamientos del suelo de tierra a través de la detección de cambios en la inclinación de desplazamiento de los edificios altos, pendientes y otros factores.

En particular, en sinergia con sensores de deformación y el desplazamiento, sensores de inclinación pueden ser utilizados para optimizar la eficacia de la vigilancia de la salud estructural mediante la explotación de las correlaciones entre los diferentes datos recogidos. Correlaciones de detección puede ser, de hecho, extremadamente útil en las anomalías de mapeo en el comportamiento estructural, lo que permite la identificación de sus causas concurrentes.

En una aplicación de monitorización estructural típica, los cambios de inclinación se pueden correlacionar con eficacia a los desplazamientos y asentamientos de crack. Las actuaciones de diseño del inclinómetro integrado tanto, deben armonizarse con las actuaciones típicas de otros sensores de desplazamiento que el dispositivo puede acomodar.

2.3.1.6. VIBRACIÓN

La mayoría de las estructuras históricas son bastante resistentes a las vibraciones procedentes del suelo. Aunque el daño es posible, por ejemplo en forma de grietas, daños causados por la vibración es raro. Hay varias normas relacionadas a la vibración efectos en edificios como la norma alemana DIN 4150 o la norma británica BS 7385, así como las directrices como RI-8507, publicado en 1980 por el US Bureau of Mines.



Pero estas normas dan sólo los niveles indicativos de las vibraciones por encima del cual las estructuras del edificio podrían resultar dañadas. En cuanto a las estructuras históricas, límites más bajos pueden ser sugeridos, porque incluso las grietas que se representan a ser de sólo la naturaleza cosmética (por ejemplo, formación de grietas en la escayola, etc) deben ser evitados.

En cuanto al análisis de vibraciones, las especificaciones de los sensores que se utilizarán fuertemente dependen del tipo y tamaño de la estructura monitorizada. Para estructuras muy rígidas, un ancho de banda de 0,1 a 20 Hz es de importancia y de partículas velocidades dentro de un rango de 1 a 50 mm/s son de interés.

Si sólo se analizan las partes estructurales como vigas, modos propios son por lo general en un rango de frecuencias más alta y los anchos de banda de interés será de hasta 500 Hz en algunos casos.

La aceleración, la velocidad y la sensibilidad dependen de estas frecuencias, por lo que el uso de un tipo de sensor para todos los fines no es apropiado. Mientras tanto, MEMS sensores con las especificaciones requeridas están disponibles comercialmente y que éstos permitan el seguimiento a largo plazo rentable.

2.3.2. VARIANTES DE LA MONITORIZACIÓN: DOS CARAS DE LA MISMA MONEDA

2.3.2.1. CONTROL MANUAL DE LA VARIABLE MONITORIZADA

La monitorización manual consiste en la colocación de una serie de referencias que se fijan a las zonas de la estructura a estudiar para su lectura manual mediante equipamiento portátil. En función del riesgo existente, la evolución de los daños, el objetivo de la auscultación y de los recursos disponibles, el periodo de medida puede variar entre un máximo de tres meses y el mínimo que se desee, incluso con periodicidad diaria en situaciones de posible riesgo estructural.

2.3.2.2. CONTROL REMOTO DE LA VARIABLE MONITORIZADA

Como alternativa a la monitorización manual es posible la realización de una monitorización remota. Los datos que se obtienen con este sistema son mucho más numerosos y con mayor precisión. El estándar de



medida habitual incluye el registro de datos dos veces al día durante el periodo de medición, de tal manera que resulta factible efectuar un seguimiento de mayor calidad, discriminando además los posibles efectos por la variación de temperatura en una misma jornada. Así, al final del periodo de seguimiento, existen datos continuos, que incluso, en aquellos casos en que sea de aplicación, pueden relacionarse fácilmente con las fases de ejecución de obras. De esta forma, podría valorarse en el comportamiento estructural la incidencia inmediata de la colocación de nuevas cubiertas, refuerzos, excavaciones, aperturas de huecos, etc.

2.3.3. INSTRUMENTACIÓN EXISTENTE

2.3.3.1. MONITORIZACIÓN MANUAL

2.3.3.1.1. Testigos de fisuración

Los testigos de fisuración se emplean como sustitutos de los tradicionales fisurómetros (reglas graduadas fijadas a ambos lados de las fisuras a controlar). Consisten en dos dados de aluminio con un alojamiento troncocónico fijados mediante adhesivo a ambos lados de las fisuras, en los puntos de control que se establezcan. Por este motivo debe de eliminarse puntualmente el revoco o el enlucido a ambos lados de la fisura en los puntos en los cuales se proceda a su instalación. Con posterioridad, y una vez endurecido el adhesivo, se procederá a la lectura de la separación entre los mismos mediante calibre adaptado.

2.3.3.1.2. Referencias de control de desplazamientos angulares

Las referencias de control de desplazamientos angulares consisten en placas, habitualmente metálicas, que se fijan a los paramentos verticales objeto de estudio mediante un mortero de retracción compensada. Con posterioridad y una vez endurecido el mortero empleado como adhesivo, se procede a su lectura mediante un equipo denominado Tilt meter, con la sensibilidad de arco correspondiente, con objeto de detectar variaciones en la inclinación de los mismos. Al igual que las referencias de fisuración, requiere la eliminación de enlucidos o de revestimientos en mal estado que pudieran provocar su desprendimiento.

2.3.3.1.3. Cintas de convergencia

Las referencias para la medición de la variación relativa de la distancia entre muros mediante cinta métrica indeformable, son dos argollas metálicas fijadas a los paramentos a controlar mediante resinas. Una vez



endurecida la resina procederá a la lectura de la distancia relativa entre los paramentos controlados mediante cinta métrica indeformable.

2.3.3.1.4. Referencias de nivelación

Para monitorizar los posibles movimientos verticales que pueda sufrir la estructura, se puede realizar una nivelación de precisión de varios puntos. Para ello se fijaran una serie de referencias, manteniendo al menos dos referencias en puntos considerados fijos, fuera del área de influencia de movimientos verticales.

2.3.3.1.5. Inclínómetros

Para conocer posibles movimientos en el subsuelo se instalan tubos ranurados en sondeos previamente ejecutados, con las ranuras ubicadas cada 90° en sección transversal. Ello permite introducir en el tubo un torpedo inclinométrico que detecta la inclinación del tubo en las direcciones ortogonales a diferente profundidad. Con esta técnica se pueden conocer las deformaciones en profundidad en el terreno, hecho especialmente interesante cuando pudieran existir patologías asociadas a movimientos del terreno o bien se prevén excavaciones en zonas cercanas.

2.3.3.1.6. Condiciones ambientales

En los momentos de realizar las mediciones es necesario proceder al menos al registro de temperatura y humedad, para poder analizar posteriormente los datos de las lecturas en consonancia con las variaciones ambientales.



2.3.3.2. MONITORIZACIÓN REMOTA

2.3.3.2.1. Acelerómetros

2.3.3.2.1.1. Introducción a los acelerómetros

En la mayoría de los acelerómetros del principio de funcionamiento es el mismo: una pequeña masa (masa de prueba, dijo, masa de prueba, o una muestra de masa) se lleva a cabo gracias a la suspensión de un elemento elástico y de alguna manera que se detecta el desplazamiento actúa cuando una fuerza en ella. En la presencia de acelerar la masa se mueve desde su posición de reposo por una cantidad proporcional a la aceleración detectada, la variación de su posición es convertida en una apropiada señal eléctrica que contiene la información relativa a la cantidad física medida. El sistema está equipado con un elemento de amortiguación para reducir las fluctuaciones de la masa.

Lo que se obtiene es un "clásico" de la mecánica conocidas como sistema masa-resorte-amortiguador (MMS).

2.3.3.2.1.2. Sistema masa – resorte amortiguador

Considere un sistema formado por una masa de MMS Prueba de masa m , un muelle de constante de muelle k , que constituye el elemento elástico se aplica a la masa, y un amortiguador con fricción constante (viscoso) B , tales fricción es normalmente debido a que el aire u otro fluido. Se aplica una fuerza a la masa $F_{ext} = m * a$, donde a es la aceleración experimentada por la masa. En la Figura 2.3.3.2.1.2 se muestra la configuración mecánica del sistema se acaba de describir, que en cualquier caso se mantiene una aproximación en comparación con el funcionamiento real de un acelerómetro.

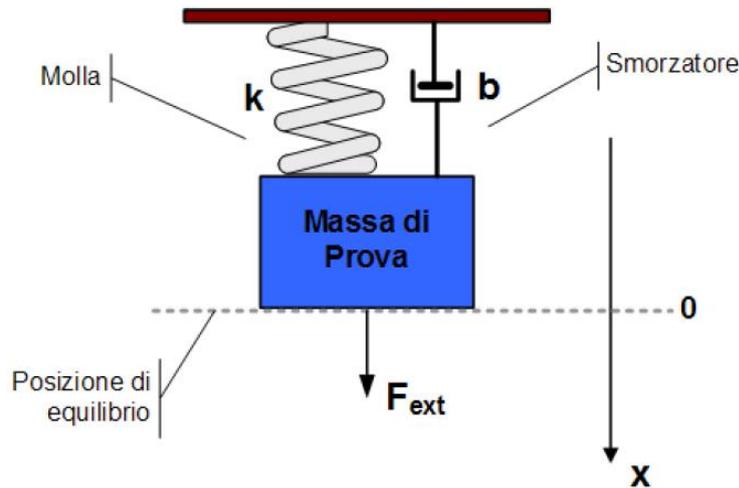


Figura 2.3.3.2.1.2. Esquema del sistema masa – resorte amortiguador.

El comportamiento del sistema parece ser de segundo orden. La ecuación que relaciona la fuerza F_{ext} , y por lo tanto la aceleración aplicada a la masa m , con el desplazamiento x , desde la posición de equilibrio de la misma es la siguiente:

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + b \frac{\partial x}{\partial t} + kx = F_{ext} = ma$$

Donde k es la constante elástica del resorte y b es la constante de la fricción del amortiguador. Dividiendo todo por m obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \frac{\omega_n}{Q} \frac{\partial x}{\partial t} + \omega_n^2 = a$$

Cuando se han definido los parámetros:



$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Pulsazione di risonanza}$$

$$Q = \frac{\omega_n m}{b} \quad \text{Fattore di qualità}$$

2.3.3.2.1.2. Técnicas para la diferenciación y la integración

En principio, es posible determinar la velocidad y la aceleración instantánea diferenciando electrónicamente la salida de los transductores de posición: la primera derivada de la velocidad y produce la segunda derivada de la aceleración. En realidad, un proceso de diferenciación acentúa los pequeños no linealidades, los errores de medición y los ruidos presentes en el pistoletazo de salida, y si esto puede producir un grado aceptable de precisión para la primera derivada, una mayor diferenciación implicaría errores demasiado grandes.

A partir de la aceleración, sin embargo, a través de una técnica de la doble integración se puede remontar a la velocidad y la posición. En este caso, desde un integrador electrónico es también un filtro de paso bajo, el ruido de alta frecuencia presente en la señal original se atenúan, pero el uso de un bloque de este tipo puede ser crítico para señales aperiódicas donde la presencia de un puerto componente de CC salida de amplificación hasta la saturación.

2.3.3.2.1.3. Clasificación y tipos de acelerómetros

Casi todos los tipos de acelerómetros utilizan el principio físico que acabamos de discutir, sin embargo, difieren de la forma en que se genera la medida de la desviación de la masa de prueba una señal eléctrica proporcional a la aceleración.

Se pueden dividir en varias categorías:

- Acelerómetros para medidas de aceleración estática: son capaces de detectar aceleraciones continuas y estáticas (0 Hz de frecuencia), tales como la aceleración de la gravedad. En general el ancho de banda de este tipo de sensores no exceda de 500 Hz, también se puede utilizar como sensores de inclinación (sensores de inclinación). Para esta categoría pertenece el sensor capacitivo ADXL330.



- Acelerómetros para medidas de aceleración dinámica: no son capaces de detectar la aceleración estática, pero sólo aceleraciones que pueden variar en el tiempo, tales como los generados por golpes o vibraciones. El ancho de banda de estos sensores es a través de y entre unas pocas decenas de Hz a decenas de kHz. Sensores de este tipo son por ejemplo los realizados con tecnología piezoeléctrica.

Los acelerómetros también se pueden clasificar de acuerdo a su sensibilidad, el rango de medición $N * g$ y la aplicación para la que están destinados. A continuación se muestra una clasificación propuesta basado en el mecanismo de transducción (tipos de acelerómetros comúnmente utilizados), se omite acelerómetro capacitivo que se tratará por separado:

- Acelerómetro del calibrador de tensión (resistiva): utiliza el mismo principio que de un estensímetro, la masa está físicamente conectado a los calibradores de tensión, la desviación de la masa de la posición de equilibrio provoca un alargamiento del sensor del calibrador de tensión, entonces un cambio de su resistencia. Los sensores se caracterizan por una baja sensibilidad, exactitud reducida y están fuertemente influenciadas por la temperatura. Su campo de aplicación se limita a la medición de aceleraciones estáticas.

- Acelerómetro LVDT (Transformador Diferencial Variable Lineal): masa constituye el núcleo ferromagnético del sensor LVDT, alrededor del núcleo hay bobinas para la detección de la posición de la masa, un circuito eléctrico especial es responsable de generar una señal eléctrica apropiada. Este sensor también trabaja para medir la aceleración estática.

- Acelerómetro piezoeléctrico: como un principio para la detección del desplazamiento de la masa explota las propiedades de un cristal piezoeléctrico, que genera una señal eléctrica cuando se someten a compresión. La masa se suspende en el cristal, que también se utiliza como elemento elástico. En la presencia de una aceleración del cristal es comprimido y genera una señal eléctrica proporcional a la compresión. Los sensores no se pueden utilizar para medir aceleraciones estáticas, de hecho, el cuarzo genera una señal sólo en el momento de la compresión (cambios de aceleración), mientras que la señal es cero si la aceleración aplicada a la masa interna es constante. Los cristales elásticos de costes utilizados no son altos, entonces los sensores de este tipo no son adecuados para detectar aceleraciones ligeras. Ellos tienen una sensibilidad relativamente baja, sin embargo, tiene una muy alta gama



(varios cientos de gramos), que los hace útiles para la medición de grandes choques. El acelerómetro piezoeléctrico pertenece a la categoría de los sensores activos.

- **Acelerómetro térmico:** la masa está constituida por un gas que es calentado por un elemento de calentamiento. El gas está encerrado en una cavidad equipado con sensores térmicos (termo - pila). La aceleración provoca un desplazamiento de la burbuja de gas caliente (ver las leyes sobre calor por convección) que es detectado por sensores térmicos. Estos acelerómetros, MEMSIC, pertenecen a la categoría de "micro - mecanizados acelerómetros" y tienen muchas ventajas, incluyendo la resistencia a los choques y menos desgaste con el tiempo, debido al hecho de que no hay partes mecánicas en movimiento en el interior del dispositivo.
- **Acelerómetro láser:** Este tipo de acelerómetro se utiliza para hacer mediciones de alta precisión, de hecho, sobre la base de sensores ópticos son altamente inmune al ruido y tienen un comportamiento muy lineal. A diferencia de los acelerómetros se discutió anteriormente, el láser acelerómetro no utiliza el principio de la masa de la prueba: usando un interferómetro láser se mide momento a momento, la distancia del objeto en movimiento y se hace a través de un ordenador, la segunda derivada con respecto al tiempo (para las mediciones de reloj atómico más preciso se utiliza para la referencia de tiempo).

2.3.3.2.1.4. Parámetros característicos de un acelerómetro

A continuación vamos a discutir los parámetros típicos que caracterizan a un análogo acelerómetro incorporado. Los parámetros que se analizarán se encuentran en las hojas de datos publicados por los fabricantes para caracterizar el sensor y su rendimiento.

- **Rango de medición:** define el rango de aceleraciones medidas utilizando el sensor que proporciona una señal de salida lineal. Se expresa normalmente utilizando las unidades de medida g y el rango es simétrico, el tipo 3G, la aceleración máxima medida, en la forma, está estrechamente relacionado con la deflexión máxima que puede tener la masa en el interior del dispositivo. Por lo general, sin embargo, se refiere a la aceleración máxima medida sin distorsiones debidas a la no linealidad, esta aceleración es igual al extremo superior de la gama de medición, tales como 3G (la desviación de la masa es máxima). Más allá



de este valor hay un error de linealidad (Figura 2.3.3.2.1.4.1).

También hay que observar que la aceleración máxima medible no tiene nada que ver con la aceleración máxima soportable por el sensor: éste, de hecho, se refiere a la tensión a partir del cual es la ruptura del dispositivo físico, y se indica normalmente en una tabla llamada "Clasificación de máximos absolutos".

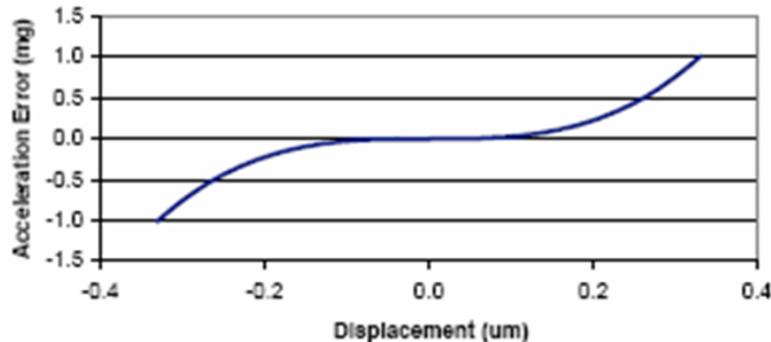


Figura 2.3.3.2.1.4.1. Desviación de la linealidad en todo el rango de medición.

El eje x representa la desviación de la masa de la posición central.

- Factor de escala (sensibilidad): se define como la relación entre la variación de señal de salida y la variación relativa de la entrada de la aceleración. Por lo general se expresa en $m * V / g$, define el factor de escala de la línea recta que es la característica de entrada-salida trans ideal del dispositivo:

$$Sensitivity = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta g}$$

La sensibilidad se puede calcular, en el caso particular en el que se sabe los valores de la tensión de salida correspondiente a las aceleraciones - G y G, de la siguiente manera:

$$Sensitivity = \frac{V_{out,+1g} - V_{out,-1g}}{2g}$$

Los voltajes $V_{out,+1g}$ y $V_{out,-1g}$ se pueden medir mediante la colocación del acelerómetro con el eje de referencia orientados



respectivamente hacia arriba y hacia abajo a lo largo de la dirección en la que actúa la aceleración de la gravedad.

La sensibilidad es por lo general la fecha entre un valor mínimo y un máximo. La tensión de alimentación generalmente causará una variación de la sensibilidad (en la hoja de datos se muestra el texto "radiométrico", para indicar la dependencia de la tensión de alimentación), por ejemplo, una duplicación de la tensión provoca una duplicación de la sensibilidad, un viceversa reducir a la mitad. Por último hay que señalar que la temperatura afecta a la sensibilidad, la desviación del valor nominal se expresa en % / ° C.

- No linealidad: define la desviación de la linealidad del ideal característica (recta) identificado por el factor de escala y se da como un porcentaje de la escala completa, o con respecto a la gama de la escala completa. En acelerómetros MEMS asume valores muy bajos (por ejemplo, para el ADXL330 es el 0,3 % del fondo de escala) y en muchas aplicaciones, su influencia puede ser descuidado. En la figura 2.3.3.2.1.4.2 es un gráfico que muestra un ejemplo de desviación de la linealidad para un acelerómetro (Figura sólo ilustrativos): la línea gris indica la característica ideal, el negro una posible tendencia en el sector (no lineal).

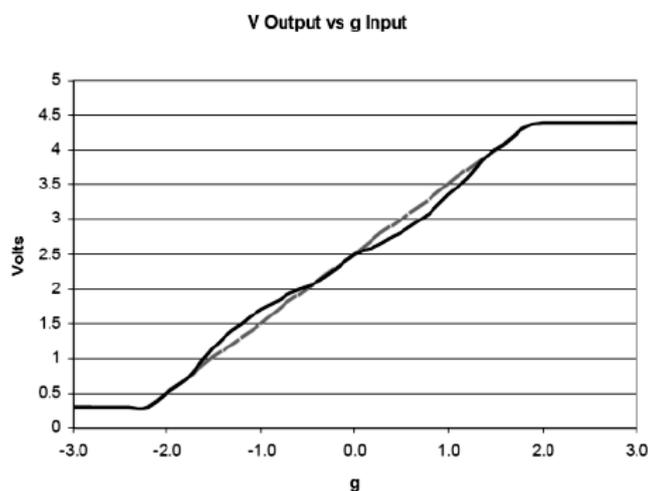


Figura 2.3.3.2.1.4.2. Desviación de la linealidad.

- Ancho de banda: define el ancho de banda de la señal de salida, asociado con la banda de la tensión aplicada al sensor. Representa la frecuencia máxima que se puede obtener la señal de salida, a continuación, la frecuencia máxima con la que la entrada de la



aceleración puede variar de manera que la variación es detectable. Por lo general, este valor está entre los cientos y los miles de Hz y puede ser limitado en la producción con la adición de los condensadores de filtro.

Dependiendo de la aplicación para la que está destinado el sensor, es posible que desee reducir las frecuencias que no afectan, por ejemplo, en la detección de vibraciones puede ser necesario un gran ancho de banda, mientras que para medir la aceleración de un vehículo normalmente prefiere baja. Las dinámicas inducidas en la producción también afecta el diseño del bloque de conversión analógico - digital (A / D): de acuerdo con el Teorema de Nyquist la frecuencia de muestreo del ADC (Analog to Digital Converter) deben tener por lo menos dos veces ese valor. El ancho de banda del sensor es determinado por el circuito de acondicionamiento en el interior del sensor y la mecánica de masa-muelle - amortiguador. La frecuencia de resonancia, es en cambio ampliamente superior a la banda de uso (generalmente varios kHz).

- Salida offset a 0 g (Zero - g Nivel de sesgo): especifica la tensión de salida cuando hay aceleración se aplica (0g), se expresa en voltios o mV y se refirió a una tensión de alimentación en particular (radiométrica). Normalmente también se indica la desviación máxima de este valor (que es ideal), la desviación debida a la temperatura (en mg / ° C), la sensibilidad a la variación con la tensión de fuente de alimentación, o sin embargo otros parámetros o diagramas que resumen las variaciones debidas a la no idealidad del dispositivo.
- Tensión de alimentación: define el rango de posibles tensiones de alimentación del sensor, el sensor depende de muchos parámetros utilizados por la tensión de alimentación (radiométrica).
- La desalineación del paquete (error de alineación de la Caja): define el ángulo entre el plano del paquete (eje de referencia externa) y la matriz (eje de referencia interna), Figura 2.3.3.2.1.4.3. El error es debido al proceso tecnológico de los envases, que no puede alinear perfectamente con el troquel carcasa de plástico, por lo general la diferencia es de aproximadamente 1 °. En el caso de los acelerómetros con múltiples ejes, también se define el error de alineación entre un eje y el otro. El impacto del error de alineación im muchas aplicaciones todavía puede pasar por alto.

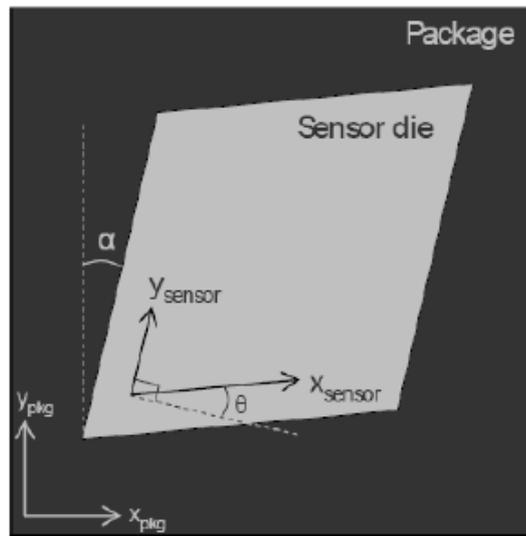


Figura 2.3.3.2.1.4.3. Desalineación del paquete.

- Sensibilidad eje-eje (Sensibilidad transversal): especifica la magnitud de la señal que aparece en las salidas correspondientes a los ejes ortogonales al eje a la que se aplica la aceleración, es decir, el porcentaje de acoplamiento entre los dos ejes (en un acelerómetro equipada más eje) Mediante la aplicación de una aceleración a lo largo del eje z, las salidas de los ejes X e Y también se someten a una ligera variación. Esto es debido a los errores de alineación entre los ejes, el proceso tecnológico del sensor, el circuito de acondicionamiento interior.

- Ruido (densidad de ruido): la potencia total de RMS de ruido (de la raíz media cuadrada) como la desviación de la señal de salida con respecto al caso ideal, como se informa en hojas de datos, se puede calcular la densidad de ruido, sabiendo que el ancho de banda de salida:

$$Total\ Rms\ Noise = Noise\ Density \cdot \sqrt{Bandwidth \cdot 1.6}$$

La banda puede ser limitada debido al condensador de salida, lo que requiere la frecuencia mínima requerida para la aplicación que desea lograr minimiza el ruido y maximiza entonces la resolución del acelerómetro.



2.3.3.2.1.5. Acelerómetros capacitivos MEMS

Los acelerómetros capacitivos explotan como un principio para la detección del desplazamiento de la masa de prueba, la variación de la capacitancia eléctrica de un condensador, asociada con la variación de la distancia entre sus placas. La masa en sí, realizado con material conductor, forma un refuerzo del condensador, y el otro, o los otros dos (si se construye con la tecnología diferencial), se fija a la estructura del dispositivo. La masa se mantiene gracias a un elemento elástico en suspensión, de modo que las armaduras no se toquen. Un acelerómetro capacitivo diagrama funcional se muestra en la Figura 2.3.3.2.1.5.

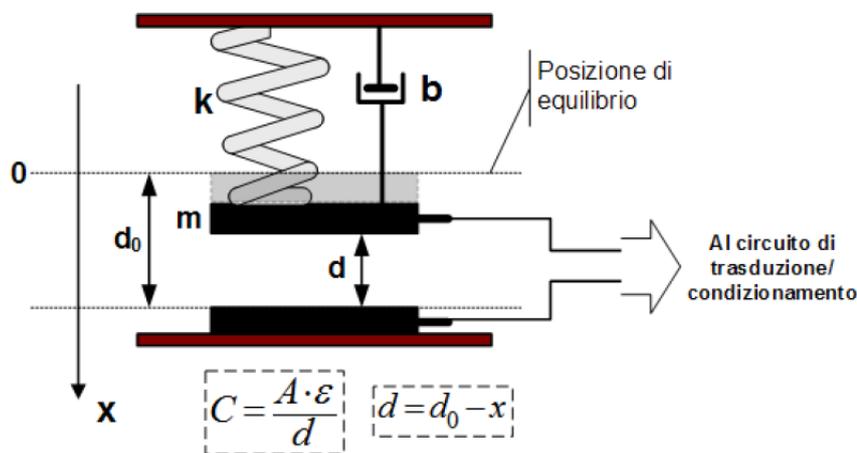


Figura 2.3.3.2.1.5. Diagrama de un acelerómetro capacitivo.

La máxima deflexión x que puede someterse a la masa es igual a la distancia entre las placas en una condición de D_0 equilibrio (con fuerzas aplicadas son cero), de hecho, una varianza igual a $x = D_0$ porque el contacto entre la armadura móvil y el fijo. Por último, un circuito especial genera una señal eléctrica proporcional a la capacitancia del condensador y por lo tanto la aceleración.

Estos sensores son adecuados para la medición de aceleraciones estáticas, no son muy sensibles a los cambios de temperatura, tener una alta sensibilidad, alto rendimiento, bajo consumo de energía y un costo muy bajo. La tecnología capacitiva, sin embargo, a diferencia de lo que ocurre para los sensores basados en otras tecnologías, hace que estos



sensores sensibles a interferencias electromagnéticas; una posible solución es utilizar protección adecuada.

El tipo de acelerómetros capacitivos se prestan bien para integrarse, junto con el sistema de transducción relativa y acondicionamiento de señal en un único chip de silicio. Se habla en este caso de MEMS (Micro-Electro -Mechanical -Systems), también llamado " Micro Machines". Como su nombre indica, son dispositivos electro - mecánicos cuyas dimensiones son del orden de micras, realizadas directamente sobre un sustrato de silicio, que es el mismo sustrato sobre el que se dio cuenta de los transistores que forman el circuito que se ocupa de la generación y el acondicionamiento de la señales requeridas para la operación de la máquina de micro. En nuestro caso, el sistema mecánico micro consiste en el sistema de masa-resorte - amortiguador, que está completamente hecha de silicio. La aplicación es muy sencilla, el camino es el mismo con el que se da cuenta de cualquier circuito integrado (proceso de fotolitografía).

2.3.3.2.1.6. Sistemas de monitorización dinámica y acelerómetros

En la actualidad, la frontera de la monitorización está representada por el establecimiento de sistemas de monitorización basados en el estudio del comportamiento dinámico de la obra; estos sistemas utilizan sensores acelerómetros. El acelerómetro, con respecto a los sensores de una naturaleza estática, describe el comportamiento de toda la estructura (o partes macroscópicas de la misma), haciendo las mediciones menos dependientes desde el punto de vista específico.

Con este tipo de sensores es posible llevar a cabo el análisis de diversos tipos. Se puede, por ejemplo, investigar el comportamiento dinámico global del trabajo a través de la aplicación de medidas encaminadas a la caracterización dinámica o la evaluación de la degradación, por ejemplo mediante el estudio de la forma en que las vibraciones se transmiten en el material que forma la estructura.

En particular, este tipo de aplicación es adecuado para reconocer los fenómenos de degradación a medida que surgen, sobre todo si va acompañado de la instalación de una red de sensores que se pueden establecer claramente los puntos débiles.



Obviamente, el comienzo de la degradación, tales como la formación de una grieta y su propagación, puede ser detectado por comparación de los últimos relieves con los anteriores.

Para la realización práctica de los sistemas de monitorización citados surge, sin embargo, de una manera significativa el problema del coste de los sensores. En este último sector, la introducción de dispositivos de MEMS, de alta tecnología y bajo costo, nos ha permitido revolucionar el concepto de monitorización.

[“Sistema innovativo basato su sensori accelero metrici MEMS per l’individuazione e l’evoluzione di uno stato fessurativo su strutture in muratura.” Mannara, Ciancia, Barbati, Infante]

2.3.3.2.1.7. Ejemplo de diseño de un sistema de monitorización dinámica, realizado con acelerómetros de nuevo desarrollo “strago ricerche”

La tecnología MEMS, que ha experimentado un crecimiento considerable en los últimos años (pensemos en las aplicaciones comunes en las bolsas de aire de automóviles), le permite incorporar dispositivos mecánicos de tamaño micrométrico en los chips semiconductores. Los sensores están basados en esta tecnología se caracterizan por su pequeño tamaño y bajo coste.

Sobre la base de los dispositivos pertenecientes a esta familia, “Strago Ricerche” ha diseñado e implementado un sistema de medición a inteligencia distribuida que integra, así como un acelerómetro MEMS con salida digital, una unidad de procesamiento y un sistema de transmisión de datos.

Este prototipo se caracteriza por ser continuo en el tiempo y distribuida espacialmente para satisfacer las necesidades de un sistema de control moderno o con la capacidad de determinar y localizar la aparición de nuevos eventos.

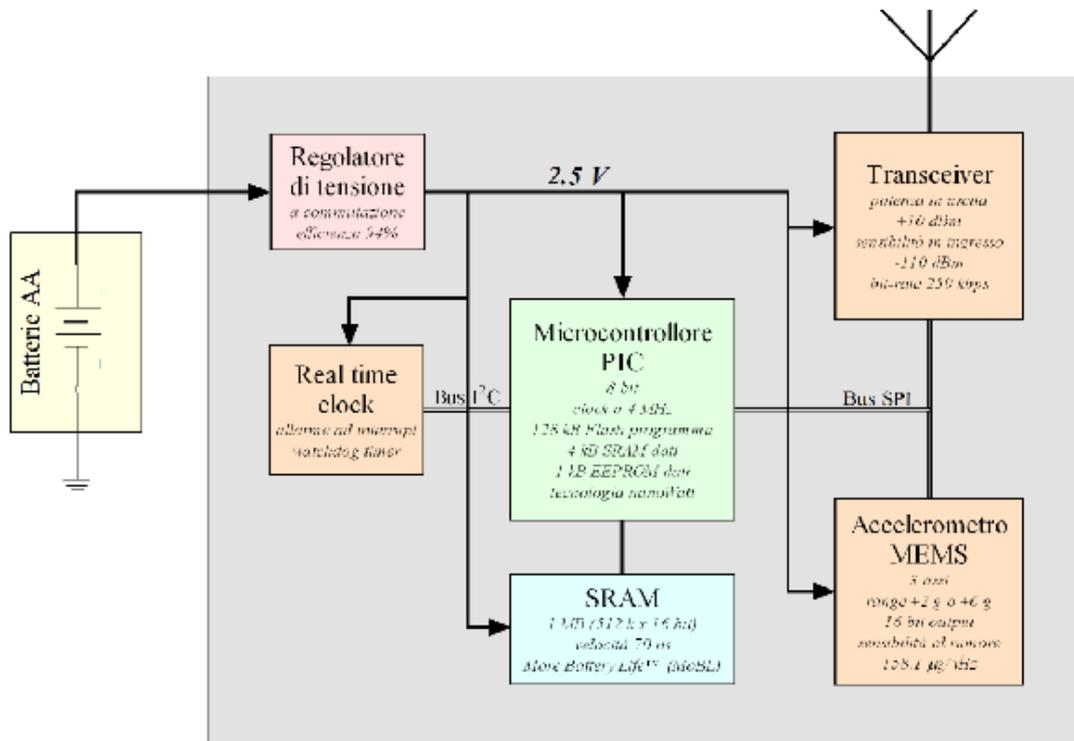


Figura 2.3.3.2.1.7. Sistema de medida de la inteligencia distribuida del strago ricerche.

2.3.3.2.1.8. Técnicas para la detección de grietas mediante el uso de acelerómetros

Para evaluar la presencia de un estado de fisuración sobre un medio, estudiamos la evaluación de la modalidad de la transmisión de las ondas mecánicas entre pares de sensores adyacentes. Cuando un cuerpo se altera en uno de sus extremos, la perturbación se propaga en ello en un cierto tiempo en la forma de ondas mecánicas. Estas se propagan de una capa instada del material empujado a la siguiente con un cierto retardo determinado por el tipo de estrés que ha causado la perturbación.

La presencia de imperfecciones o no homogeneidad en el cuerpo, provoca la aparición de la dispersión de los fenómenos de scattering que se producen con la presencia de retardos de tiempo y, en general, atenuación de la onda.

Por tanto, el enfoque consiste en estudiar las posibles distorsiones y cambios de fase de las ondas de transmisión debido a las lesiones. De



hecho, mediante la colocación de una rejilla de sensores dispuestos a una distancia fija en una estructura homogénea y instando a esta última a uno de sus extremos, las ondas de vibración se propagan en el medio y se atenúan principalmente en una función de la distancia. Otros fenómenos de retraso o distorsión de la señal son, por tanto, debido a irregularidades en el medio.

Para evaluar a continuación, en cualquier estructura, la presencia de una lesión o daño con una rejilla de sensores se pueden comparar los mismos puntos de medición antes y después de la ocurrencia de un evento.

En detalle, los parámetros a ser evaluados pueden ser de dos tipos:

- Estudio de desplazamientos de fase o distorsiones de la primera llegada de pico de las olas debido a una tensión mecánica.
- El estudio de las funciones de correlación que permiten evaluar las diferencias globales entre las diferentes señales medidas.

[“Sistema innovativo basato su sensori accelerometrici MEMS per l’individuazione e l’evoluzione di uno stato fessurativo su strutture in muratura.” Mannara, Ciancia, Barbatì, Infante]

2.3.3.2.1.8.1. Innovador sistema basado en sensores de aceleración MEMS para la detección y la evolución de un estado de agrietamiento sobre estructuras de mampostería

En el campo del diagnóstico se orienta ahora a la vigilancia de magnitudes que caracterizan la estructura dinámicamente. En este último sector, la introducción de sensores MEMS de aceleración, de alta tecnología, de bajo costo, permite a revolucionar el concepto de supervisión, fomentando la creación de redes distribuidas a través de múltiples puntos de medición.

Para este propósito, se han desarrollado técnicas innovadoras para la detección y el seguimiento de grietas con las medidas del acelerómetro. Paralelamente se ha desarrollado un prototipo de red (cableada/inalámbrica) MEMS a inteligencia distribuida con técnicas de procesamiento aplicadas en el lugar. Un diálogo continuo entre los diferentes estados de medición le permite transferir de forma remota no sólo los resultados del tratamiento, pero también para gestionar los fenómenos críticos.



La eficiencia estructural de las obras, tanto antiguas como de nueva construcción, se evalúa más a menudo mediante la observación de la evolución temporal de algunos parámetros (que se consideran más importantes) con técnicas de monitoreo. Uno de los problemas más frecuentes para el control de la seguridad de las estructuras, en particular los de albañilería, es el análisis de la grieta, o sea la combinación de grietas visibles e invisibles en una obra es decir un elemento estructural existente, que surge de un estado de inestabilidad o deterioro.

La hendidura es generada por las acciones de tracción, que superan la resistencia a la tracción del material, agrietándolo de una manera clara más o menos, con formas, inclinaciones y tipos que proporcionan direcciones complejas y no es fácil de interpretar.

El interés fundamental para el ingeniero de estructuras que se ocupa de estos problemas es evaluar la evolución temporal del patrón de la grieta y la aparición de nuevas lesiones en tiempo real. El daño se manifiesta a través de grietas, que tienden a aumentar su extensión en el tiempo, debido a la deformación de viscosidad. En este contexto, es muy importante para evaluar si los daños descubiertos son ahora sentados a una condición de estabilidad o, por el contrario, están en curso, y luego una fuente de mayor riesgo. Esta pregunta es el momento central de la observación crítica de la estructura y los resultados en un programa de "monitoreo."

2.3.3.2.1.8.2. Ejemplo de aplicación

La pared de la figura se encuentra equipada con una malla lineal de sensores, con una discontinuidad ubicada en el centro, generando un pequeño espacio relleno con mortero.



Figura 2.3.3.2.1.8.2.1. Muro utilizado para la realización de la prueba.

La idea original es poner de relieve a raíz de un extrés previsto en el extremo de la pared las diferencias en el comportamiento de los sensores colocados a horcajadas sobre el área dañada. En particular, observar la llegada de las primeras aceleraciones máximas que evalúan las diferencias en el tiempo y la amplitud a lo largo de la línea de medición. En una primera fase, la prueba A, la pared en cuestión ha sido equipada con seis acelerómetros (A1-A6) dispuestos en la dirección X de acuerdo con el siguiente esquema de medición. Posteriormente, la prueba B, seis sensores (B1-B6) se organizaron de la misma manera en un sector libre de daños. La pared es epujada en sus extremos por golpear en los puntos A y C con un martillo instrumentado.

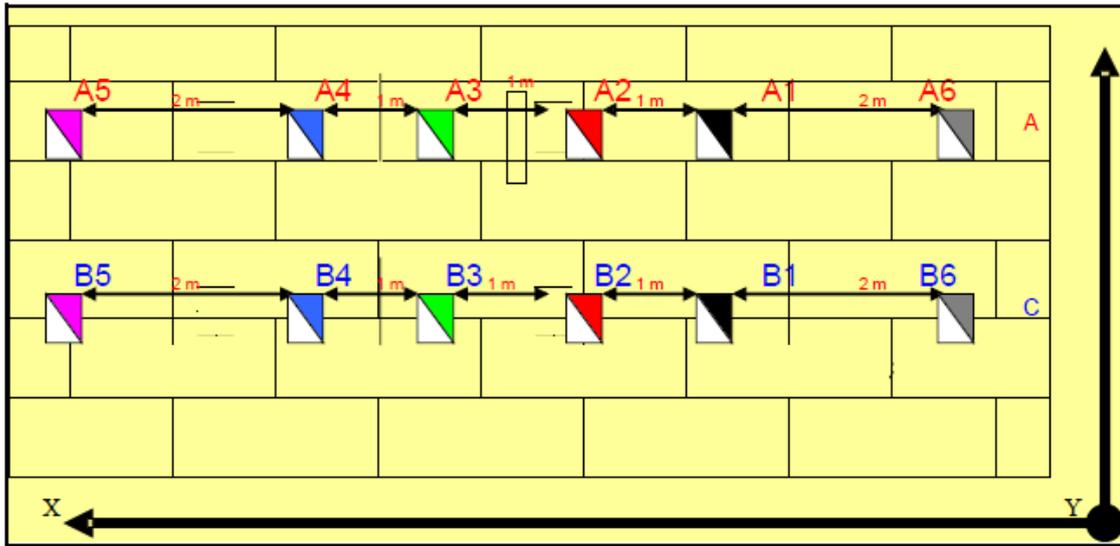


Figura 2.3.3.2.1.8.2.2. Esquemización de la prueba y de la posición de los acelerómetros.

Se trata de un análisis de los picos de la primera llegada grabado con los acelerómetros. Se muestra el historial “zoomate” en la primera llegada de señal entrante que muestra, ya de una manera visual, una clara distorsión de la señal en el nodo 3, debido al efecto de la grieta.

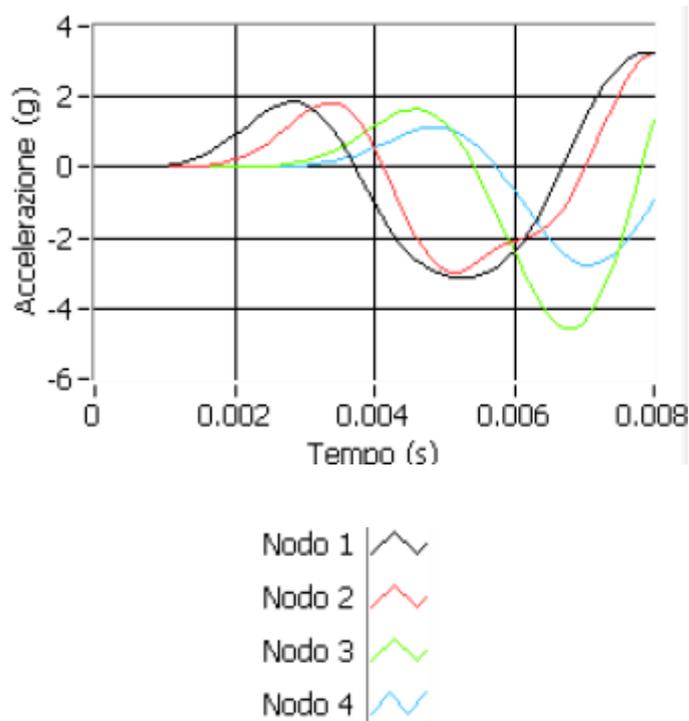




Figura 2.3.3.2.1.8.2.3. Gráfico del tiempo de aceleración medido por los 4 acelerómetros.

Para el procesamiento cuantitativo, se toma nota de los tiempos de los dos primeros picos (máximos y mínimos) en las 4 señales y se hace una diferencia en estos tiempos de los tres pares contiguos: A1-A2, A3-A2, A4-A3 como se muestra en la figura a continuación.

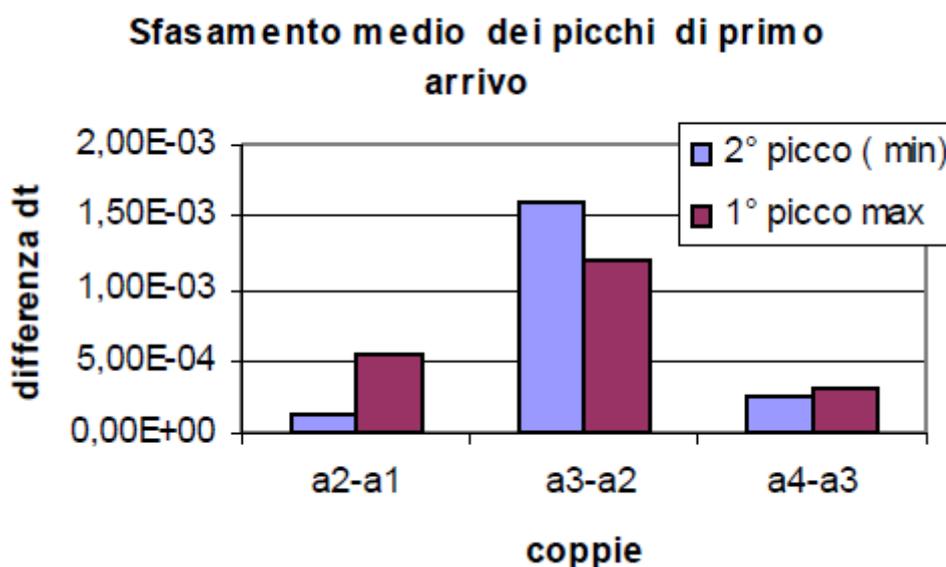


Figura 2.3.3.2.1.8.2.4. Desfase medio de los picos de llegada entre pares de acelerómetros.

A partir de los gráficos se observa que el tiempo de transmisión de la señal entre los sensores de ambos lados de la hendidura es mayor. En la prueba B se llevaron a cabo las mismas operaciones en un área intacta. En este caso tanto los valores de los retrasos entre los picos así como los valores de las funciones de cross-correlación normalizados son resultados casi constantes entre los diferentes pares.

Las pruebas fueron satisfactorias, lo que demuestra la notable versatilidad del acelerómetro instrumento. Los últimos avances tecnológicos y, en particular, la introducción de sensores basados en la tecnología MEMS a bajo costo, entonces se abren nuevas vías a los métodos de control, que son, por tanto, más orientadas al control en tiempo real de las obras.



[“Sistema innovativo basato su sensori accelero metrici MEMS per l’individuazione e l’evoluzione di uno stato fessurativo su strutture in muratura.” Mannara, Ciancia, Barbati, Infante]

2.3.3.2.2. Extensómetros

Se emplean para la medición de la variación de espesor de fisuras, con amplitudes de medición comprendidos entre 25 y 50, y apreciación del orden de 0,01 mm. Se fijan mecánicamente o químicamente a ambos lados de la fisura a controlar.

2.3.3.2.3. Clinómetros

Se emplean para el registro de la inclinación de elementos estructurales (fundamentalmente muros y pilares), con capacidades de medida respecto al plano de montaje seleccionado y apreciación diversas, requiriendo piezas específicas para su colocación.

2.3.3.2.4. Cintas de convergencia

Se emplean para el registro de medida del movimiento relativo entre dos paramentos (fundamentalmente muros y pilares). La capacidad de medida viene a ser del orden que la de los extensómetros.

2.3.3.2.5. Inclínómetros

De manera análoga a los inclinómetros manuales, puede disponerse de inclinómetros instalados de manera permanente en tubos inclinométricos, si bien al multiplicar el número de sensores, el coste puede llegar a ser prohibitivo.

2.3.3.2.6. Galgas extensométricas

Ocasionalmente puede requerirse la colocación de galgas extensométricas, de manera análoga a las convencionales.

2.3.3.2.7. Sensores de temperatura y humedad

En los lugares en los que se hayan instalado los instrumentos anteriormente mencionados, se llevará a cabo una medición paralela de las temperaturas, y, en los espacios interiores, de humedad. Cada sensor de los mencionados previamente lleva incorporado un termistor, cuya



lectura se realiza en paralelo a la del propio sensor. Esta información servirá para distinguir los movimientos cíclicos debidos a acciones térmicas y a valorar con mayor criterio los resultados obtenidos.



2.4. Sistemas de transmisión de la información captada

2.4.1. LOS SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN COMO UN CONJUNTO INTEGRADO

En el pasado, el control de las obras de ingeniería civil se examinaba generalmente a través de la inspección visual. El desarrollo tecnológico, especialmente en el campo de los sensores, ha dirigido las metodologías de control a la detección de magnitudes estáticas con las técnicas de diagnóstico instrumental.

Cada vez más, sin embargo, la eficiencia estructural se evalúa mediante la observación de la evolución en el tiempo de algunos parámetros significativos a través de la supervisión.

El desarrollo y la difusión tecnológica de los instrumentos de medición han visto la aparición de la monitorización continua en comparación con la discreta, que tiene la ventaja de actuarse como un sistema de control y seguridad en tiempo real. Los sistemas de control en continuo se componen de unidades de adquisición, tratamiento y cesión de los datos tratados de forma remota, lo que elimina la necesidad de desplazarse físicamente al lugar donde se instale el equipo. Esta elección tiene la ventaja de reducir significativamente los costes causados por funcionando a diferentes tiempos de campañas de medición, ya que elimina la necesidad de instalar varias veces todo el sistema de medición; sin embargo, conlleva el inconveniente de instalar los sensores de forma permanente en la estructura que son a menudo muy caros.

Por ejemplo, considerando el problema de la detección de un patrón de grietas. En este caso, el control se puede hacer de una manera discreta por medio de fotografías claras y bien catalogadas o de una manera continua por medio de mediciones efectuadas con un extensómetro de distancia entre dos o más placas extensiométricas aplicadas a los lados de la grieta. La instalación de tal sistema de monitorización, sin embargo, debe haber sido precedido antes de la ejecución de las observaciones visuales donde se ha detectado la presencia de la ranura.

Para lograr estos objetivos, sin que resulte en un aumento en los costos, es necesario:

- Identificar los sensores de bajo coste;
- Desarrollar un sistema de adquisición y transformación de datos en el



lugar;

- Determinar un método de transmisión en tiempo real de la información. Llevar a cabo una verificación de este tipo con sensores convencionales como fisurómetros implicaría la necesidad de "difundir" una serie de sensores extremadamente elevada sobre la obra sin que se garantice la identificación y localización de los daños.

2.4.1.1. MEDIOS FÍSICOS DE TRANSMISIÓN DE LA INFORMACIÓN POR ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

- Medios guiados

– Cables metálicos (normalmente de cobre)

- Coaxiales
- De pares trenzados (apantallados o sin apantallar)

– Cables de fibra óptica

- Multimodo
- Monomodo

- Medios no guiados

– Enlaces vía radio

– Enlaces vía satélite

2.4.1.2. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

a) Fibra óptica 180.000 Km/s(aprox.)

b) Cobre 200.000 Km/s (aprox.)

c) Vacío o aire 300.000 Km/s

La velocidad de propagación impone un retardo mínimo en la transmisión de información. Además hay que contar el que introducen los equipos. El tipo de material para cableado define la velocidad y la distancia de la red.



2.4.2. MONITORIZACIÓN CONVENCIONAL CON CABLE

2.4.2.1. EL CABLE DE PARES

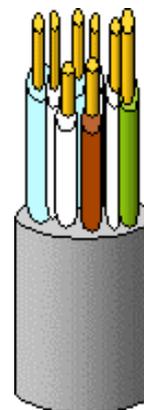
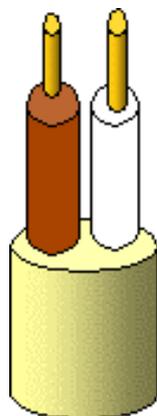
Consiste en dos conductores aislados entre sí y con el exterior, trenzados de forma que cada uno se encuentre expuesto a la misma cantidad de ruido inductivo externo. Los conductores son de cobre y tienen una sección entre 0,4 y 0,9 mm de diámetro. En algunos casos para evitar interferencias los pares trenzados se acompañan de una pantalla metálica, que aumenta el rendimiento.

A dichos cables se les denomina STP (Shielded Twister Pair), frente a los cables sin apantallar denominados UTP (Unshielded Twister Pair). Normalmente este tipo de cables se agrupan en cables de mayor capacidad denominados multipares, que llevan hasta 2400 pares.

Uno de los problemas en los cables multipares es el conocido como diafonía, que consiste en el acoplamiento entre dos señales que circulan por pares adyacentes debido a la inducción electromagnética mutua (crosstalk). La señal acoplada puede recibirse en el extremo más cercano (paradiafonía) o al más alejado (telediafonía).

Como características principales del cable de pares podemos señalar:

- Bajo coste
- Ancho de banda reducido (principalmente por la sección del conductor)
- Presencia de diafonía (en los cables multipares)





2.4.2.2. EL CABLE COAXIAL

Son cables contruidos con dos conductores concéntricos de cobre, uno interno por el que circula la señal útil y otro externo que rodea al anterior actuando a modo de pantalla. El conductor central tiene un diámetro superior al de los cables de pares (entre 1 y 5 mm).

Podemos señalar como características principales del cable coaxial:

- Menor atenuación por unidad de longitud que el cable de pares
- Mejor respuesta en frecuencia (debido a la mayor sección del conductor)
- Mayor inmunidad frente al ruido (por su apantallamiento)
- Coste más elevado
- De manejo más difícil





2.4.3. TECNOLOGÍA WIRELESS

2.4.3.1. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA WIRELESS: SISTEMA DE MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LA BASÍLICA DE COLLEMAGGIO EN L'AQUILA

El sistema de monitorización desarrollado en la Basílica de Collemaggio es un sistema innovador, no por cable, sino por medio de la aplicación de la tecnología inalámbrica. Su objetivo es ser una ayuda valiosa para la evaluación de la integridad estructural del monumento y la adecuación sísmica tanto de la acción para la seguridad tanto del desarrollo posterior de la restauración y la mejora estructural de lo mismo. (Antonacci et al. 2011a).

El sistema instalado consta de 16 tarjetas multi-función inalámbricas programables, cada uno con un acelerómetro MEMS triaxiales, sensor de temperatura y sensor de humedad para el monitoreo dinámico, y también 8 fisurómetros potenciométricos y 3 inclinómetros electrolíticos. Los acelerómetros utilizados, producidos por ST Microelectronics, modelo LIS344ALH, son acelerómetros MEMS con la medición de la gama CC-1500 Hz. Los fisurímetros utilizados son del tipo potenciométrico, tienen 50 mm de carrera y la resolución centesimal para medir con precisión los cambios de posición entre dos puntos. Los inclinómetros biaxial electrolíticos de la pared tienen milésima de resolución y rango de medición de $\pm 5^\circ$.

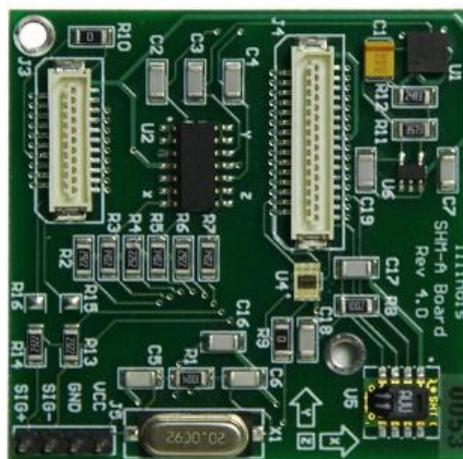


Figura 2.4.3.1.1. Multisensor: Scheda ISM400.



Figura 2.4.3.1.2. Multisensor: montaje

Todos los sensores están conectados a través de una red de sensores inalámbricos (WSN). Esta solución, una alternativa a las redes cableadas tradicionales, tiene algunas ventajas, especialmente el costo más bajo, la reducción del tamaño del sistema y la facilidad de instalación. Los sistemas de control inalámbricos actuales se basan generalmente en los nodos de la nueva generación (en este caso, iMote 2), de bajo costo y pequeño tamaño con capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos y con la posibilidad de tener más sensores (por ejemplo, acelerómetros MEMS).

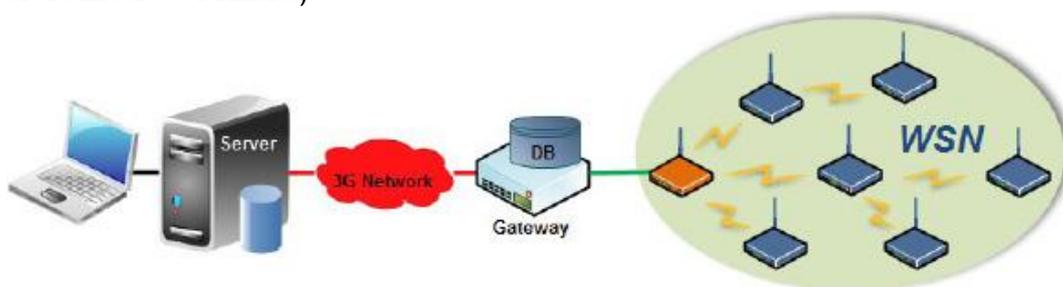


Figura 2.4.3.1.3. Esquema de la red de monitorización.



En esta configuración, los datos recogidos por los sensores se transmiten a una unidad especializada, llamada gateway, que se encuentra en estrecha proximidad a ellos, y se pueden almacenar, temporal o permanentemente, o ser transmitidos a un servidor remoto, a través de la comunicación directa con el enlace de radio conectado a la red troncal de la Universidad o a través de GPRS en la red móvil.

El procesamiento de los datos de medición es un punto clave en el desarrollo de sistemas de monitorización inalámbrica: se puede hacer en parte del gateway, por supuesto, en el servidor y, en nuestro caso específico, directamente en los nodos sensores. Estos, de hecho, están equipados con un microprocesador que les permite llevar a cabo el tratamiento local de las señales, asegurando de procesamiento distribuido en toda la red. (Antonacci et al. 2011b). En cuanto a la monitorización dinámica el propósito es adquirir información suficiente como para reconstruir las formas modales más significativos para el modelo que representa la Basílica y las frecuencias asociadas.

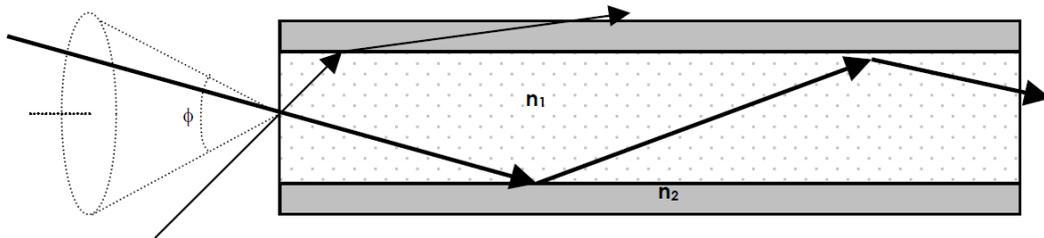
[“Analisi del comportamento dinamico della Basilica di Collemaggio per il progetto di un sistema di monitoraggio” Antonacci, Gattulli]

2.4.4. LA FIBRA ÓPTICA COMO ELEMENTO DE TRANSMISIÓN

Consta básicamente de un fino hilo de óxido de silicio que permite transportar la luz en la banda de infrarojos. Se utiliza para transmitir señales digitales (caracterizadas por presencia de luz ‘1’ y ausencia de luz ‘0’). La fibra óptica está compuesta por dos capas de vidrio concéntricas con distinto índice de refracción, lo que provoca que un haz de luz incidente con un cierto ángulo de entrada se propague a lo largo de la fibra. El ángulo de entrada debe pertenecer al cono de aceptación, determinado por:

$$\text{sen } \phi = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Donde n_1 y n_2 corresponden con el índice de refracción del núcleo y la corteza respectivamente.



El diagrama de atenuación de la fibra óptica en función de la frecuencia nos ofrece tres regiones aproximadamente planas, denominadas ventanas de transmisión, situadas en 850, 1300 y 1500 nm (en lugar de frecuencia se opera con longitudes de onda:

$$f(\text{Hz})=c(\text{m/s})/\lambda(\text{m})$$

Sumando las tres regiones el ancho de banda total es de aproximadamente 110 THz. No obstante dicho ancho de banda no puede ser aprovechado en su totalidad a menos que se utilicen técnicas de multiplexión para transmitir en las tres ventanas. Además, el ancho de banda real en la fibra óptica no viene limitado por su diagrama de atenuación, como ocurre con los medios metálicos, sino por un fenómeno denominado dispersión de la luz.

La dispersión trae como consecuencia fundamental el ensanchamiento de los pulsos a medida que recorren la fibra, lo que limita la velocidad real de transmisión, pues si el tiempo de bit es muy pequeño se unirían pulsos correspondientes a bits consecutivos, imposibilitando así la correcta interpretación de la señal recibida. La dispersión se debe básicamente a dos efectos:

- Dispersión modal, causada por las diferentes trayectorias que toman los haces de luz que atraviesan la fibra, lo que provoca que recorran distancias diferentes. Por lo que dos haces que iniciaron el camino a la par, llegarán al otro extremo en diferentes instantes de tiempo. Esta dispersión es la dominante, y para minimizar su efecto debemos disminuir el tamaño del núcleo de la fibra (fibra monomodo).
- Dispersión cromática: es debido a que la luz inyectada en la fibra no es monocromática pura (tiene más de una longitud de onda). Teniendo en



cuenta que la velocidad de propagación de la luz es inversamente proporcional al índice de refracción, y que éste varía con la frecuencia, las distintas longitudes de onda que componen el haz luminoso viajarán a distinta velocidad. Para minimizar este efecto deben utilizarse emisores de luz altamente monocromáticos, como es el láser (normalmente utilizados en fibra monomodo para alcanzar mayores distancias).

Podemos señalar como principales características:

- Baja atenuación por Km (del orden de 0,2 dB/Km), lo que permite separar mucho los repetidores (varios cientos de kilómetros)
- Total inmunidad frente al ruido (es normal una BER < 10⁻¹⁰)
- Gran capacidad de transmisión (BW, varios Gbits/s)
- Son seguros (difíciles de interceptar)
- Coste relativamente elevado, pero decreciente
- Usan señales de potencias muy bajas (mW)
- El manejo de la fibra óptica es complejo, sobre todo en el caso de empalmes (que pueden ser mecánicos o por fusión) y conectorización.

2.4.5. ELECCIÓN FIBRA ÓPTICA vs CABLE

1. Se recomienda utilizar fibra cuando:

- a) Se conectan edificios diferentes (posible diferencia de potencial entre tierras)
- b) Se prevé utilizar velocidades altas o muy altas (valorar en ese caso el uso de fibras monomodo)
- c) Se quiere cubrir distancias de más de 100 m
- d) Se requiere máxima seguridad frente a intrusos (la fibra no puede 'pincharse')
- e) Se atraviesan atmósferas corrosivas
- f) Se corre el riesgo de tener fuerte interferencia electromagnética



2. Si no se da ninguno de estos factores es preferible utilizar cobre, ya que los equipos de emisión recepción son más baratos.



2.4.6. MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL CON TECNOLOGÍA GNSS

2.4.6.1. APROXIMACIÓN A LA MONITORIZACIÓN GEOMÁTICA

El advenimiento de las instrumentaciones geomáticas automatizadas y el desarrollo de software dedicado, ha hecho posible, por algún tiempo, el uso de tecnologías sin contacto en operaciones de seguimiento, estructural y del medio ambiente, en adición o sustitución de los procedimientos clásicos variométricos, para el contacto, utilizar más tradicional. La secuencia de funcionamiento útil para un enfoque correcto de lo proceso geomático de monitoreo podría ser como sigue:

- Adquisición de información general sobre la obra estática;
- Recuperación de los conocimientos sobre las características de deformabilidad y las direcciones más importantes del movimiento;
- Identificación de los puntos de control que pueden caracterizar el comportamiento estructural ya que el efecto de la deformación asumirá significados globales e importantes, y los que determinaran los movimientos;
- Definición de la radio de los alrededores útiles para la medida de control;
- Elección del procedimiento y la tecnología que puede proporcionar la precisión adecuada absoluta y relativa y el sistema de referencia para la lectura de las posiciones de juego (coordenadas).
- Evaluación de los umbrales permisibles de riesgo y la posterior programación de los sistemas de alarma.

Debe tenerse en cuenta que los puntos de control de la estructura pueden sufrir, como resultado de las cargas, desplazamientos tanto en términos absolutos (como en un cuerpo rígido), en comparación con los puntos de referencia fijos colocados fuera de la zona de influencia del fenómeno en la acción, como relativos (como en un cuerpo deformable, más o menos elástico), en comparación con los puntos de la estructura misma.

Además, es posible que los movimientos se produzcan en un corto período de tiempo (y, en general tendencia casi periódica), o en intervalos más amplios: en el primer caso hablamos de desplazamientos dinámicos



o continuos, mientras en el segundo de los discretos o cuasi - estacionarios.

En el caso del control dinámico (acción de viento, vibraciones inducidas por el tráfico pesado de vehículos o maquinarias, sacudida sísmica, etc.), se debe intervenir mucho en intervalos pequeños de tiempo y entonces es necesario tener sensores en tiempo real (frecuencia en la adquisición de más de 15 a 20 Hz, y ahora hasta 50 Hz) para seguir con continuidad el movimiento. A partir de ahí, se construyen modelos de análisis en cuatro dimensiones: x, y, z, tiempo. La medición se puede realizar con los sensores tradicionales, tales como los acelerómetros, la integración con los receptores GNSS (Global Navigation Satellite Systems) a alto muestreo, conectados a través de la antena a las constelaciones de satélite (GPS, GLONASS).

En el control casi estacionario se producen desplazamientos (pseudo estática), sin embargo, durante períodos más largos, las operaciones de medición se pueden realizar con la instrumentación bajo muestreo (1 Hz) en condiciones de estabilidad temporal del artefacto.

Un elemento importante para la calidad de posicionamiento por satélite está constituido por el número de satélites a recibir por el sensor y por su geometría en el espacio, en el sentido de que, muchos más satélites se realizan y óptima es su ajuste, mejor será la precisión de la determinación espacial.

2.4.6.2. LA TECNOLOGÍA GNSS

A pesar de algunas limitaciones de uso, en los casos en que la señal está ausente, la tecnología GNSS es una solución de perspectiva interesante también en la monitorización estructural. Para la determinación de la posición espacial en modo dinámico el mercado ofrece, durante algún tiempo, un receptor diseñado específicamente para operaciones de monitorización continua.

El receptor, Leica Geosystems, se llama GMX902. Se trata de un sensor del satélite capaz de monitorizar, durante 24 horas, la posición de los puntos de control en las zonas sensibles o de infraestructura, es decir, pendientes de deslizamientos, puentes, presas, edificios, y la determinación de la continuidad en el tiempo con el vector de desplazamiento espacial. El dispositivo, de doble frecuencia, adquiere datos de posición con el muestreo a 20/50 Hz y proporciona una exactitud teórica de 20 mm (con código) y 0,2 mm, operando con la fase



de la portadora; se garantiza una excelente calidad operativa y posicionamiento en tiempo real, incluso en la presencia del movimiento de la estructura. El peso (800 gramos para el dispositivo, más la antena) y la alta resistencia a los agentes atmosféricos lo hacen idóneo en todas las condiciones operativas, en las estructuras extendidas, en las desarrolladas en altura y en los casos en que la instrumentación debe ser bastante compacto.



Figura 2.4.6.2. Sensor Leica GG a 20 Hz

La transmisión de datos, entre las posiciones controladas (donde están instalados el llamado Rover) y la estación Master de referencia del sistema (de la posición espacial conocida) y viceversa ocurre, por lo general, en radiofrecuencia a través de comunicación wireless de radio módem o GPRS, con el apoyo de la red móvil GSM o WLAN (red inalámbrica de área local). El aparato vía satélite GMX902 también se puede conectar a utilizar cualquiera de los sensores de aceleración y de control de variables meteorológicas.

2.4.6.3. EJEMPLO DE APLICACIÓN: ESTACIÓN MAESTRA DE LA UNIVERSIDAD DE BÉRGAMO

La estación Master para el control de las estructuras, activo en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Bérgamo, utiliza la tecnología diferencial GNSS-RTK (Real Time Kinematic). Las estructuras y infraestructuras que puedan verse afectados por el monitoreo deben estar ubicados dentro de un área con un radio de unas pocas decenas de kilómetros de la estación Master. Las comunicaciones



entre las distintas unidades operativas, relacionadas con la medida y con sujeción a la corrección de posición, se gestionan a través de un tipo de conexión de red inalámbrica WLAN. La precisión de posicionamiento de los puntos de control, clasifica los niveles de sub-centímetro, mientras que el umbral de precisión en el seguimiento del vector espacial desplazamiento-deformación (dado variacional) es la de un milímetro.



Figura 2.4.6.3.1. Antena de recepción GNSS (izquierda) y de comunicación Wlan (derecha).



Figura 2.4.6.3.2. Server del sistema y receptor de satélite de la estación Master.



2.4.6.3.1. Componentes tecnológicos

El sistema de monitorización entero se puede resumir en tres subsistemas:

- La estación Maestra;
- Las estaciones Rover;
- El software para la gestión de la medida y para el análisis de los datos.



Figura 2.4.6.3.3. Unidad Rover, con la antena GNSS y la antena WLAN.

2.4.6.3.2. La estación Maestra y Rover

La antena GNSS recibe de la estación Maestra las señales de los satélites y los envía a través del cable al receptor que está interconectado en serie a un PC, que tiene función de servidor. Incluso en el caso de una estación móvil (Figura 2.4.6.3.4), el ciclo comienza por la recepción de señales a través de una antena GNSS, colocada en el punto desde el cual ser controlada, y mediante el envío al receptor desde el satélite. La señal de salida desde el receptor a continuación, pasa a un convertidor y, finalmente, a un adaptador de red que utiliza una antena de WLAN para la transmisión a la correspondiente de la estación Maestra.



Figura 2.4.6.3.4. La transmisión de datos de la Master (arriba) y de la Rover (abajo).

El desarrollo del GNSS, que todavía está en pruebas, llega a la introducción de una serie de mejoras tecnológicas que comprometen e involucran a todos los segmentos del sistema de satélite. Hay que considerar, además, que el enfoque metrológico está hoy orientado a las tecnologías de medición sin contacto, integrado con otros más tradicionales y que se caracteriza por la alta automatización, la portabilidad de datos electrónicos y la gestión remota.

En este nuevo entorno tecnológico, los sistemas de control GNSS sólo pueden asumir un papel operativo (estático y dinámico) tanto por el aumento de la precisión, la calificación de la tecnología y su facilidad de uso, así como, finalmente, por la posibilidad de realizar operaciones (discretas o continuas) de posicionamiento tridimensional en cualquier lugar, incluyendo las áreas urbanas, espacios cubiertos y los interiores, para las evaluaciones de riesgos y el manejo de emergencias.

[“Monitoraggio di strutture con tecnologia GNSS”; Colombo, Marana, Galbusera].



2.4.7. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS GPS: SISTEMA DE MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO CENTRAL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE NÁPOLES

La Torre de la Facultad de Ingeniería de la Universidad "Federico II" de Nápoles (Figura 2.4.7.1) es un edificio de gran altura de trece plantas, de las cuales las dos primeras están enterradas. Se caracteriza por una estructura de hormigón armado diseñado y construido en los años sesenta para soportar cargas de gravedad solamente.

Durante los años ochenta, tras el terremoto de Irpinia, la estructura enmarcada fue sísmicamente adecuada.



Figura 2.4.7.1. Torre de la facultad de ingeniería.

El sistema de monitorización instalado es un sistema abierto, siendo expansible a través de varios sistemas de adquisición de datos y la transmisión. Se compone de varios sensores para monitorizar el ambiente, el suelo y la respuesta estructural a las tensiones (anemómetros, acelerómetros, transductores de desplazamiento).

La arquitectura del sistema de monitoreo ha sido diseñado con el fin de asegurar la transmisión de datos incluso en condiciones críticas, tales



como durante un terremoto, a través de la utilización de portadores redundantes: de hecho, los datos recogidos durante y inmediatamente después de un evento sísmico son fundamentales para producir escenarios y apoyar las operaciones de rescate, y para lograr una mejor comprensión del comportamiento dinámico de la estructura (Rainier et al., 2006). Una reducción en el uso de los cables se logró también por grupos de conexión de tres sensores en los dispositivos electrónicos inteligentes, llamados T-nodos que realizan las siguientes funciones: acondicionamiento de señal y control de la eficiencia de los sensores, conversión de la señales de analógico a digital.

Los T-nodos están conectados a un slave local, que recoge, sincroniza, y transmite los datos a través de vectores redundantes a una unidad central. Esta última está representada por el master local. Está equipado con un módulo para la alimentación y el control de los sensores y realiza tareas de almacenar, validar y procesar los datos. Los resultados de los análisis se transmiten finalmente a un panel de control que muestra la localización y la actividad de los sensores sobre la estructura y, a petición, las formas de onda en términos de aceleración de canales seleccionables y los resultados del proceso de identificación. Se puede acceder al panel de control a través de una simple conexión a Internet.



Figura 2.4.7.2. Master local.

Los datos del sensor se almacenan en una base de datos MySQL organizados en tablas que muestran, clasificados en orden de columnas, el tiempo absoluto, el estado del GPS, los valores de las medidas. Los datos pueden ser descargados mediante el desarrollo de una aplicación adecuada que interconecta a la base de datos.

En cuanto a los sensores acelerométricos montados sobre la estructura, la torre de la Facultad de Ingeniería se instrumentó en los pisos superiores, con dos tipos de acelerómetros: acelerómetros uniaxiales forcebalance productos de Kinemetrics inc. (Modelo FBA ES-U2; 2,5 V / g sensibilidad, escala completa ± 1 g), y acelerómetros piezoeléctricos uniaxiales fabricados por PCB Piezotronics inc. (Modelos 393A03 y 393B04; 1 V / g de sensibilidad, lleno de escala ± 5 g).



Los planes instrumentados son el tercero, séptimo y la cobertura; los sensores están dispuestos a lo largo de la dirección norte-sur y este-oeste a lo largo de las dos esquinas opuestas del edificio y en dos esquinas opuestas cerca de las escaleras.



Figura 2.4.7.3. Digital recorder K2.

El sistema de monitorización también está equipado con tres antenas GPS para obtener el tiempo absoluto y la sincronización de las mediciones de los diversos sensores en el database. Asimismo, la estructura está igualmente equipada con un sistema independiente, un Kinematics Altus grabadora digital (Figura 2.4.7.3) conectado a EpiSensors ES-U2, para comparar los resultados. Aunque los datos registrados de los Kinematics se almacenan en el database, con el uso de un sistema adecuado para la transferencia de datos del K2 a la base de datos a través de LAN.

Con el fin de identificar los parámetros dinámicos de la estructura bajo condiciones de funcionamiento, se ha desarrollado en el software LabVIEW para procesamiento de datos: a través de los controladores apropiados, el software se conecta directamente a la base de datos para recibir datos, por lo tanto está perfectamente integrado en el sistema de monitorización.



[“Protezione sismica di edifici strategici e monitoraggio strutturale:
applicazione all’Edificio centrale della Facoltà di Ingegneria di Napoli”
Fabbrocino, Rainieri, Manfredi, Cosenza]



2.5. Tratamiento de datos e interpretación de los resultados obtenidos

2.5.1. APROXIMACIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL DE DATOS: CONTROL REMOTO

En general, la necesidad de llevar a cabo controles en mucho tiempo (varios meses o incluso años), se tiende a utilizar los sistemas de adquisición de datos locales capaces de procesar previamente la información y enviarla a través de módem a un centro de control remoto. Por tanto, cada instrumento instalado se conectará a un control de la adquisición, procesamiento y transmisión de datos, a fin de inducir a mínimo las longitudes de cable (fuente de ruido) y para poner las herramientas en la misma homologa condiciones para el suministro a la unidad.

Esta unidad, que está conectada a la red telefónica a través de un módem, se puede llamar desde un usuario remoto para la recolección de datos. Si es necesario, se puede conectar un usuario local adicional (Personal Computer) para la recopilación, el procesamiento y el reporte de superación de los umbrales de alarma en el lugar.

El usuario final, sin embargo, es capaz de procesar todos los datos desglosados por archivos regulares, con el software adecuado. Un módulo de diagnóstico debe también permitir resaltar cualquier valor atípico o anormal con respecto al rango de medición, por lo que es posible monitorear diariamente el correcto funcionamiento de los equipos.

Una vez establecidos los umbrales de alarma adecuados para los parámetros que se miden, también es posible activar los mecanismos de alerta audible y visual que indican a los operadores la superación de los umbrales establecidos. Todas las informaciones recogidas, sin embargo, por lo general debieran ser procesadas con un estándar de frecuencia predeterminada (por ejemplo, mensual) y en cualquier caso de un fenómeno extraordinario que puede generar la alteración de uno de los parámetros monitorizados.

[<http://www.geoconsultlab.it/monitoraggio>;11/6/2014]



2.5.2. EJEMPLO DE CONTROL DE DATOS EN LA VIGILANCIA DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE LA BASÍLICA DE SAN GAUDENCIO: “MÉTODO DEL UMBRAL”

El sistema de adquisición de datos utilizado para la Basílica de San Gaudencio se basa en un método de umbral: las mediciones no están registrados, como sucede a menudo, de intervalos de tiempo predeterminados constantes, pero cada vez que el instrumento detecta un cambio en mayor medida de un valor mínimo predeterminado llamado "umbral mínimo".

Este método también permite aprovechar los picos de medición que duran por un tiempo limitado, que con otros métodos a menudo no se pueden observar.

El sistema de control en tiempo real dado cuenta también permite el cambio de los umbrales mínimos durante el seguimiento, la posibilidad a menudo explotada en este caso para calibrar la sensibilidad de las grabaciones de modo de adaptarse al comportamiento real de la estructura.

El sistema así organizado tiene el inconveniente de no simultaneidad de las medidas de los diferentes instrumentos, por lo que la comparación entre las mediciones de diferentes instrumentos a veces puede ser muy laborioso. Otros problemas pueden surgir en el caso en el que, para instrumentos tales como el péndulo y los interruptores de nivel láser que miden el movimiento de un cuerpo o de un líquido, el umbral mínimo elegido es demasiado bajo y por lo tanto capta los movimientos que corresponden a oscilaciones alrededor de un punto de equilibrio y no a un desplazamiento real de la estructura.

Las principales ventajas de un umbral de registro se deben a la reducida cantidad de datos a almacenar, a la posibilidad de variar los valores de umbral de un instrumento a otro y en cualquier momento del período de observación, por lo que este método permite representar mejor las diferentes fenómenos en caso de las variaciones continuas de las medidas, con la condición de ser capaz de ajustar con precisión el umbral.

[Tesi di laurea Università degli studi di Trento “Monitoraggio della Basilica di San Gaudenzio, analisi ed interpretazione delle misure”; Zanon, Mauro]



2.5.3. MONITORIZACIÓN DE VARIABLES DINÁMICAS

2.5.3.1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS Y TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL

2.5.3.1.1. Notas de la vibración

El estudio de la vibración mecánica, constituye el capítulo especial de la dinámica que es esencialmente el movimiento vibratorio de los sistemas mecánicos de varios tipos. Así que es posible que se produce que un sistema de movimiento vibratorio debe unirse a al menos un miembro que se puede adherir características elásticas, y que el sistema es aplicado por lo menos una fuerza o esfuerzo de torsión constante, no una variable en el tiempo con la ley periódica.

La característica elástica puede encontrarse en la elasticidad del material que compone el sistema o uno de sus miembros, o en el de un solo elemento del sistema mismo; A veces esta característica es la manifestación, cuando sustitutas movimiento, las fuerzas especiales que tienden a restaurar el sistema en la configuración de equilibrio estático. En general, esta función puede siempre resumirse en una constante de resorte, que identifica o un vínculo de fuerza/desplazamiento o una momento torsión/rotación.

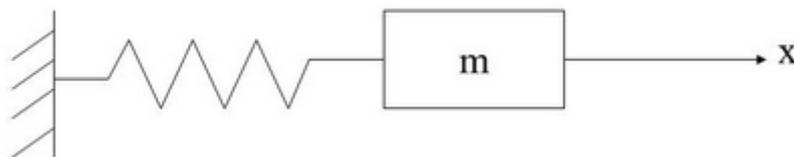


Figura 2.5.3.1.1.1. Esquema de un sistema oscilante.

Tienen que ver con sistemas reales también es necesario tener en cuenta una característica disipativa que está despierta, con el movimiento, las fuerzas que se oponen al movimiento y cuyo efecto es limitar la amplitud del movimiento oscilatorio del sistema: los amortiguadores. El más común es el amortiguador tipo viscoso en el cual las fuerzas de oposición a la moción son proporcionales a la velocidad.

En este caso la función del sistema disipativa es sintetizada en un coeficiente de amortiguamiento viscoso y representa precisamente un vínculo fuerza/velocidad. Que puede ser, sin embargo, aún más especial



cuando la fuerza que se opone a la propuesta depende del cuadrado de la velocidad. Es una característica disipante incluso el efecto de histéresis bucles en material: amortiguación estructural.

Todos estos elementos, las masas, muelles, amortiguadores, conocidos genéricamente como parámetros del sistema. Sistemas reales son generalmente muy complejos que están formados por distintos miembros con características dinámicas principalmente diferentes entre ellos. Sólo el conocimiento de estas características le permite operar la idealización que se llama modelo matemático.

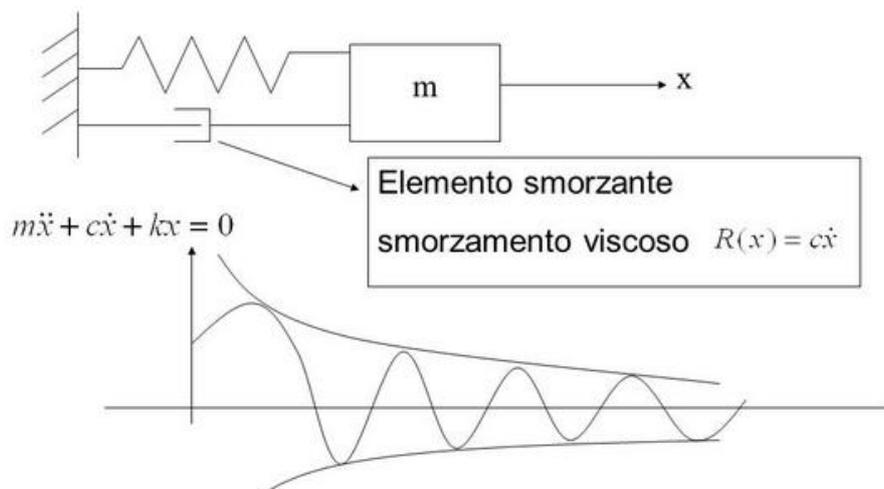


Figura 2.5.3.1.1.2. Modelo de oscilación forzada.

Sin embargo, el sistema está configurado, puedes decir que es sujeto a vibraciones cuando al menos uno de sus regalos una motocicleta cerca de una configuración de equilibrio determinado, movimiento que se repite con las mismas características después de un período de tiempo bien definido.

Esta vez es llamado período $[T]$ de la vibración y, en el caso más simple, es el intervalo de tiempo en el cual una oscilación es completa. Frecuencia de vibración $[f = 1/T]$ es el número de oscilaciones completas por unidad de tiempo y se mide en hercios (Hz); más generalmente es el número de veces que el movimiento del sistema muestra las mismas características en un intervalo de tiempo establecido.

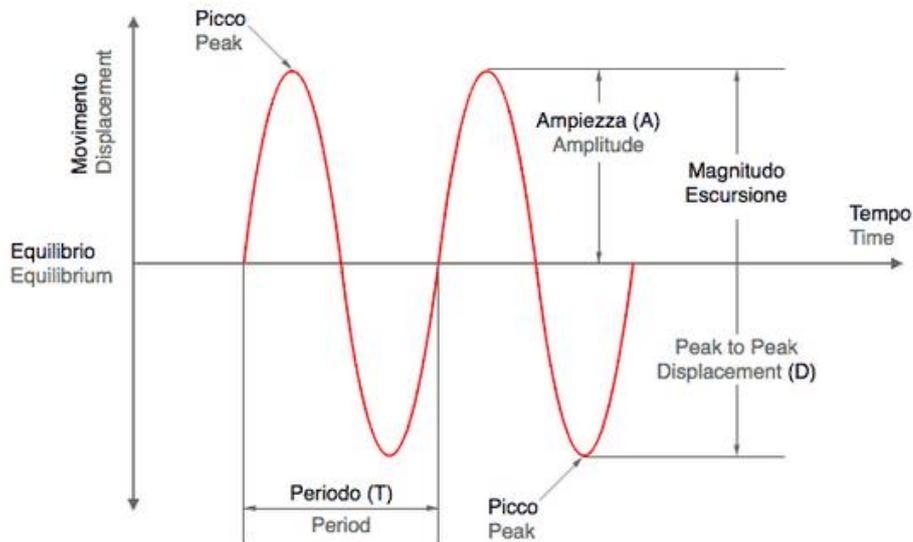


Figura 2.5.3.1.1.3. Ejemplo de vibración, período y amplitud de una onda.

El movimiento vibratorio de un sistema depende, en general, por dos valores especiales de frecuencia: la frecuencia natural (o frecuencia) $[f_n]$ que es la tasa a la cual vibra un sistema que tiene solamente características elásticas y no está sujeta a fuerzas externas f activo (t) ; Frecuencia del excitador (o frecuencia obligada) $[f_f]$ que es que de la acción exterior, $f(t)$, (cuando existe) que actúa sobre el sistema con variabilidad periódica.

Cuando los valores de estas frecuencias se superponen ($f_f = f_n$) tiene la condición de resonancia, que puede ser una exaltación de la amplitud del movimiento vibratorio con posible peligro para la integridad del sistema. Entendemos la importancia de la determinación de la frecuencia natural de un sistema vibratorio.

Una clasificación de vibración conduce a distinguir entre vibraciones libres y vibraciones forzadas: dicese vibración libre de un sistema que, de alguna manera, queda liberado de su configuración de equilibrio estático para oscilar en ausencia de excitadores de acciones externas. Las vibraciones forzadas son las de un sistema bajo la acción de excitadores de acciones externas.

Asimismo, por último, las vibraciones transitorias son aquellos cuya amplitud varía con el tiempo en el caso de vibración libre, o hasta llegar a la amplitud de la vibración, en el caso de vibración forzada. El transeúnte está ligado a la presencia en el sistema de características disipantes (e.g.



amortiguadores), y por lo tanto es una característica de todos los sistemas reales, si están en vibración libre o forzada.

2.5.3.1.2. Técnicas de monitorización estructural

En la ingeniería de estructuras moderna, las técnicas de monitorización dinámicas han adquirido importancia cada vez mayor. Monitorizar las estructuras es seguir un análisis suficientemente completo y preciso capaz de detectar el comportamiento mecánico de las estructuras y al mismo tiempo no penalizar la funcionalidad y eficiencia. En este sentido las pruebas de tipo dinámico asociado con técnicas de identificación estructural, puede desempeñar un papel vital proporcionando más información que los ensayos de tipo estático clásico y luego observando esas señales que indican la aparición de posibles fenómenos de daños o comportamiento anormal.

Debiera definirse cómo llevar a cabo pruebas y técnicas de análisis según el tipo de prueba de estructura y las características que se determinarán. Las técnicas de monitorización dinámicas están divididas sobre la base de ensayos específicos realizados, siendo éste el aspecto que más características introduce, a lo cual sigue un forzante armónico.

a) Uso de la fuerza que lo origina el movimiento sinusoidal a través de una máquina con dos masas excéntricas giratorias (vibrochina).

Varía la frecuencia de la fuerza y detecta la aceleración o velocidad o movimiento, o alternativamente, consigue el diagrama de movimientos a través de una integración doble. La construcción del diagrama de admisión mecánica se hace entonces cuando la frecuencia natural no está situada cerca de su máximo, sino que se encuentran en cuadratura (es decir, escalonada en 90 °).

b) Estrés al azar. Aplicación de excitar al azar debido a la excitación de la fuerza que el viento para estructuras esbeltas, o vehículos de paso para infraestructura vial. Este tipo de emoción tiene la ventaja de no requerir la interrupción del trabajo.

Consiguen el diagrama de turnos y densidad espectral. Luego vienen los "picos" de densidad espectral o alternativamente "cuentan" los picos en el diagrama. Luego se toma directamente la frecuencia desde la "cuenta", es decir, por los picos máximos de densidad espectral. Tomando como ejemplo un viaducto de la carretera y suponiendo que el tránsito de



vehículos constituye un sistema de acciones capaces de excitar a todas las frecuencias posibles de características dinámicas de la estructura de la estructura (frecuencias, modales amortiguación y deformados) puede determinarse examinando la estructural respuesta (estructura aceleración detectada) utilizando técnicas de análisis y tratamiento numérico de digitalizado de señales sin conocer en detalle la acción emocionante. Mediciones dinámicas en condiciones, que se hace referencia en este tipo de investigación, para obtener un número significativo de información.

Parámetros mecánicos estimados utilizando esta metodología permite:

- determinar las propiedades elásticas de la estructura (tenga en cuenta la geometría del sistema y luego de la Misa);
- identificar la estructura con un modelo teórico, validado a través de la comparación con los resultados experimentales;
- evaluar el comportamiento real de las restricciones y eficiencia;
- identificar cualquier comportamiento, "inserciones del síntoma de daño local;

c) Fuerza impulsiva (a partir de una configuración deforme). Se aplica un pulso o empuje a tu sistema desde una condición inicial perturbada por la estructura de balanceo y registrando el desplazamiento o aceleración. El estudio de la densidad espectral de la función es la frecuencia natural y la amortiguación del factor de estructura. Entonces puede obtener el valor del factor de amortiguamiento del sistema.

Un proceso aleatorio o estocástico se caracteriza por la llamada "densidad espectral" (energía) del proceso. Artículo principal: el concepto de densidad espectral que necesitamos para pasar a través de la descomposición de la señal en la serie de Fourier, o llegar a descomponer una señal en un "Resumen" de las sinusoides con diferentes frecuencias y amplitudes diferentes. El vector de las amplitudes de funciones sinusoidales dará cuenta del contenido de frecuencia de la señal. Si la descomposición produce un número infinito de sinusoides pase por una suma de integral (integral de Fourier) y un vector de anchos para una función continua que es en realidad la función de densidad espectral.

Una función de densidad espectral, llevando una serie de picos indica que el contenido de frecuencia de la señal tiene algunas frecuencias dominantes (picos) que son en su mayoría el proceso varianza.

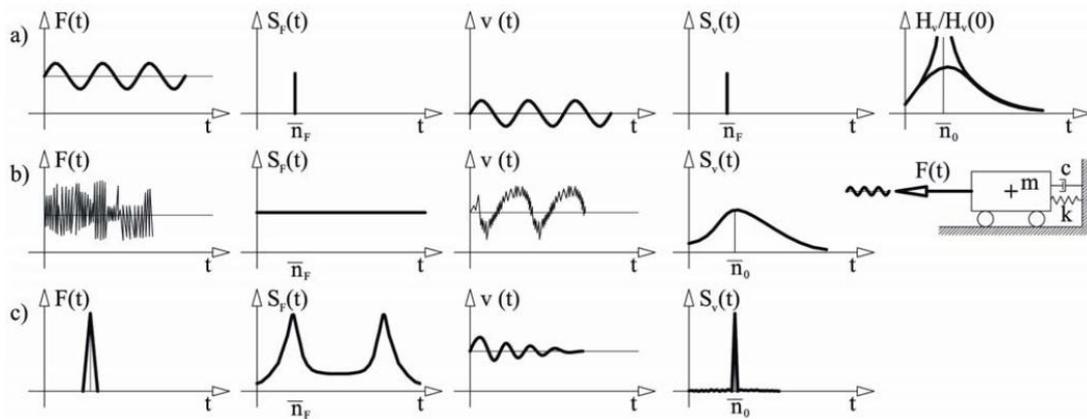


Figura 2.5.3.1.2. Esquema de la técnica de monitorización.

La frecuencia natural está ligada directamente a la rigidez del sistema y su anomalía en comparación con los resultados experimentales destaca cualquier anomalía y la rigidez del sistema que puede ser causado por la degradación. La monitorización de la frecuencia natural da cuenta de la "salud del sistema" y sus variaciones pueden ser vinculadas a fenómenos de degradación estructural. Lo mismo puede decirse del parámetro que se relaciona también con la posible degradación de los Estados del sistema de amortiguación.

En la Figura 2.5.3.1.2 se muestra en forma esquemática las técnicas de monitoreo y se denota por $F(t)$ la intensidad de la fuerza varía con el tiempo, con densidad espectral fuerza $S_F(t)$ con intensidad de $v(t)$ de la velocidad con $S_v(t)$ el espectro de velocidad y $H_v(t)$ la admisión mecánica (el sentido de que se discute en el apéndice) y su índice de n_0 . [Salve]



2.5.3.1.3. Notas sobre la dinámica estructural

En el ámbito de la ingeniería estructural se acostumbra a identificar una estructura a partir del conocimiento de las características espaciales, es decir la distribución de masas, materiales constituyentes, de la geometría y las condiciones de apoyo, que se determinan de manera unívoca (en el caso del análisis elástico-lineal) comportamiento dinámico bajo ciertas acciones externas o desplazamientos impuestos.

Esto generalmente ocurre a través de la integración de ecuaciones diferenciales, que imponen las condiciones de equilibrio estático o dinámica y congruentes. Este punto de vista sobre sistemas estructurales no es la única manera que conduce a la identificación de comportamiento dinámico de estructuras; Esa no es el único punto de partida para llegar a la supuesta identificación dinámica de una estructura. Este procedimiento se basa en el supuesto modelo espacial y dirigida a resolver el problema estructural, conocidas las matrices que definen el comportamiento del sistema estructural discretizado, que es visto por el clásico esquema de sistemas de N grados de libertad. Es implica la determinación de las matrices de masa [M], rigidez [K] y amortiguación [C], que se reunieron en la ecuación de equilibrio dinámico:

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + Kx = f$$

Por la ecuación homogénea asociada es posible resolver un problema, encontrar el valor propio N frecuencias, amortiguadores y sistema N forma modal (modos de vibración). Esta lista que es definida como modelo modal, identifica la estructura desde un punto de vista dinámico. Otro paso que es posible llevar a cabo es derivar el modelo denominado respuesta, que identifica el comportamiento de nuestra estructura dinámica en términos de respuesta dinámica (desplazamientos) para unidad de alimentación externa, en el dominio de la frecuencia.

Esto crea una función llamada su hija de respuesta (FRF) (ω), ordenado en una matriz N x N cuyos movimientos son la respuesta dinámica en el grado de libertad la unidad i-ésimo forzado bajo un grado de libertad en el j-ésimo. (Pavía) La mecánica del sistema puede analizarse utilizando la segunda ley de Newton y el principio de la d ' Alembert, afirmando que cada sistema está siempre en equilibrio bajo la acción de fuerzas activas, $f(t)$, reactiva los $\Phi(t)$ y fuerzas inerciales $-m * a(t)$.



$$\{F(t)\} + \{\Phi(t)\} - m\{a(t)\} = 0$$

Donde m y $\{a(t)\}$ son masas y aceleración respectivamente del sistema material. Para un patrón continuo, por ejemplo, la ecuación se convierte en:

$$\int_V \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\rho(x, y, z, t) \{v(x, y, z, t)\}) dV = \int_V \{f_v(x, y, z, t)\} dV + \int_S \{f_s(x, y, z, t)\} dS$$

Como $\rho(x, y, z, t)$ y $v(x, y, z, t)$ densidades de masa respectivamente y el desplazamiento de cualquier punto de un cuerpo y los otros dos términos este lado de la misma fuerza por unidad de volumen o por la actuación del área de unidad en el cuerpo, V el volumen ocupado por la superficie externa del sistema. En general no es posible encontrar soluciones analíticas de la ecuación, con excepción de las estructuras muy simples y alto precio simplificación hipótesis sobre la naturaleza del vínculo de asociación y de la magnitud de las deformaciones y desplazamientos.

Sin embargo como la teoría de medios continuos las estructuras pueden ser discretizadas, por ejemplo mediante la técnica de elementos finitos. Así las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento, se reducen a los sistemas de ecuaciones algebraicas, cuya solución se aproxima a la solución más exacta donde la discretización utilizada es más densa. Con la notación de matriz, la ecuación del movimiento amortiguado estructura que no escribiste:

$$[K]\{u(t)\} = \{f\}$$

Donde $[K]$ es la matriz de rigidez, $u(t)$ valor de desplazamientos y f es la fuerza aplicada. Si las fuerzas aplicadas son las de inercia, entonces se desprende que:

$$\{f\} = -[M]\{\ddot{u}(t)\}$$



Donde $[M]$ es la matriz de las masas. Sustitución de estas fuerzas de inercia obtienes la ecuación de un sistema no se ve obligado a masas concentradas.

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\}$$

Esta ecuación se relaciona con el movimiento libre y no forzado de un sistema con muchos grados de libertad: el caso más general del movimiento forzado de un sistema disipativo se obtiene con las generalizaciones obvias. La presencia de la acción exterior implica agregar un término $F(t)$ representante de las notas de la acción exterior, mientras que los efectos de disipación son tenidos en cuenta por introducir un término $[C] \dot{u}(t)$, producto de una matriz $[C]$ llamado amortiguación de velocidad. Así que se tiene:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t)\}$$

Sistemas discretos de la matriz de las masas $[M]$ es una diagonal llamado (matriz agrupan masa) cuyos elementos distintos de cero son masas concentradas, asociadas con sus respectivos grados de libertad. Este modelo representa a menudo una aproximación aceptable para los sistemas continuos discretizadas. En este caso los términos diagonales de la matriz de las masas se forman con los valores resultantes de las masas distribuidas asociadas a cada nodo según el criterio de influencia adoptado. Este procedimiento no es siempre aceptable, ni usted siempre puede ignorar el hecho de que la masa distribuida está asociada con más de un grado de libertad. En el contexto del método de elementos finitos, por ejemplo, siendo el campo de desplazamiento en un continuo $u(x, y, z, t)$ expresada como:

$$\{u(x, y, z, t)\} = [N(x, y, z)]\{u_0(t)\}$$



Donde $N(x, y, z)$ indica una matriz de interpolar funciones y $0(t)$ el vector de desplazamientos nodales:

$$\{f\} = -[M]\{\ddot{u}(t)\}$$

Se convierte en:

$$\{f\} = -\left(\int_V \rho(x, y, z) [N(x, y, z)]^T [N(x, y, z)] dV \right) \{u_0(t)\}$$

Donde:

$$[M] = \int_V \rho(x, y, z) [N(x, y, z)]^T [N(x, y, z)] dV$$

Es la matriz consistente a las masas (matriz de masa constante), del sistema discretizado.

Más difícil es determinar la matriz de amortiguamiento $[C]$. Capacidad de estructuras disipativas, de hecho, depende de muchos factores que no son sin embargo claramente entendidos; por esta razón no es generalmente posible construir la matriz $[C]$ de la geometría de la estructura y características de los materiales, de manera similar a la utilizada para calcular las matrices de rigidez y masa.

Generalmente los amortiguadores de los valores de asignación de estructuras a nivel mundial, basado en los resultados experimentales medidos en estructuras similares. Los métodos por los cuales se puede medir la amortiguación de una estructura (por ejemplo sobre la base de la amplitud de oscilación libre de caries, o la amplitud de la respuesta resonante), lo que se conoce, son por lo general, los valores de ξ , humedece las proporciones pero no los elementos de la matriz $[C]$.



Generalmente se asume que la matriz $[C]$ es expresable como una combinación lineal de las métricas $[M]$ y $[K]$.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

Con adecuados coeficientes α y β . En este caso $[C]$ se llama matriz de amortiguamiento proporcional. Es posible demostrar que si la matriz de amortiguamiento es de este tipo, el amortiguamiento ξ proporciones puede ser expresado como:

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right)$$

Donde ω es la frecuencia de las oscilaciones libres y no el amortiguamiento del i -ésimo modo, configuración espacial particular asociado con la frecuencia mediante el problema de los autovalores que se mostrarán ampliamente en adelante. Puesto que la matriz $[C]$ depende solamente de los dos coeficientes α y β , es posible configurar los valores de las tasas de amortiguación de sólo dos caminos que otros son automáticamente determinados.

[L. Nardini, Smartstructures.org]

2.5.3.2. ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL

2.5.3.2.1. Introducción

Con análisis modal experimental (prueba de modal) se hace referencia al proceso, incluyendo la adquisición de datos y posterior análisis, señalando a los componentes o estructuras con el fin de obtener una descripción de su comportamiento dinámico o vibración.

Las técnicas de análisis modal experimental permiten obtener información sobre el comportamiento dinámico de una estructura, en este caso los valores de resonancia pulso w_i , modal amortiguación factores ξ_i y formas modales Y_i . Consisten en la medición de la respuesta del sistema a una excitación conocida.



Básicamente se aplica un pulso fuerza w , en un punto de la estructura y medir la respuesta, entendida como desplazamiento, velocidad o aceleración, en otro punto j . Esto crea una función compleja $H_{ij}(w)$ en la variable w , que representa la función de respuesta de frecuencia en el punto, también conocido como F.R.F. repetir las mediciones en puntos diferentes de la estructura tienes la matriz de respuesta de frecuencia H , de la cual se puede derivar el comportamiento dinámico de la estructura.

Las distintas técnicas analíticas se diferencian por excitación del tipo de estructura, número de puntos de emoción, o por métodos de extracción de parámetros modales. Sobre el tipo de emoción, hay dos categorías principales.

El primero incluye las excitaciones al azar tipo e impulsivo, que necesitan para la extracción de parámetros modal utilizando técnicas de análisis FFT. El segundo incluye las excitaciones de tipo sinusoidal en cambio con que se obtiene una buena calidad de petición FRF, que debe ser construido para puntos con la ayuda de un software. El último método se utiliza para el estudio de la no linealidad en el comportamiento de la estructura.

Otra diferencia entre los métodos utilizados es dada por el número de puntos de excitación. Aunque el uso de un único punto de excitación es más fácil, usando múltiples puntos de excitación simultánea le permite distribuir más equitativamente la energía en la estructura, dando lugar a una respuesta más suave y elimina la posibilidad de perder su visualización de formas si éstos están entusiasmados en sus nodos.

Luego llegamos a la definición de un modelo matemático que puede tener las aplicaciones más dispares. Casi siempre se compromete a aplicar la acción dinámica nota, armónica o impulsiva, a menudo fuera de su ámbito normal de servicio.

2.5.3.2.2. Aproximación a las técnicas de análisis modal experimental

En la última década el análisis modal y las pruebas dinámicas se han convertido en una herramienta fundamental en el proceso de diseño de sistemas mecánicos y estructuras civiles. La clásica prueba modal es la aplicación de técnicas de análisis modal Experimental (Análisis Modal Experimental, EMA) y generalmente se lleva a cabo en el laboratorio.



En este caso, la estructura se hace vibrar por excitación externa (determinista), típicamente aplicada mediante un agitador electrodinámico. El acelerómetro lee la señal adquirida en diferentes puntos de la estructura es curva post-procesamiento mediante montaje de técnicas que permiten para alcanzar las expresiones analíticas de la respuesta función de la frecuencia (función de respuesta de frecuencia, FRF); Por lo tanto habla de modal análisis input-output. Análisis modal técnicas ahora están aumentando la aplicación en el campo de la ingeniería: de hecho, aunque el advenimiento de las computadoras modernas, caracterizado por la cada vez más alto rendimiento, permite la creación de patrones muy complejos, elementos finitos para analizar las propiedades estáticas y dinámicas de las estructuras, sucede a menudo que las propiedades dinámicas calcularon por análisis de elementos finitos para diferir de la realidad actual.

Esta diferencia es atribuible a varias causas:

- Análisis de elementos finitos que se basa en una discretización de la realidad, lo que significa que el localizador campos se aproximan a través de funciones predefinidas forma dentro de cada tema.
- Mientras que las propiedades de masa y rigidez son evaluadas en base a las propiedades del material y la geometría de los elementos, es mucho más difícil mantener debidamente en cuenta las propiedades de amortiguación de la estructura dentro de la plantilla: de hecho, amortiguamiento estructural está relacionado no sólo con las propiedades del material sino también a un número de otros mecanismos que son difíciles de modelar analíticamente (apertura y cierre de grietas en concreto, interacción con elementos no estructurales, etc.).
- La geometría real puede ser diferente a la considerada en el modelo. Para cerrar la brecha entre la estructura real y modelo es necesario, pues, utilizar técnicas experimentales con el fin de comparar los resultados del modelo con los obtenidos de las medidas. Para superar la diferencia entre la estructura real y modelo es necesario utilizar técnicas experimentales con el fin de comparar los resultados del modelo virtual con datos obtenidos experimentalmente mediante técnicas de monitoreo dinámicas. Este paso crítico permite afinar el modelo virtual para que sea más adherente a la realidad.

El procedimiento dirigido a comparar las necesidades, para su desarrollo e implementación, de un pozo establecido instrumentos:



- Respuesta estructural obtenida a través de la monitorización dinámica basada en excitaciones del medio ambiente dinámico estructura que ocurren durante el período de observación.
- Señal (evolución de desplazamientos, velocidades y aceleraciones durante la duración del evento emocionante) y espectros de aceleración de un impulso genérico que encontramos en la base de la estructura bajo consideración.
- Software para el análisis estructural estático y dinámico, lineal y no lineal de elementos finitos.

Una vez en posesión de la gama de accesorios anteriormente descritos debe seguir en el procedimiento:

- Discretización en software FEM, edificio objeto de análisis en plena conformidad con las características físicas y geométricas de las cargas con el fin de obtener un modelo virtual perfecto de la estructura bajo consideración
- Lectura de la señal y el espectro de aceleración de los datos adquiridos por una unidad acelerométrica para compartir piso. Construcción lleva a cabo mediante la devolución a través de software de decodificador de datos gráficos detectado por las señales de los sensores y entrada del espectro de manera apropiada en el software y la verificación de la respuesta estructural del modelo virtual tras la excitación ambiental traducida.
- Evaluación de los parámetros cinemáticos (desplazamientos y aceleraciones) detectadas para cada nodo de la virtual del modelo estructural. En particular, evaluar la respuesta estructural en términos de viajes, para todos los modos de vibrar y combinación de carga para corregir errores de entrada hechas por discrepancias en el tamaño de orden-parámetro
- Comparación de las aceleraciones medido en los puntos de aplicación de sensores en el edificio, como consecuencia del evento registrado, con modelo virtual de aceleraciones nodo calculado (correspondiente a la aplicación de sensores) siguiendo el mismo evento simulado correctamente. Si el paso 5 devuelve un resultado positivo, entonces es posible asumir que el procedimiento se ha realizado correctamente.

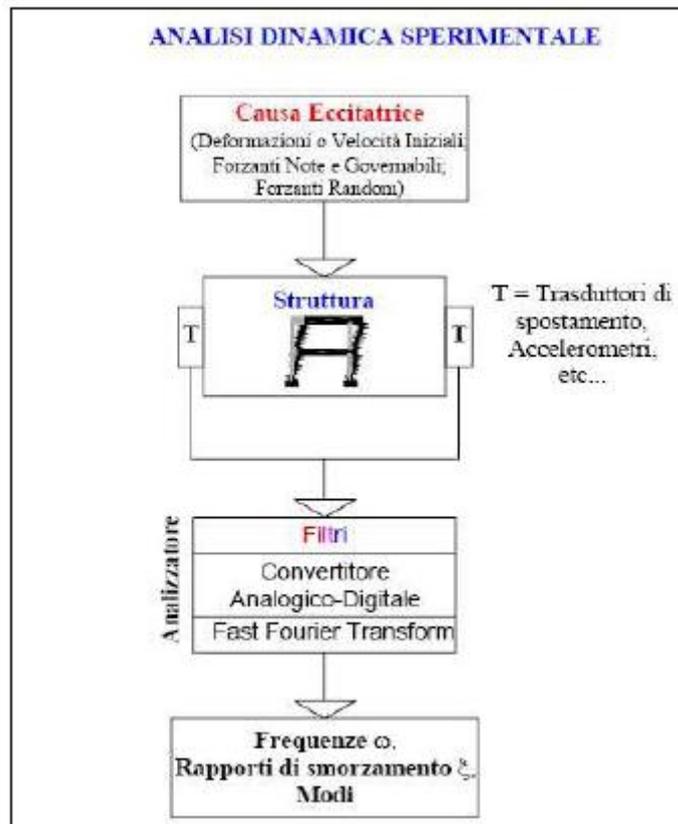


Figura 2.5.3.2.2. Proceso de identificación experimental.

2.5.3.2.3. Análisis modal experimental (EMA)

La determinación del comportamiento dinámico de sistemas lineales por medio de pruebas experimentales se denomina análisis modal experimental (EMA): Estos procedimientos permiten de identificar las propiedades dinámicas de la estructura en términos de frecuencias naturales, relaciones de apagamiento, y formas modales; los parámetros así determinados se utilizan entonces para construir un modelo matemático del comportamiento dinámico de la estructura.

Aunque sea más correcto distinguir entre el análisis modal en el caso de la excitación forzada y análisis modal en el caso de la excitación natural, es habitual referirse primero a la expresión "análisis modal experimental", cuya sigla es EMA (Análisis Modal Experimental) y utilizar la definición de "análisis modal operacional" en referencia a la segunda, en este caso hablamos de la OMA (Análisis modal operacional).



Los procedimientos de análisis modal experimental, se basan en una entrada conocida: las estructuras, de hecho, por lo general se excitan por medio de la explotación de una o más fuentes de excitación; se procede, a continuación, a medir la respuesta estructural de uno o más puntos. Es posible, por lo tanto, identificar los parámetros modales de la función de respuesta de frecuencia de la señal de respuesta a la señal de la entrada.

La identificación de los parámetros modales de la estructura efectuada a partir de las historias temporales de aceleración presenta una serie de criticidades. La técnica de identificación tradicional (análisis modal experimental EMA) consiste en un esfuerzo conocido a la estructura que puede ser efectuado por ejemplo a través de sistemas de excitación inerciales. [Redaelli]

Conocida la entrada, las técnicas de análisis modal y experimental permiten reconstruir la función de respuesta en frecuencia de la estructura en algunos de sus puntos para obtener una estimación precisa de los parámetros modales que la caracterizan. En las últimas décadas, el análisis modal y la prueba dinámica se han convertido en una herramienta esencial en el proceso de planeamiento de sistemas mecánicos y estructuras civiles. La prueba modal clásica consiste en la aplicación de las técnicas de análisis modal experimental (experimental Análisis Modal, EMA) y generalmente se lleva a cabo en el laboratorio.

En este caso la estructura se hace vibrar por excitación externa conocida (enfoque determinista), aplicado típicamente por medio de un coctelera electrodinámica. La señal acelerométrica adquirida en diferentes puntos de la estructura es post – procesado utilizando la curva de las técnicas de montaje que le permiten llegar a las expresiones analíticas de las funciones de la respuesta en frecuencia (función de respuesta en frecuencia FRF); se habla entonces de modal de análisis entrada – salida.

[Tesi di laurea “monitoraggio sismico e identificazione con sensori Mems di un edificio della protezione civile” UniBo]

2.5.3.2.4. Análisis modal operacional (OMA)

Este enfoque sin embargo, no puede ser adoptado para la monitorización permanente, por el hecho de que eso implica la aplicación de una fuerza conocida que no puede efectuar continuamente. Entonces tenemos que recurrir al análisis modal operacional (OMA) que permite una estima de los parámetros modales, simplemente midiendo simplemente la



respuesta de la estructura delante de una fuerza desconocida similar al ruido blanco en la banda de frecuencia de interés.

Con respecto a las estructuras civiles la excitación se produce a través de la interacción de la estructura con el viento y a través del tráfico ciudadano, que producen de tal manera un esfuerzo continuo permitiendo ejecutar el análisis con continuidad. La desventaja es que la precisión del algoritmo con la cual se estiman los parámetros modales es menor en comparación con las otras técnicas.

De hecho, hay varias fuentes de variabilidad que contribuyen a la dispersión de los resultados. En particular, en este trabajo se tiene en cuenta la variabilidad inherente del método de identificación.

El análisis modal operacional (OMA) resulta útil para estudiar la respuesta dinámica de una estructura en las condiciones de funcionamiento. De hecho, se basa sobre el análisis de las solas señales de salida del acelerómetro, a través de los cuales deriva el nombre de la salida sólo análisis modal. Las señales se utilizan para el cálculo de las funciones de densidad espectral de potencia (densidad espectral de potencia, PSD). Estas están post- procesadas utilizando las mismas técnicas para la extracción de los parámetros modales (frecuencias naturales, formas modales y amortiguamiento de los coeficientes) se aplica a la FRF en el caso de la EMA.

Hablando de las grandes estructuras civiles e industriales, EMA es de muy complicada realización porque no se tiene que descuidar el problema de la excitación de la estructura. En cambio la excitación del medio ambiente, por lo general producida por el viento (en el caso de puentes, edificios o torres), del mar (en el caso de las plataformas off-shore), y la acción aerodinámica (en el caso de las aeronaves en vuelo) es generalmente adecuada para la aplicación de las técnicas de OMA, ya que asume una andadura poco diferente que aquella de ruido blanco. Este último es un tipo particular de ruido, caracterizado por la ausencia de periodicidad en el tiempo y por una amplitud constante en todo el espectro de frecuencias. El análisis modal llevado a cabo en este caso es desconocido, se llama Análisis Modal Operacional.

Procedimientos clásicos OMA tal como EMA, sirven para evaluar las frecuencias naturales, las relaciones de amortiguación y los medios naturales de la estructura; Sin embargo, también es posible calcular los factores de participación modal siendo la entrada desconocida. El Análisis modal operacional se puede aplicar no solo en los casos en los



cuales resulta difícil y costoso excitar económicamente el dinámico de masas, como por ejemplo puentes y edificios, con los medios tradicionales de análisis modal experimental clásico es estructuras aplicadas, sino prácticamente en todos los casos típicos de ingeniería civil.

2.5.3.2.5. Análisis modal: comparaciones, finalidad y usos

La ejecución de un análisis modal consiste en la construcción de las siguientes operaciones:

- Planificar y ejecutar experimentos: los experimentos están programados a la base de una información conocida a priori con respecto a los intervalos de frecuencia, los lazos modales, la accesibilidad de los puntos de medida. Siendo el número de sensores estrechamente relacionados con los recursos financieros disponibles, es muy importante colocar un número mínimo de dispositivos en la estructura al fin de obtener toda la información necesaria. Para lograr ese objetivo, es necesario tener a priori una idea aproximada de las formas de los modos propios que se tienen que individuar. En la mayoría de los casos, la medida de la respuesta se limita a la identificación de los modos fundamentales de vibración y la evaluación de la amplitud de las respuestas de la estructura en lo general. En presencia de edificios no simétricos, o sometidos a una carga asimétrica, se tienen que proporcionar instrumentos de medida para detectar los modos de vibración de torsión del edificio en cuestión.
- Elaborar los datos y determinar los parámetros modales.
- Validación de los modelos modales: Los resultados de análisis modal a continuación, se pueden utilizar para diferentes propósitos: vigilancia de la salud estructural, la detección del daño estructural y el estudio de su evolución, modelo actualizado. El análisis modal experimental basado en la aplicación de una entrada conocida a la estructura es factible con dificultad en el caso de grandes estructuras (por ejemplo, puentes). El análisis modal operacional, sin embargo, le permite tomar ventaja de ruido ambiental para la identificación estructural, evitando así el uso de equipos especiales (vibrodyne, martillo instrumentado, excitadores electrodinámicos o hidráulicos) que excitan la propiedad. Esto se traduce en una serie de ventajas:



- La prueba es rápida y económica, puesto que no se necesita ningún equipo para la excitación de la estructura.
 - Las medidas se llevan a cabo en condiciones reales de funcionamiento de la estructura por que los parámetros modales obtenidos son representativos del comportamiento dinámico de la estructura en sus condiciones reales de uso.
 - La evidencia no interfiere con la operación de la estructura (de modo que, por ejemplo, no es necesario para cerrar un puente al tráfico cuando ese último viene evaluado). La exactitud de los resultados proporcionados al análisis modal operacional puede, sin embargo, invalidar si al ruido blanco se superpone la excitación no casual. [Fabbroncino, Rainieri, Verderamo]
- También es posible identificar formas modales cercanas.
 - Resulta posible la utilización de la monitorización estructural y la ubicación de los daños.

2.5.3.2.6. Fundamentos del análisis modal

2.5.3.2.6.1. Sistemas de un grado de libertad: oscilaciones libres

Un sistema dinámico lineal con un grado de libertad se define, como ya se dijo, por una masa m , un K de rigidez y amortiguamiento constante c . La ecuación de la dinámica a ella asociada, definida como la coordenada $x(t)$, en el caso del sistema no se ve obligada, es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Kx = 0$$

La solución general de la ecuación diferencial está dada por:

$$x(t) = X e^{st}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior y excluyendo la solución trivial, se obtiene la solución de la ecuación característica:



$$s_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$$

Por lo tanto la solución general de la ecuación homogénea es:

$$x(t) = C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t}$$

Introducimos ahora el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia natural de oscilación:

$$\xi = \frac{c}{2m\omega_n}, \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ahora distinguimos tres casos:

- Coeficiente de amortiguamiento > 1 : raíces reales, sistema sobreamortiguado, no hay oscilaciones.
- Coeficiente de amortiguamiento $= 1$: raíz única, sistema crítico, hay oscilaciones.
- Coeficiente de amortiguamiento < 1 : las raíces complejas, sistema subamortiguado, oscilaciones amortiguadas.

El último estudio de casos es de interés debido a que son las aplicaciones más comunes de las estructuras civiles. La solución del sistema, entonces toma la forma siguiente:

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[x(0) \cos(\omega_d t) + \frac{\dot{x}(0) + \xi\omega_n x(0)}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\omega_d t) \right]$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$



2.5.3.2.6.2. Oscilaciones forzadas: tipos de señales

Distinguiamos ahora los tipos de señales que determinan el forzamiento. Se pueden tener las primeras señales: deterministas y aleatorias. Las primeras se pueden describir por una expresión analítica de su amplitud, como una función del tiempo, que para las últimas no es posible. Las señales aleatorias se caracterizan por el análisis de sus propiedades estadísticas, y pueden ser clasificadas como estacionarias, es decir, que tienen propiedades estadísticas constantes en el tiempo, o no estacionarias. Las señales deterministas, sin embargo, pueden ser periódicas o no periódicas, las primeras se repiten después de un intervalo T de ese período.

Las señales armónicas son señales periódicas especiales, que se caracterizan por una expresión analítica del tipo sinusoidal. Las señales no periódicas (transitorios) son señales que duran por un período corto, y que, una vez silenciada, se convierten en señales periódicas. A continuación se muestra un resumen de los diferentes tipos de señales dinámicas.

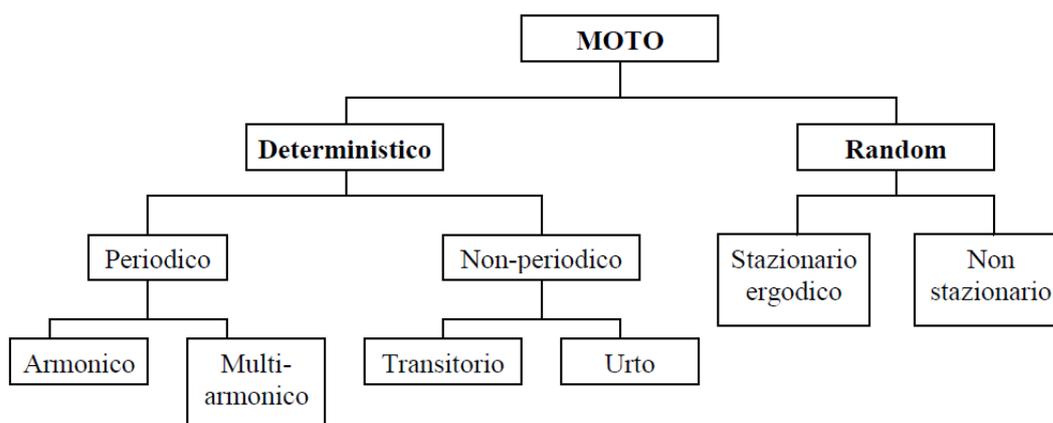


Figura 2.5.3.2.6.2.1. Tipos de señales dinámicas.

Entre los movimientos oscilatorios determinísticos y periódico están, por ejemplo, las vibraciones generadas por las máquinas. Entre los movimientos aleatorios con características de tipo estacionario, sin embargo, las olas, el viento o el cambio en la elevación debido a irregularidades en los perfiles de la carretera de asfalto. Entre los fenómenos cubiertos por choques no periódicos en diversas formas o



vibraciones que se producen en el arranque transitorio o el apagado de las máquinas.

Vibración de solapamiento determinista, vibración generalmente al azar, que puede considerarse como ruido. Las señales de vibración, deterministas o aleatorias, por lo general tienen múltiples componentes armónicas que tienen diferente frecuencia y fase; la representación de una vibración en el dominio del tiempo sólo permite estimar algunos parámetros de síntesis (pico, pico a pico, RMS, etc...) y el análisis de frecuencia es indispensable para ser capaz de estimar la contribución de los armónicos individuales. Las vibraciones inducidas por la excitación del medio ambiente preliminarmente se propagan a través del suelo, por consiguiente, sometido a filtrado de fenómenos, la reflexión y la refracción, y, a continuación, a través de los cimientos llegan a la superestructura.

Por lo general, la excitación del medio ambiente está representada por un ruido blanco, este es un tipo especial de ruido caracterizado por la ausencia de periodicidad y amplitud constante en todo el espectro de frecuencias.



Figura 2.5.3.2.6.2.2. Espectro de un ruido blanco.

Las mediciones de vibraciones se pueden realizar con diferentes métodos y propósitos:

- Medida del nivel de vibración: el nivel se detecta la vibración de un sistema mecánico para evaluar los esfuerzos mecánicos inducidos.
- Medida de la excitación: las fuerzas o momentos que están medidos pueden constituir forzamientos, es decir, las acciones que aplicadas a un sistema capaz de vibrar la pusieron en vibración.



- Medida de la respuesta de un sistema de excitación nota: este tipo de medida se lleva a cabo para identificar experimentalmente la función de respuesta de frecuencia de un órgano o sistema de órganos y para estimar las frecuencias y modos de vibración (Experimental Modal Analysis).

[Tesi di laurea “monitoraggio sismico e identificazione con sensori Mems di un edificio della protezione civile” UniBo]

2.5.3.2.6.3. Forzante armónica

Se propone, en primer lugar, una solución en el caso de un forzante armónico. La ecuación de la dinámica ahora es la siguiente:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Kx = f(t)$$

$$f(t) = Fe^{i\omega t}$$

Consideramos una integral particular del tipo:

$$x(t) = \bar{X}e^{i\omega t} \quad , \quad \bar{X} = Xe^{i\theta}$$

Sustituyendo en la segunda ecuación damos con la solución particular:

$$x(t) = \frac{F}{\sqrt{(k - \omega^2 m)^2 + (\omega c)^2}} e^{i(\omega t + \theta)} \quad , \quad \tan \theta = \frac{-\omega c}{k - \omega^2 m}$$

Consiste en una función armónica de amplitud constante, así como el forzamiento, denominada solución estacionaria. La solución completa se obtiene mediante la superposición de los efectos de:

$$x(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[x(0) \cos(\omega_d t) + \frac{\dot{x}(0) + \xi\omega_n x(0)}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\omega_d t) \right] + \frac{F}{K} \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} e^{i(\omega t + \theta)}$$



$$\beta = \frac{\omega}{\omega_n}$$

Esta relación sugiere que, después de un breve momento en la que se expresa la parte relativa a las oscilaciones amortiguadas libres, para controlar el movimiento en casi su totalidad es la parte estacionaria (derivado de forzamiento) que describe la oscilación armónica constante en amplitud y fase desplazado por θ (fase) con respecto a la forzante. Por tanto, la parte no estacionaria se deja de lado en las siguientes especulaciones. En el caso donde β es igual a 1 hablamos de "resonancia".

El desplazamiento de fase de la respuesta (retardo) aumenta a medida que lo hace la relación β , que tiende al límite superior de -180° . Se introduce una forma temprana de la función de respuesta de frecuencia (FRF), la relación entre la respuesta de estado estacionario y el forzamiento.

[Tesi di laurea specialistica UniPavia "Sviluppo e applicazione di algoritmi per l'identificazione dinamica e il rilevamento del danno delle strutture civili"]

2.5.3.3. TÉCNICAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DINÁMICA

2.5.3.3.1. Aspectos generales

En el contexto de la ingeniería estructural se ha utilizado para identificar una estructura únicamente desde el conocimiento de sus características espaciales, es decir, la distribución de las masas de las ataduras de los materiales que lo componen, la geometría y condiciones de contorno, que determinan de forma inequívoca (en caso del análisis lineal elástico) el comportamiento estático o dinámico en virtud de una determinada acción o desplazamiento externo.

Esto, en general, es a través de la integración de las ecuaciones diferenciales, que imponen las condiciones de equilibrio y la consistencia de los movimientos estático o dinámico. Este proceso es típico de la dinámica estructural, sin embargo, puede ser recorrido hacia atrás. Es de hecho, posible a partir de la respuesta del modelo, alcanzando el modelo espacial, pasando por lo modal. En particular, el primer paso, es



decir, la derivación del modelo modal, a partir de la respuesta, se define la identificación dinámica. Es un procedimiento poco habitual en el campo de la ingeniería estructural, pero se ha afianzado en las últimas décadas gracias a los avances en el campo de la adquisición y el procesamiento de la señal digital.

La identificación dinámica, o identificación modal, por lo tanto, consiste en la determinación de frecuencias propias o naturales, la forma y amortiguación modal de una estructura excitada por un forzamiento, conocido o no, de la respuesta dinámica, medida por los dispositivos adecuados tales como acelerómetros, transductores de desplazamiento, etc. La transición de un modelo de espacio entre modos de transporte, por lo tanto conduce a la determinación de la matriz que gobierna el problema:

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + Kx = f$$

Esta práctica, junto con el análisis de la dinámica clásica, llevada a cabo por modelos de elementos finitos, que también pueden ser dirigidos a la calibración de la misma.

[Tesi di laurea specialistica UniPavia “Sviluppo e applicazione di algoritmi per l’identificazione dinamica e il rilevamento del danno delle strutture civili”]

2.5.3.3.2. Procesamiento de señales

Con el término genérico de procesamiento de señales se refiere a todo el ámbito de la ingeniería de sistemas, ingeniería eléctrica y matemáticas aplicadas que se ocupa de las operaciones en señales o análisis de los mismos, o la medida de variables físicas en el tiempo o en el espacio.

En el presente caso, el conjunto de operaciones y técnicas matemáticas numéricas que existen entre la observación de un análogo actual (cambio en la respuesta dinámica o la excitación de una estructura) y la determinación hecha en términos de contenido de frecuencia, los espectros y otras características de la misma, con el fin de producir los datos necesarios para la próxima fase de identificación real dinámico.



En el contexto de análisis modal, el análisis de la señal juega un papel importante, y es bueno que se lleva a cabo con precisión, porque un resultado inexacto afectará a cualquier procedimiento de identificación anterior. El procesamiento de la señal, de hecho, presenta muchos obstáculos, en particular con respecto a los errores debidos a aproximaciones inevitables en el paso de la teoría a la aplicación y las matemáticas numéricas a las situaciones reales, que están a menudo lejos de la ideal, supone en la teoría. Estos inconvenientes deben ser evitados mediante el uso de varias precauciones.

En concreto, la columna vertebral de estas prácticas es el algoritmo de la FFT (Fast Fourier Transform), que le permite cambiar a una señal digital en el mismo espectro de frecuencia, con costos computacionales bajos. Sin embargo, su validez es cuestionada por algunos errores, como aliasing, el leakage y el error de cuantificación, que deben ser mitigados por el uso de artificios matemáticos y tecnológicos, los cuales, en el pasado, señalan filtrado. El resultado al que se pretende, a través del análisis de la señal, para el análisis modal, es la determinación de la tendencia de la función FRF de respuesta de frecuencia y la eventual determinación de la función de respuesta a un impulso de IRF.

El procedimiento, en términos de contenidos, se presenta de la siguiente manera: la conversión en una digital de los señales analógicas, después de la filtración; extracción de espectros lineales usando el algoritmo FFT, después de la aplicación del sistema de multiplicadores especiales dicha “window function”, la extracción de los espectros de potencia y la determinación de la FRF y la función de coherencia.

También, en la descripción de algunos métodos de identificación para la determinación de las características dinámicas de obras civiles, se puede hacer una distinción entre las técnicas definidas en el primer dominio de frecuencias y las definidas en el dominio del tiempo. Las primeras operan para obtener las funciones de respuesta de frecuencia (FRF), la segunda referencia, en cambio, a la matriz de las funciones de impulso respuesta (IRF). Las técnicas de identificación dinámica pueden, por lo tanto, ser agrupadas en las técnicas en el dominio del tiempo y de las técnicas de dominio de frecuencia.

En general, los métodos en el dominio de la frecuencia tienden a proporcionar los mejores resultados cuando en el datos muestreados está presente una banda de frecuencia amplia o un gran número de formas osciladores, mientras los métodos que operan numéricamente en el dominio del tiempo conducen a resultados más precisos cuando el rango



de frecuencias de interés es limitada y el número de formas de identificar es modesta. Sin embargo, los métodos en el dominio del tiempo tienen la gran desventaja de ser capaz de identificar sólo los modos que insisten en la gama de frecuencias fijado a priori, y no toman en cuenta los efectos debidos formas mínimamente fuera de este rango.

[Tesi di laurea specialistica UniPavia “Sviluppo e applicazione di algoritmi per l’identificazione dinamica e il rilevamento del danno delle strutture civili”]

2.5.3.3.3. Identificación en el dominio de la frecuencia

Los algoritmos en el dominio de la frecuencia requieren la adquisición de la aceleración a partir de pruebas experimentales y permiten obtener información sobre el comportamiento dinámico de una estructura en términos de frecuencias naturales, amortiguación modal y formas de los modos [Balmes, 2000].

Hay varios métodos que le permiten identificar las maneras de su FRF, que, a pesar de utilizar diferentes procedimientos, todos parten del mismo supuesto: en las proximidades de la frecuencia de resonancia, la contribución de la manera que hace la propia resonancia es abrumadoramente la mejor de la definición del valor de la función de respuesta de frecuencia, es decir, la contribución de los otros modos es insignificante. Con este supuesto, un sistema con N grados de libertad puede transformarse en sistemas de N a un grado de libertad y por lo tanto funciona en una gama limitada de frecuencias en la vecindad de la frecuencia r -th.

[Tesi di laurea “monitoraggio sismico e identificazione con sensori Mems di un edificio della protezione civile” UniBo]



2.5.3.3.4. Identificación en el dominio del tiempo

Los modelos en el dominio del tiempo están como una poderosa herramienta analítica para la descripción y la interpretación de los procesos estocásticos derivados de la observación de los fenómenos dinámicos. Fueron desarrollados originalmente en disciplinas como la ingeniería de control y la teoría de sistemas.

La base teórica y las características clave se describen por Ljung (1999), Soderstrom y Stoica (1989) y Van de Overschee & De Moore (1993). En los últimos años, estos modelos han sido utilizados por varios autores para la descripción e identificación de sistemas estructurales en las estructuras de ingeniería civil (puentes, edificios, etc...) están sujetos a la excitación del medio ambiente. Las respuestas dinámicas, que fueron adquiridos durante las pruebas experimentales, pueden ser consideradas como series de tiempo discreto y pueden ser tratados por los procesos estadísticos estocásticos que describe el fenómeno físico bajo consideración.

El tratamiento de las respuestas dinámicas de las estructuras y de la determinación de las características modales mediante algoritmos de dominio de tiempo es la base de numerosas referencias científicas.

[Acarreo et al, 2003.; Garibaldi et al, 2003; Diotallevi et al, 2003]

Los modelos matemáticos utilizados están constituidos por ecuaciones en diferencias en la variable de tiempo discreto, que corresponden a las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de los sistemas de vibración en tiempo continuo.

2.5.3.3.5. Los niveles de vibración en el dominio del tiempo

El análisis de una señal de vibración expresado en términos de aceleración en el dominio del tiempo se lleva a cabo mediante el cálculo de diferentes parámetros de síntesis, que permiten la cuantificación del nivel a ser comparado con los niveles de referencia posiblemente normados. Estos parámetros son:

- Pico a pico (pico a pico), indica el rango máximo de la onda (tensión máxima, resistencia mecánica).
- Pico (pico), indica la excursión positiva o negativa máxima de la vibración (choque a corto plazo).



- RMS (Root Mean Square = media efectiva), es la medida más significativa de amplitud, ya que toma en cuenta la historia de la onda en el tiempo y da una amplitud directamente relacionada con el contenido de energía de la vibración:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

Donde $x(t)$ se muestra la tendencia de la señal en función del tiempo y T es la duración de la señal en sí. En el caso de una amplitud sinusoidal A de aplica su valor RMS:

$$RMS = \frac{A}{\sqrt{2}} \approx 0,707 A$$

En el caso de señales digitales que consisten en N muestras, el valor de RMS se evalúa por la siguiente expresión:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

La media (promedio), tiene en cuenta la historia de la onda en el tiempo, pero tiene poco interés práctico no está relacionada con ninguna cantidad física:

$$Avg = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt} \quad \text{per segnali continui}$$

$$Avg = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{per segnali discreti}$$

Con referencia explícita a las medidas de aceleración, la duración T de la medición se suele dividir en intervalos de T_i para cada uno de los cuales se calcula el valor RMS correspondiente. La medición de base para el cálculo de la media móvil de valor RMS es generalmente 1 s. De esta manera es posible trazar la evolución del valor de RMS en el tiempo y para verificar la posible correlación con picos locales de amplitud. Se



define AEQ, la aceleración equivalente a la energía de la vibración, el promedio lineal del valor efectivo calculado en un intervalo de tiempo T:

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{RMS}^2(t) dt}$$

[“Appunti sulla Misura delle vibrazioni”, UniCatania]

2.5.3.3.6. Clasificación de los métodos de análisis modal de entrada - salida

Una clasificación adicional de los métodos se basa en el número de entrada y salida, dado que las posiciones de la forzante y de los puntos en los cuales se mide la respuesta pueden ser únicos o múltiples. Es posible, entonces, distinguir los siguientes casos:

- Una respuesta debido a un solo forzante: de entrada única y salida única (SISO).
- Respuestas múltiples debidas a una sola excitación: de entrada única y múltiples salidas (SIMO).
- Múltiples respuestas debido a diversos forzamientos: multiple-input multiple-output (MIMO).
- Una respuesta debido a múltiples forzamientos: múltiple entrada y salida única (MISO).

Los tres primeros métodos son los más utilizados.

[Tesi di laurea “monitoraggio sismico e identificazione con sensori Mems di un edificio della protezione civile” UniBo]

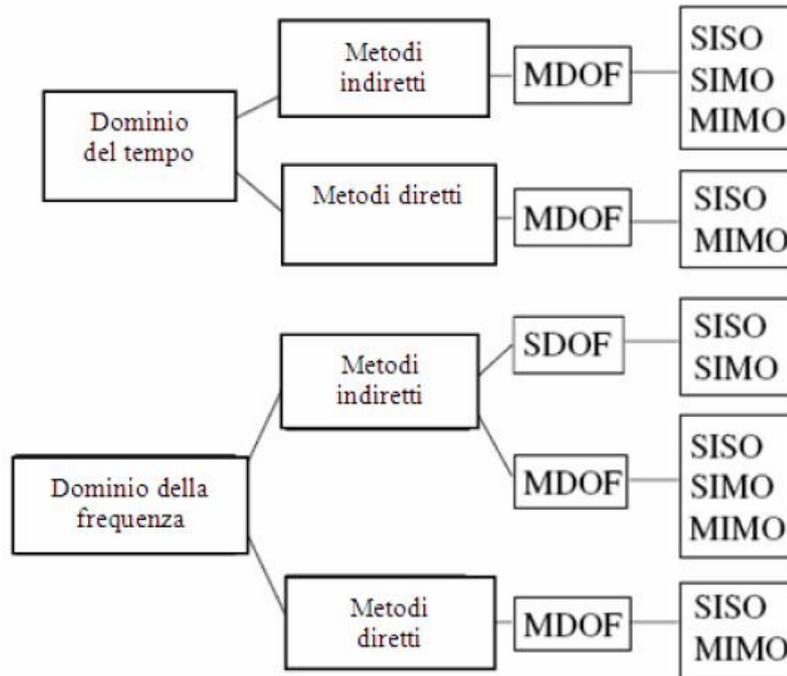


Figura 2.5.3.3.6. Clasificación de las técnicas de identificación dinámica.

2.5.3.3.7. Clasificación de los métodos de análisis modal por los grados de libertad

Una última distinción es entre los métodos de un solo grado de libertad y métodos a más grados de libertad. Se dice que la respuesta dinámica de un sistema está dada por la superposición de sus formas de los modos. Sin embargo, si en una banda de frecuencia dada, hay una manera dominante, los parámetros de esta manera se pueden determinar por separado mediante la asimilación de la FRF en la banda en cuestión a la del sistema de un solo grado de libertad considerada equivalente y representativa de la forma.

Los métodos basados en este tipo de reclutamiento se llaman, de hecho, los métodos para un solo grado de libertad. Cabe destacar que, aunque el sistema es impulsado con una entrada forzante caracterizada por una sola frecuencia, sin embargo en su respuesta, la cual está determinada por la función de respuesta en frecuencia, se tendrán en cuenta todos los modos propios. Dependiendo de los objetivos del análisis, por lo tanto, es posible utilizar diferentes tipos de excitación.



En general, es posible distinguir las excitaciones de banda estrecha (tal como la onda sinusoidal a la frecuencia establecida, para lo cual el espectro contiene esencialmente sólo un valor no nulo) y excitaciones de banda ancha (para la que el espectro es diferente de cero para una amplia gama de frecuencias, por lo que son más adecuados para excitar muchas maneras al mismo tiempo). En cualquier caso, la entrada de excitación a la estructura debe ser controlada adecuadamente para evitar que la estructura entre en el rango plástico (es decir, en el rango no lineal), lo que contradice, por lo tanto, la suposición básica de estacionariedad y linealidad del sistema.

2.5.3.3.8. Procedimiento de identificación

Los sistemas considerados en el análisis modal experimental son, por lo tanto, los sistemas estacionarios lineal y: que estén completamente caracterizan por su respuesta al impulso $h(t)$ o su equivalente en el dominio de la frecuencia, la función de respuesta de frecuencia $H(f)$. En general, por lo tanto, las pruebas experimentales para la determinación de los parámetros modales se basan en la posibilidad de describir el comportamiento dinámico de la estructura o por un conjunto de ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo, o por un conjunto de ecuaciones algebraicas en el dominio de la frecuencia.

Las técnicas en el dominio del tiempo se basan en las soluciones del siguiente sistema de ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\}$$

En particular, se hace referencia a la matriz de las funciones de impulso respuesta (IRF), que puede ser escrita como una suma de las respuestas sinusoidales amortiguadas:

$$[I(t)] = \sum_{k=1}^m [r_k | e^{-\sigma_k t} \sin(\omega_k t + \alpha_k)]$$

Donde quedan definidos el número de modos de vibración “m”, la matriz de residuos en términos de amplitud, la matriz de residuos en términos de fase, la envolvente de amortiguamiento modal que define la exponencial decreciente, así como la frecuencia propia de cada modo.

Los residuos definen la amplitud de la respuesta de cada modo. Los métodos en el dominio del tiempo se aprovechan, a continuación, de los



procedimientos de ajuste de curvas para estimar los parámetros modales de una estructura a partir de los datos experimentales. En el caso de las técnicas en el dominio de la frecuencia, sin embargo, el comportamiento dinámico de la estructura se describe por la función de respuesta de frecuencia, que contiene implícita dentro de él toda la información acerca de las características dinámicas de la estructura.

En el dominio de la frecuencia, por lo tanto, la solución del sistema anterior de ecuaciones diferenciales se busca tomar ventaja de la transformación funcional conocido como "transformada de Fourier". La ventaja de que esta transformación es a alejarse de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias a un sistema de ecuaciones algebraicas resolución más simple:

$$(M\omega^2 + C\omega + K) \cdot X(\omega) = F(\omega)$$

La función de respuesta de frecuencia (FRF) es expresable como la relación de la transformada de Fourier de la respuesta, y de entrada:

$$H(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{F(j\omega)}$$

La función de la respuesta de frecuencia y la función de respuesta de impulso correspondiente forman un par de transformadas de Fourier. En otras palabras, la función de respuesta de impulso se puede lograr mediante la aplicación de la transformada inversa de Fourier a una función de la respuesta de frecuencia y, a la inversa, la función de la respuesta de frecuencia se puede conseguir mediante la aplicación de la transformada de Fourier de la función de respuesta al pulso.

Incluso en este caso, como para las técnicas en el dominio del tiempo, con los procedimientos de ajuste de curvas es posible determinar los polos y residuos. Los residuos contienen información sobre las formas modales.

En cuanto a los polos, ya que cada función de la respuesta de frecuencia contiene los mismos términos en el denominador, las frecuencias naturales y de amortiguación modal pueden ser estimadas por cualquier función de la respuesta de frecuencia, o múltiples funciones de respuesta de frecuencia medidas en la misma estructura. Esta propiedad es aprovechada por los métodos de la llamada " global" (para subrayar la



diferencia con los métodos de "locales" la explotación de una función a la vez, pero cada vez que puede producir diferentes estimaciones para el mismo parámetro).

[“L’analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti” Fabbrocino, Rainieri, Verderame]



3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN: LA VERSATILIDAD HECHA VIRTUD



3.1. Metodología empleada y puesta en marcha de la monitorización de la iglesia del Seminario Mayor de Comillas

3.1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El Seminario Mayor de Comillas es un edificio con una gran riqueza arquitectónica de carácter modernista, lo que le convierte en una joya del modernismo español con un alto valor patrimonial, comenzado a construir en 1881 por el primer Marqués de Comillas D. Antonio López. Tras el fallecimiento de éste en 1883 sería su hijo, Claudio López Bru quien se encargaría de mantener la financiación de su construcción hasta materializarse éste como una realidad en 1890.

Se trata de un proyecto en el que intervinieron los arquitectos catalanes Lluís Doménech i Montaner (a quien fue confiada la obra en 1889 y responsable del embellecimiento ornamental del edificio, conocido por ser el autor de edificios catalogados como Patrimonio de la Humanidad: Hospital de la Santa Creu i Sant Pau y del Palacio de la Música Catalana) y Joan Martorell i Montells, al tiempo que contaron con el asesoramiento del ingeniero jesuita el padre Alcolado y de un miembro de la orden de la Compañía el padre Gómez Carral.

Esto va a hacer a ejercer un fuerte influjo en el edificio, pues su plano general presenta unas directrices jesuíticas muy tradicionales, por medio de dos patios, de la comunidad y de las aulas, separados por la iglesia. Asimismo, participaron personalidades como el maestro Cristóbal Cascante y Colom, el pintor Eduard Llorens Masdeu o el taller de fundición Masriera & Campins.

En lo que a su ubicación se refiere, ésta no es casual ni mucho menos, pues el propio Marqués tuvo como pretensión situar el edificio frente a su palacio de Sobrellano. Así, se ubica en una finca de 575.000 metros cuadrados, desde la cual son visibles tanto el Mar Cantábrico como los Picos de Europa, lo cual convierte a este edificio singular en una de las joyas de la arquitectura más importantes y emblemáticas de Cantabria.

El edificio se encuentra catalogado como Monumento Histórico-Artístico mediante el Decreto 9/1985 de 22 de febrero de la Dirección General del Estado. Posteriormente, el Consejo de Gobierno de Cantabria declaró su protección como Bien de Interés Cultural (BIC) en Decreto de 14 de junio de 2002, de acuerdo con las determinaciones de la Ley de Patrimonio Cultural de Cantabria.



Tal y como es posible visualizar en la figura 3.1.1(a), el edificio ocupa una superficie rectangular aproximada de 100 m x 65 m, articulándose en torno a dos claustros de dimensiones aproximadas 35 m x 25 m, flanqueando el volumen central en el que se ubican los elementos arquitectónicos y artísticos de mayor calidad, el hall de entrada, la escalera principal, el paraninfo, la sacristía y la iglesia.

Las fachadas del edificio a su vez combinan mampostería y ladrillo e incorporan azulejos cerámicos de tradición medieval y renacentista, al tiempo que el pórtico del seminario supone la puerta de entrada a un mundo completamente diferente al exterior. El suelo decorado, arcos y columnas estilizadas, o el artesonado de la escalera que recoge un complejo entramado de cornisas, columnas, pinjantes y florones, todo ello transfigura el espacio interior. En este vestíbulo se puede admirar de cerca la articulación de espacios mediante el sistema columnario, la luminosidad y el cromatismo.

En la gran sala situada encima del vestíbulo se encuentra, sobre una galería abalaustrada de madera, un gran friso pintado por Llorens en el que se contraponen Antiguo y Nuevo Testamento.

Al mismo tiempo, en la portalada del Seminario se hallan las armas de la Santa Sede y el monograma de la Compañía de Jesús, con dos pajes como tenantes que incluye referencias a las fechas 1890 y 1892, año en el que León XIII era propietario del edificio y fecha de inauguración de los estudios en el Seminario respectivamente.

En las Figuras 3.1.1(b) y 3.1.1(c) se ilustran el intradós y el trasdós del abovedado de la iglesia, con anterioridad a las intervenciones realizadas en el edificio a partir del año 2007, mientras que las Figuras 3.1.1(d), 3.1.1(e) y 3.1.1(f) presentan el estado del interior apeado de la construcción y los tirantes existentes entre contrafuertes.

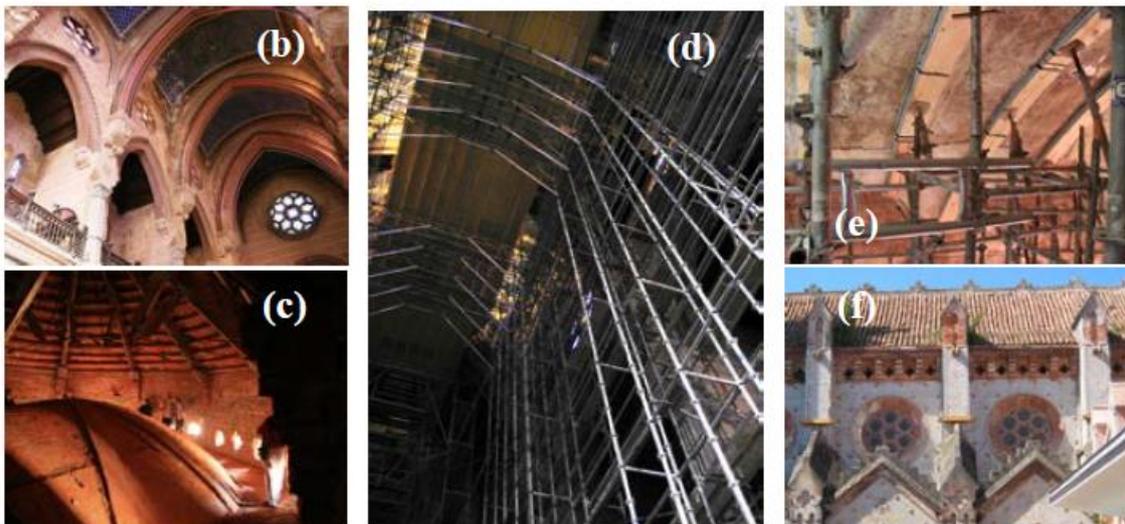


Figura 3.1.1. (a) Perspectiva general del Seminario Mayor de Comillas previa a las intervenciones realizadas. (b) y (c) Intradós y trasdós del abovedado de la iglesia. (d) y (e) Apeado del interior. (f) Tirantes entre los contrafuertes.

Tras un proceso de rehabilitación finalizado en 2010 y galardonado con el XV Premio de arquitectura del Colegio Oficial de Arquitectos de Cantabria, el edificio cuenta en la actualidad con modernas instalaciones que le permiten albergar la sede de la Fundación Comillas.

Se trata de un diseño final que constituye un marco incomparable en el que los elementos recuperados y los añadidos conviven conjugando estética y funcionalidad. Un espectacular y luminoso claustro central,



bajo el cual se ubica el antiguo aljibe, hoy reformado en una bella sala de exposiciones que articula los principales espacios e instalaciones del centro, organizados en varias plantas y dotadas de las más modernas tecnologías. Todo ello en su conjunto dota al edificio de gran versatilidad y polivalencia para el desarrollo de las múltiples actividades con las que cuenta la Fundación Comillas.

3.1.2. REGISTRO DE LOS DAÑOS EXISTENTES EN LA IGLESIA

Los levantamientos de grietas y fotográfico fueron elaborados a partir de la toma de datos realizada in situ durante las visitas llevadas a cabo durante agosto y septiembre de 2012. Posteriormente, en gabinete, se procedió a confeccionar un total de 41 planos en los que se representaron los daños registrados, así como la justificación fotográfica de su existencia.

La información se agrupó por secciones de acuerdo con el plano de planta de la Iglesia que se muestra en la Figura 3.1.2. De esta forma, se crearon mapas de grietas, con sus fotografías asociadas, correspondientes a las zonas de arcos y contrafuertes, bóvedas, muros interiores y muros exteriores (de fachada).

En la toma de datos llevada a cabo, además de registrar el trazado de las distintas grietas, se realizó una evaluación cualitativa de las mismas, clasificando éstas visualmente, de forma aproximada, por su espesor. Así, se reflejan en los planos tres tipos de grietas diferenciando entre las que presentaban una amplitud (separación entre los labios de la fisura) menor de 0.5mm, entre 0.5 y 15mm, y las de amplitud superior a los 15mm.

En la Figura 3.1.3 se presenta, a modo de ejemplo, una de las secciones recogidas en los planos con el levantamiento de grietas realizado. Por su parte, la Figura 3.1.4 ilustra el plano complementario en el que se recoge su reportaje fotográfico.

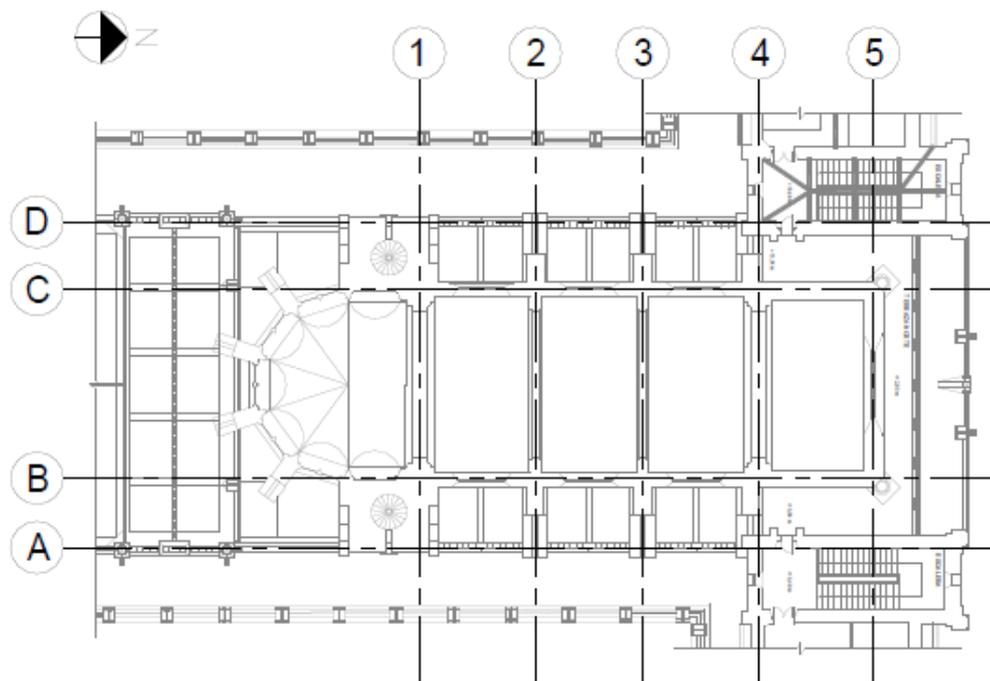


Figura 3.1.2. Planta de referencia con las secciones consideradas para el levantamiento de grietas.

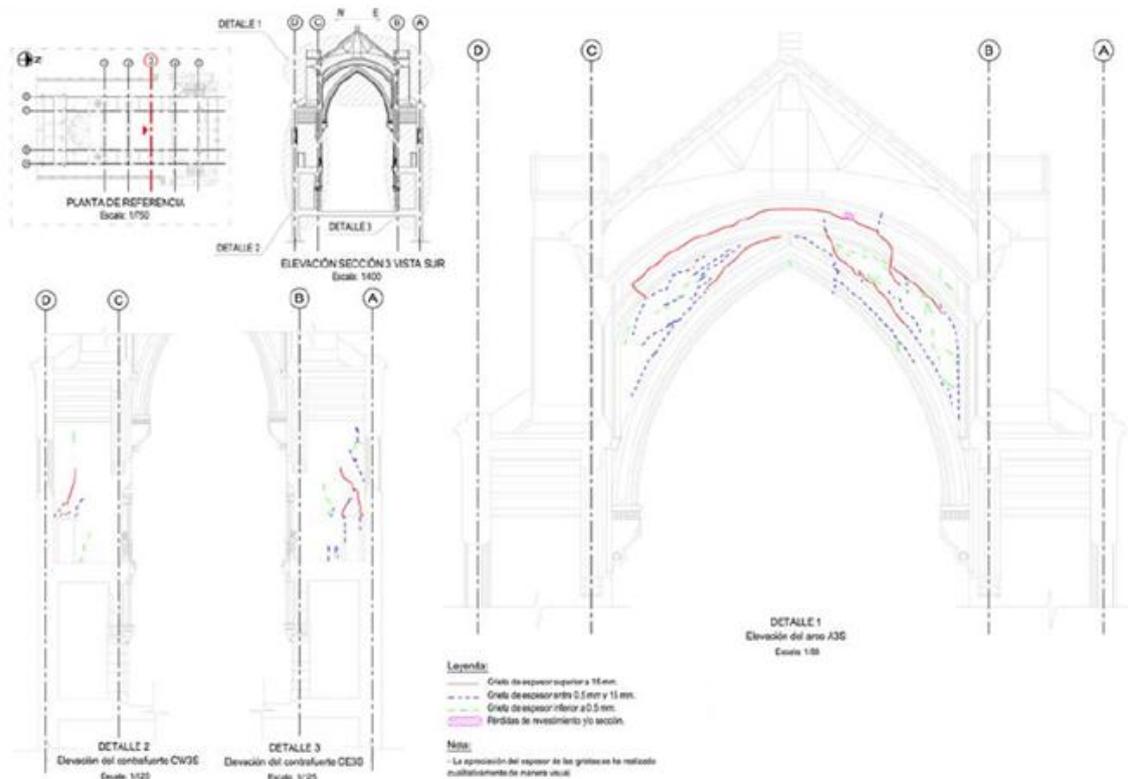


Figura 3.1.3. Ejemplo de plano de levantamiento de grietas del arco y contrafuertes de



la sección 3 vista sur.

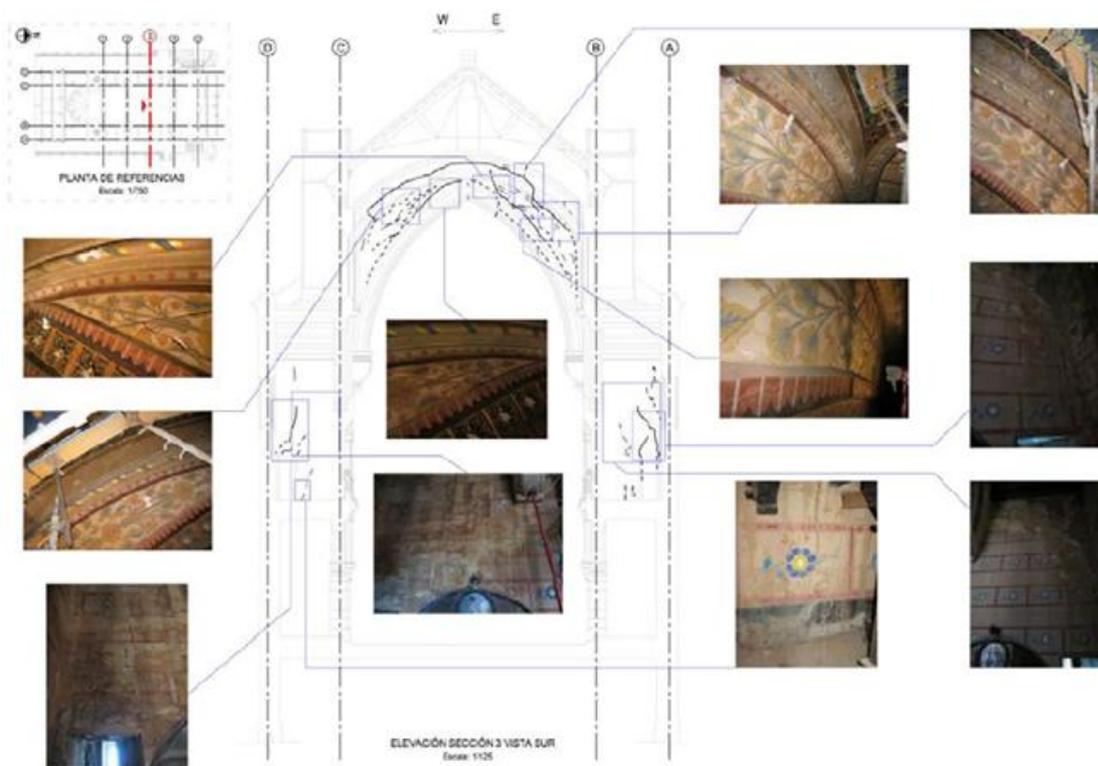


Figura 3.1.4. Ejemplo de plano con reportaje fotográfico del arco y los contrafuertes de la sección 3 vista sur.

3.1.3. INSTALACIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL

Una vez analizados los daños existentes, se procedió a la elección de las zonas en las que disponer los instrumentos de seguimiento de daños, haciendo coincidir éstas con las áreas en las que los daños eran mayores.

3.1.3.1 Seguimiento remoto en continuo

Los sensores para realizar el seguimiento remoto en continuo, se agruparon en tres estaciones de adquisición de datos (Figura 3.1.5) que, a su vez, se encuentran conectadas a un PC Industrial en el que se almacenan las mediciones, sirviendo igualmente para la posterior gestión remota, vía web, de los datos almacenados.



En la Tabla 3.1.1 se relacionan los sensores, agrupados por área de monitorización, así como el fabricante y modelo de cada uno. A la fecha de redacción del presente artículo, los sensores correspondientes a la zona de monitorización 3 se encuentran aún pendientes de instalación. Por su parte, la Figura 3.1.6 ilustra algunos de los sensores instalados.

Área de monit.	Sensor
1	FIS-01 y 02
	INCL-01 y 02
	CONV-01
	THG-01
2	FIS-03, 04 y 05
	THG-02
	VEL-01
	ANEM-01
3	FIS-06 y 07
	INCL-03 y 04
	CONV-02 y 03

FIS: Fisurómetro (Solartrom Metrology, LVDT V02505SAN3);
INCL: Inclinómetro (Sensorex, Servo-inclinometer SX41100.);
CONV: Cinta de convergencia (ASM GmbH, WS10-50-R1K-L10-SB0-D8-HG);
THG: Termohigrómetro (PCE-Ibérica, P18);
VEL: Velela (Darrera, 3R KYWS);
ANEM: Anemómetro (Darrera, 3R KYWD)

Tabla 3.1.1. Tipología de sensores y distribución según el área de monitorización.

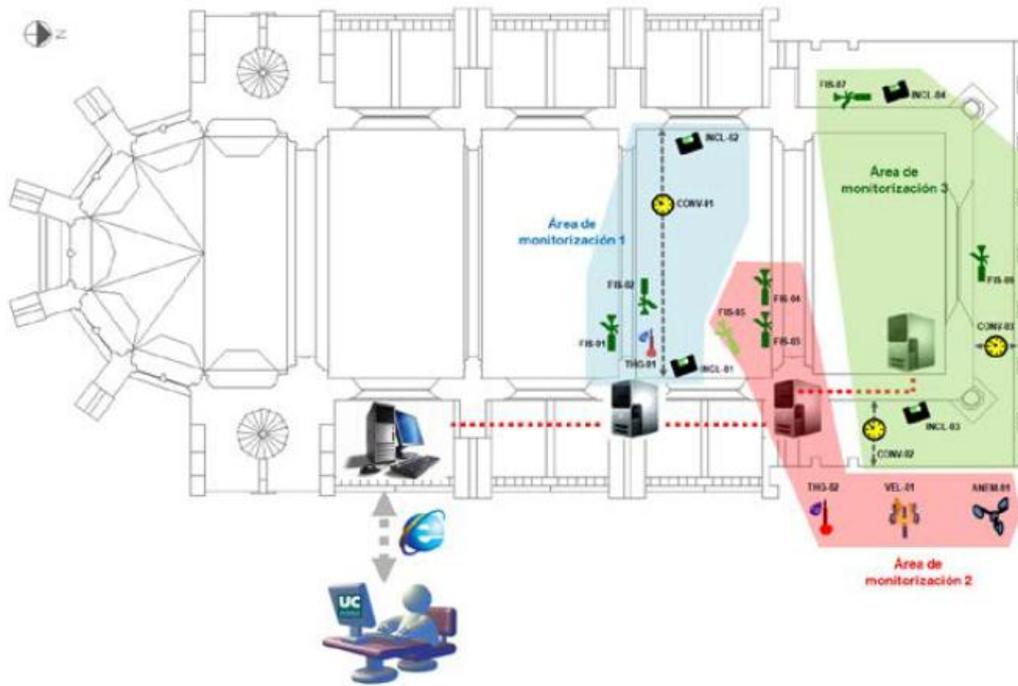
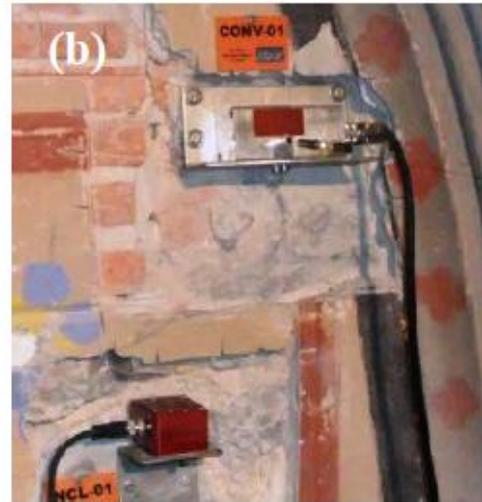
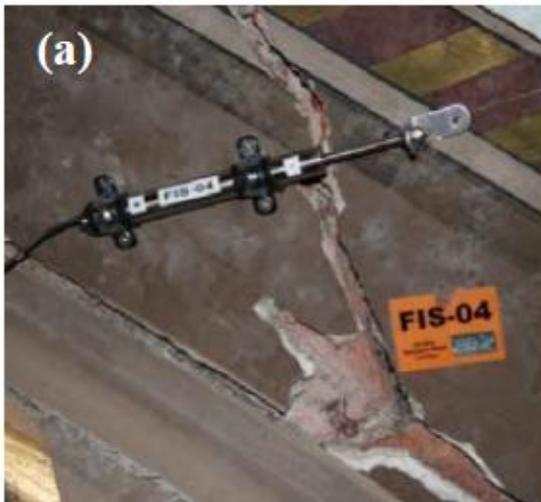


Figura 3.1.5. Esquema de la distribución en planta de los sensores según las áreas de monitorización.



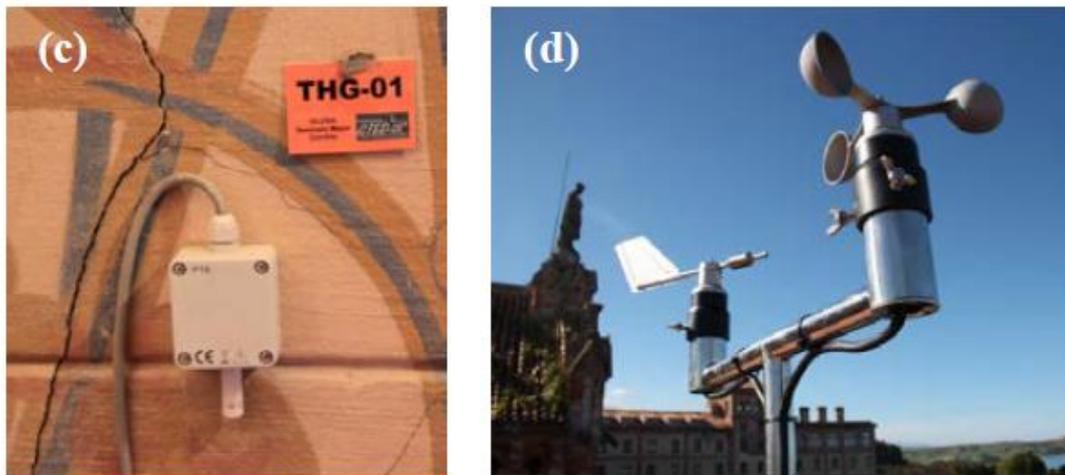


Figura 3.1.6. Ejemplos de sensores instalados. (a) Fisurómetro FIS-04. (b) Cinta de convergencia CONV-01 e inclinómetro INCL-01. (c) Termohigrómetro interior THG-01. (d) Veleta y anemómetro, instalados en una zona de la cubierta del claustro Este, con una sobre-elevación a fin de minorar los efectos de posibles turbulencias debido a otros elementos del edificio.

Previo a la conexión de los sensores con el PC Industrial, éstos fueron cableados hasta su correspondiente Estación Remota. La Figura 7(a) ilustra la conexión entre el cableado de uno de los sensores instalados con el cableado que fuga hasta la Estación Remota correspondiente. Por su parte, la Figura 3.1.7(b) ilustra el interior de una de Estaciones Remotas referidas, en el que se colocaron las tarjetas correspondientes para la lectura de cada uno de los sensores. Finalmente, el PC Industrial encargado de la recopilación y registro de datos, fue instalado en la zona de Capillas, a media altura, al Este (en concreto la más próxima al presbiterio, Figura 3.1.5). En la Figura 3.1.7(c) se ilustra un instante durante la instalación y puesta en marcha del sistema, así como la existencia de dos baterías que garantizan el funcionamiento ininterrumpido del mismo durante aproximadamente una semana en caso de cese de la corriente eléctrica.

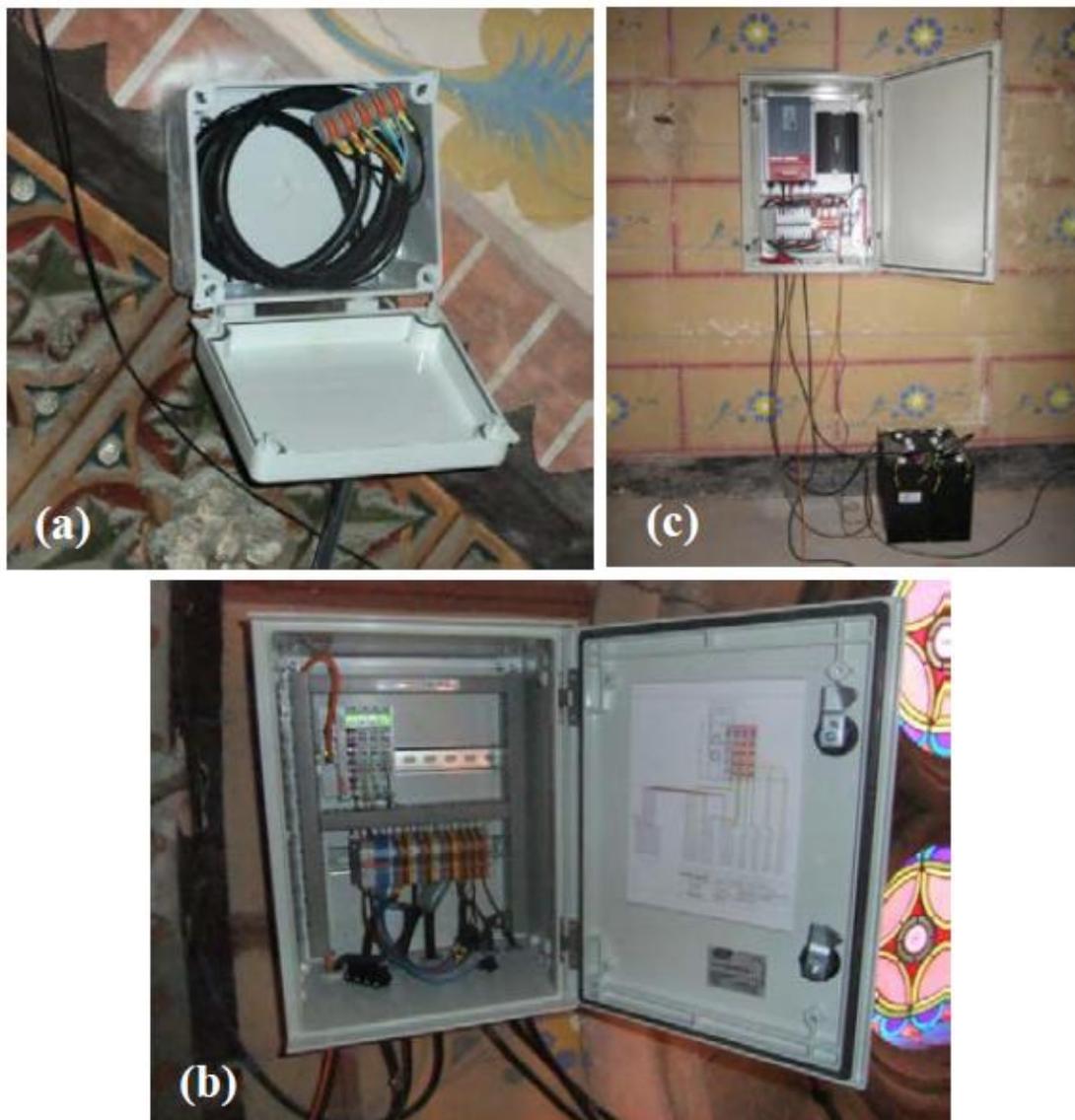


Figura 3.1.7. (a) Disposición final de las "cajas intermedias" para proporcionar continuidad al cableado del sensor. (b) Vista interior de la estación remota n° 2. (c) PC industrial y baterías de seguridad.

3.1.3.2 Seguimiento in situ de forma discreta

Para complementar la sensórica en continuo dispuesta, con el objeto de limitar la carestía del sistema instalado, así como para disponer de mediciones de contraste en relación a los sensores electrónicos, se instalaron un total de 22 puntos de control in situ, para su seguimiento discreto. De éstos, 16 se destinaron a la evaluación de la apertura/cierre de grietas mediante el empleo de un deformómetro (marca Demec, con rango de medida de 200 mm y una precisión de 1 μ m), mientras que los 6 restantes correspondieron a placas inclinométricas para detectar posibles desplomes de los muros con la ayuda de un medidor de



inclinaciones portátil (marca Sensorex, con una precisión de 2 centésimas de grado).

En cada una de las grietas seleccionadas se ubicaron tres puntos de control formando un triángulo equilátero, Figura 3.1.8(a), de forma que a través de la medida de la distancia entre ellos, Figura 3.1.8(b), pueda evaluarse la variación en la amplitud de la grieta y el posible deslizamiento entre sus labios. En lo que se refiere a la medida de inclinaciones, sobre las localizaciones escogidas se instaló una placa metálica de acero inoxidable sobre la que se sitúa el aparato, registrando el ángulo formado con el plano constituido por la placa metálica tomada como referencia, Figura 3.1.8(c).



Figura 3.1.8. (a) Puntos de control manual para el seguimiento de la grieta G-03 ubicada sobre el abovedado. (b) Registro manual de la apertura de la grieta G-06. (c) Registro manual de la inclinación I-05.

Adicionalmente, para cada uno de los puntos e instantes de medición se registró la temperatura existente con objeto de poder apreciar la influencia de las variaciones térmicas en las mediciones.

3.1.4. EVOLUCIÓN DE LOS DATOS REGISTRADOS

De acuerdo con la metodología planteada, y a la vista de la evolución de movimientos registrados de forma manual, desde principios de Agosto de 2012 hasta la fecha de redacción del artículo, comentar que, en lo que se refiere a la apertura de fisuras, se observa que las medidas registradas manualmente de forma discreta continúan siendo poco significativas dada la amplitud de los movimientos recogidos, los cuales en ningún caso superan los 0.5mm. Además, cabe señalar que, en general, las variaciones en las aperturas de las fisuras parecen mantenerse asociadas con los gradientes térmicos manifestados entre las medidas (Figura 3.1.9). Tras un año de toma de medidas, las aperturas residuales registradas por la mayor parte de las grietas son en su mayoría del orden



de las centésimas de milímetro. El mayor valor registrado corresponde a la grieta G-09 con 0.170mm de apertura residual.

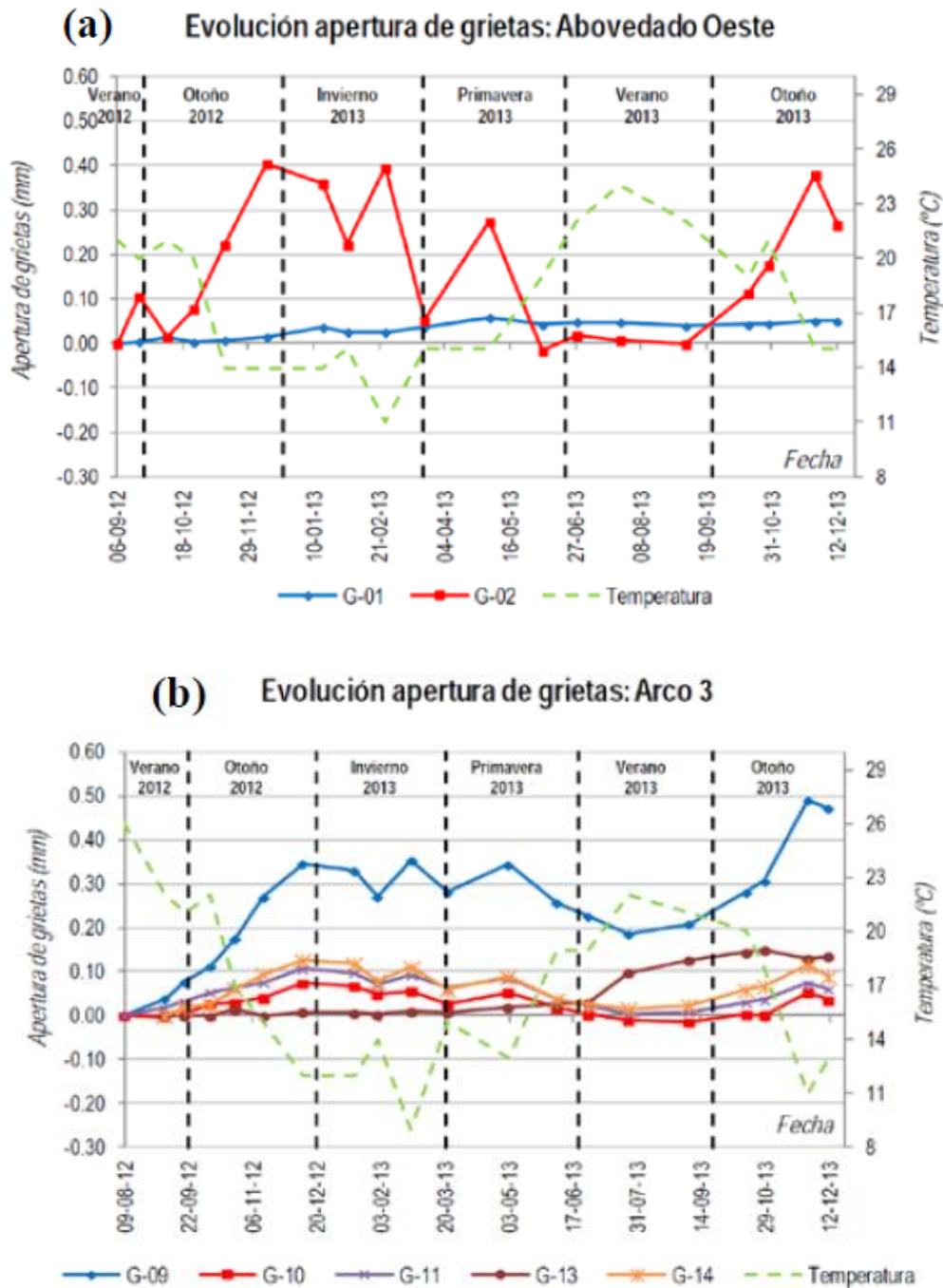


Figura 3.1.9. Ejemplos de gráficas de evolución de la apertura de fisuras de grietas (en ambos casos "+" representa la apertura de la grieta). (a) Grietas existentes en la parte superior del abovedado (lado Oeste). (b) Grietas existentes en la zona de influencia del arco 3 (Figura 3.1.2).

En relación con el control manual y discreto de las inclinaciones, las placas inclinométricas han continuado experimentando variaciones



angulares muy reducidas (se recuerda que la sensibilidad del equipo manual empleado es de 2 centésimas de grado). De manera similar que en el caso de las aperturas de fisuras, la evolución registrada de las inclinaciones parece relacionarse con las fluctuaciones térmicas registradas entre los diferentes instantes de medición (Figura 3.1.10).

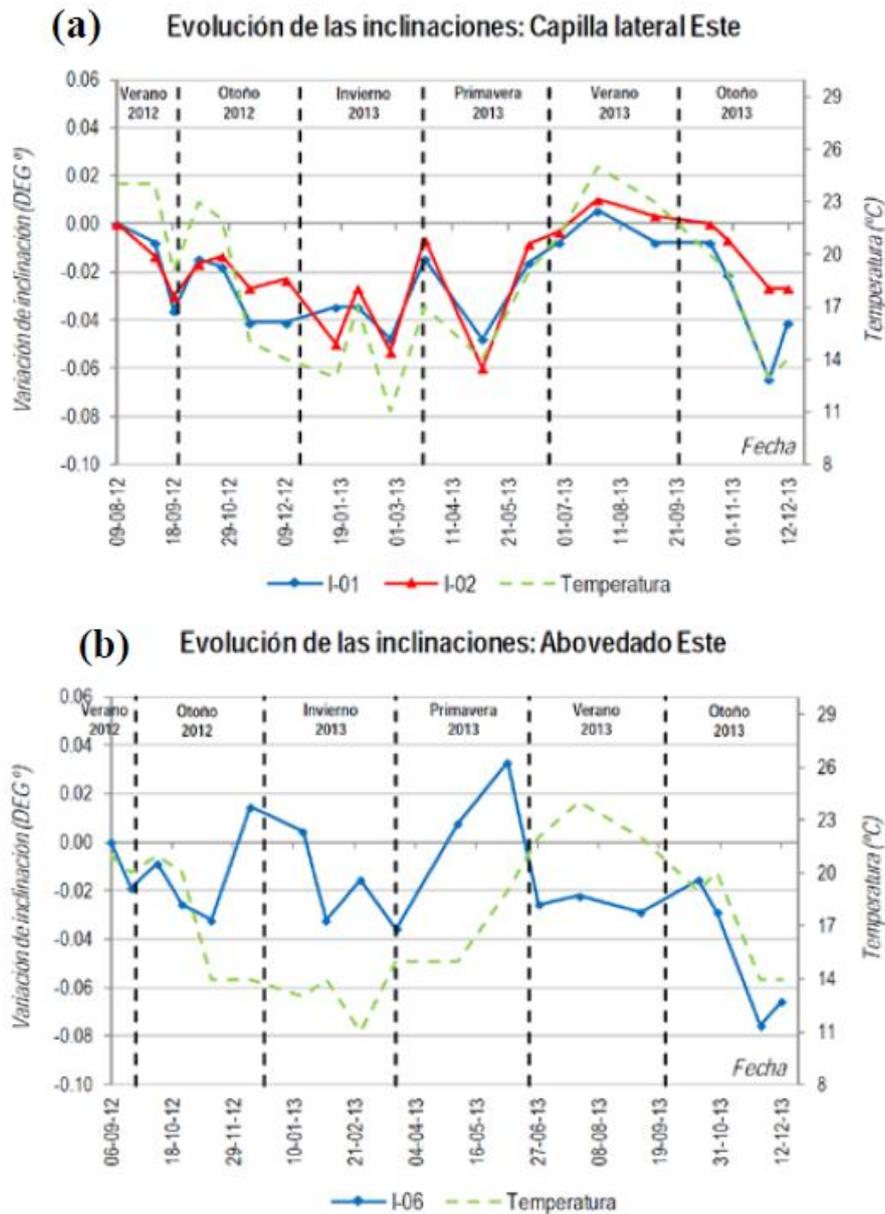


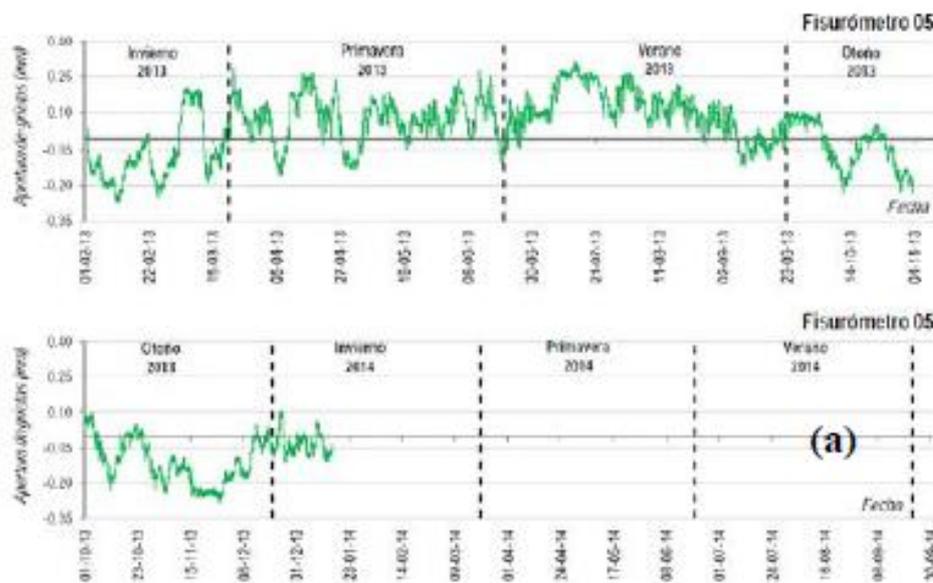
Figura 3.1.10. Ejemplos de gráficas de variación de inclinación registrada en el muro portante exterior orientado al Este (en ambos casos "+" indica el desplome hacia el interior del muro). (a) A nivel de capillas. (b) Por encima del abovedado.

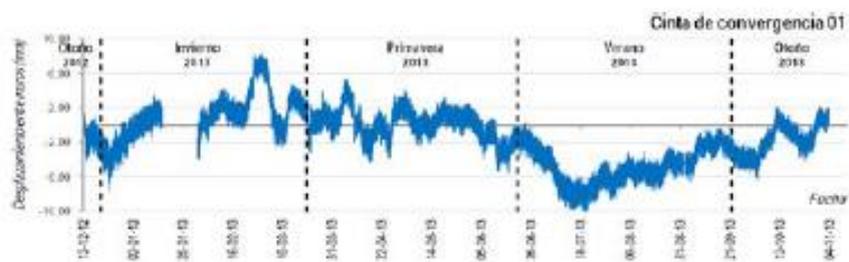
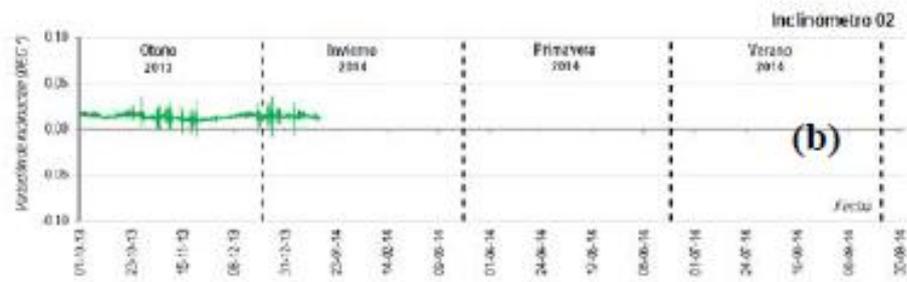
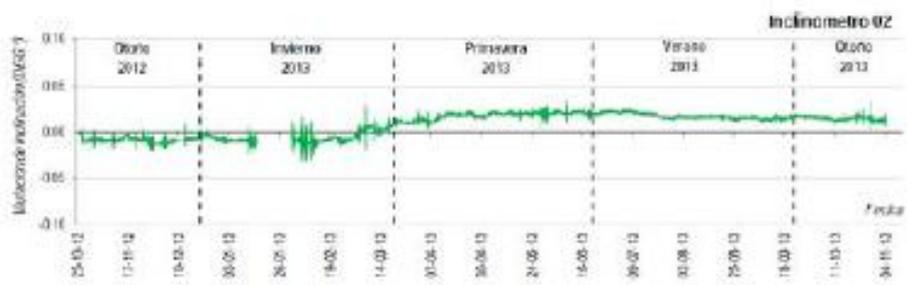
En relación a la gestión online de los datos de la monitorización en continuo, tal y como se desarrolla en el apartado 3.1.5, se ha



confeccionado “ad hoc” una aplicación desarrollada en JavaFX, novedosa plataforma para el desarrollo de aplicaciones enriquecidas de Internet, mediante la cual se posibilita la comunicación remota entre el PC industrial y cualquier punto donde se disponga conexión de Internet. En relación a una consulta más detallada de las prestaciones de dicha herramienta, o sobre la integración de sistemas de instrumentación electrónica, adquisición de datos y desarrollo de software de gestión se remite al lector a la referencia.

A modo de ejemplo, en la Figura 3.1.11 se presentan alguna de las curvas de evolución registradas por los sensores desde su instalación. Así, la Figura 3.1.11(a) ilustra la evolución de la apertura de fisura experimentada por el fisurómetro FIS-05. Por su parte, la Figura 3.1.11(b) representa la evolución de inclinación registrada por el inclinómetro INCL-02. La Figura 3.1.11(c) grafica la evolución de los desplazamientos registrados por la cinta de convergencia localizada adyacente al Arco 3 (es decir el movimiento relativo entre los muros portantes exteriores Este y Oeste). Y, finalmente, la Figura 3.1.11(d) ilustra, para el mes de diciembre de 2013, la evolución de las condiciones ambientales (temperatura y humedad) registradas en el interior de la Iglesia.





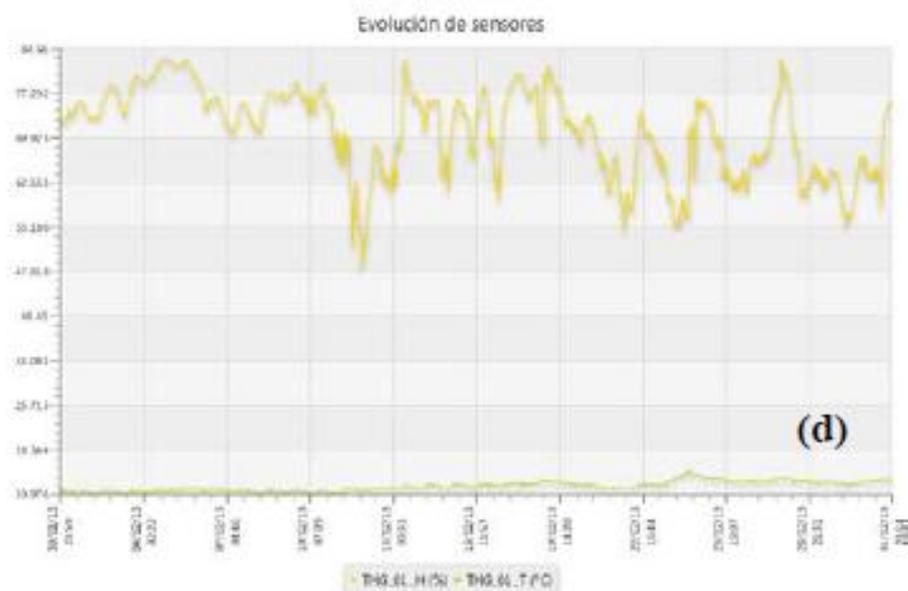


Figura 3.1.11. Ejemplos de gráficas de evolución registradas por los sensores en continuo desde su instalación. (a) Apertura de grietas registrada por el fisurómetro FIS-05 dispuesto en el trasdós del abovedado ("- " indica la apertura de grieta). (b) Inclinación registrada por el inclinómetro INCL-02 localizado en la fachada Oeste ("- " indica el desplome hacia el exterior del muro). (c) Desplazamientos registrados por la cinta de convergencia localizada adyacente al arco 3 ("- " indica una aproximación entre los muros). (d) Condiciones ambientales (temperatura y humedad) registradas en el interior de la Iglesia durante el mes de Diciembre de 2013.

En relación al comportamiento registrado por los sensores en continuo, cabe referir que las medidas registradas por los fisurómetros instalados bajo el abovedado continúan siendo del orden de las centésimas de milímetro (únicamente reflejar la apertura residual, tras un año de monitorización, de en torno a los 0.140mm que ha experimentado el FIS-04). Por su parte, el fisurómetro FIS-05 (ubicado sobre el abovedado y, por tanto, estando sometido a una mayor influencia de las condiciones ambientales exteriores por la existencia de huecos de ventilación del espacio bajo cubierta, Figura 3.1.12(a)) ha registrado mayores amplitudes de apertura que el resto a lo largo del período de seguimiento, si bien, tras un año de monitorización, ha experimentado un cierre prácticamente nulo (0.008mm). Adicionalmente, y como lo han reflejado los puntos de control manual, la apertura y cierre de las grietas, se encuentran asociadas fundamentalmente a los cambios térmicos del material (contracciones y dilataciones), Figura 3.1.12(b). La variación angular registrada por los inclinómetros se ha mantenido, con reducidas



variaciones, desde su colocación. Finalmente, el mayor desplazamiento registrado por la cinta de convergencia (CONV01), respecto a su posición inicial, ha sido un alargamiento de unos 9.5mm en el mes de Noviembre de 2013.

Como puede apreciarse, dicho desplazamiento, en una distancia de 9.7m entre puntos de anclaje, no resulta significativo.

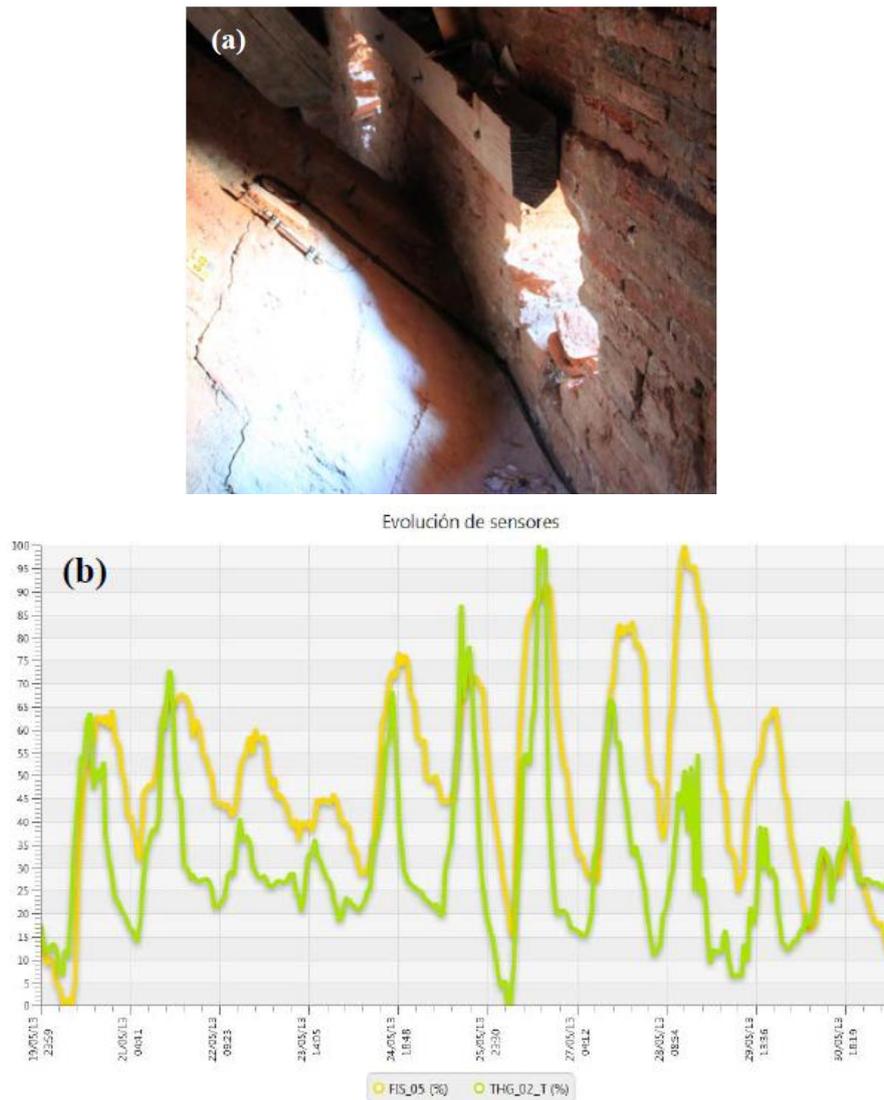


Figura 3.1.12. (a) Influencia de las condiciones ambientales exteriores en la evolución del FIS-05, por la existencia de huecos de ventilación del espacio bajo cubierta (el eje de coordenadas está relativizado para cada sensor). (b) La grieta en la que se ha instalado el FIS-05 ("-" indica apertura de grieta) se abre a consecuencia del descenso de las temperaturas, así como se cierra en condiciones ambientales inversas.

De acuerdo a lo ya comentado con anterioridad, el hecho de disponer puntos de control manual se debe, por una parte, a incrementar los puntos de los que se tiene información (con el objeto de limitar el coste



caso de instalar sensórica en todos los puntos) y, por otro, para disponer de mediciones de contraste de las lecturas obtenidas con los sensores electrónicos, en determinadas zonas. Con esta segunda idea, la Figura 3.1.13 ilustra una de las comparativas entre las mediciones registradas de forma continua mediante el fisurómetro FIS-01 y las obtenidas manualmente en el punto de control G-14 en las diferentes visitas al edificio. Puede comprobarse como el ajuste de las mediciones es muy bueno, lo que refuerza la confianza de la bondad del sistema electrónico. Además, en base a la lectura de los sensores instalados, pudo validarse la correcta evolución de sus medidas. La Figura 3.1.14(a) ilustra el comportamiento coherente entre la evolución de las inclinaciones de los muros, en los puntos de anclaje de la cinta de convergencia, y los desplazamientos registrados por ésta.

A medida que los inclinómetros registran valores de desplome hacia el interior de los muros, la cinta de convergencia refleja un acortamiento, y viceversa. En otros casos, también se constató la afección de las acciones eólicas en el comportamiento registrado por los sensores. Así, puntualmente, se han registrado valores de inclinación mayores que los que se venían registrando, los cuales pueden asociarse a instantes en los que se han registrado velocidades eólicas significativas (asociadas a temporales de viento). En la Figura 3.1.14(b) se muestra, a modo de ejemplo, como la influencia del viento sobre los muros se refleja en el registro de los inclinómetros (vibraciones que poco a poco se van atenuando).

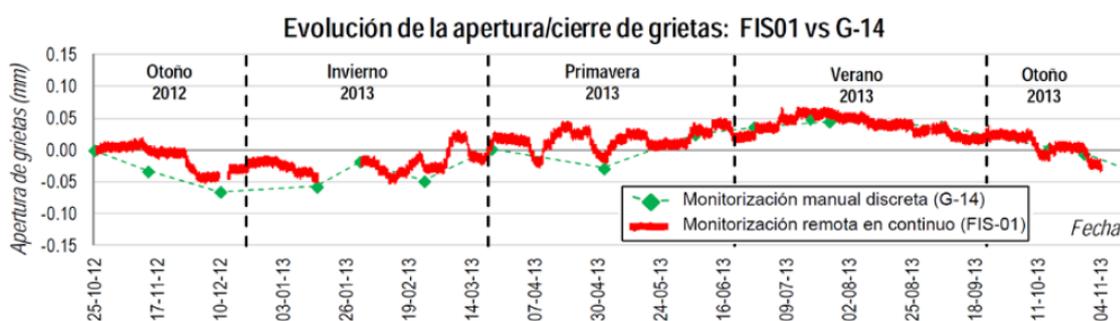


Figura 3.1.13. Comparación de la apertura de fisura registrada de forma continua mediante el fisurómetro FIS-01 y la obtenida manualmente en un punto aledaño a dicho sensor (G-14).

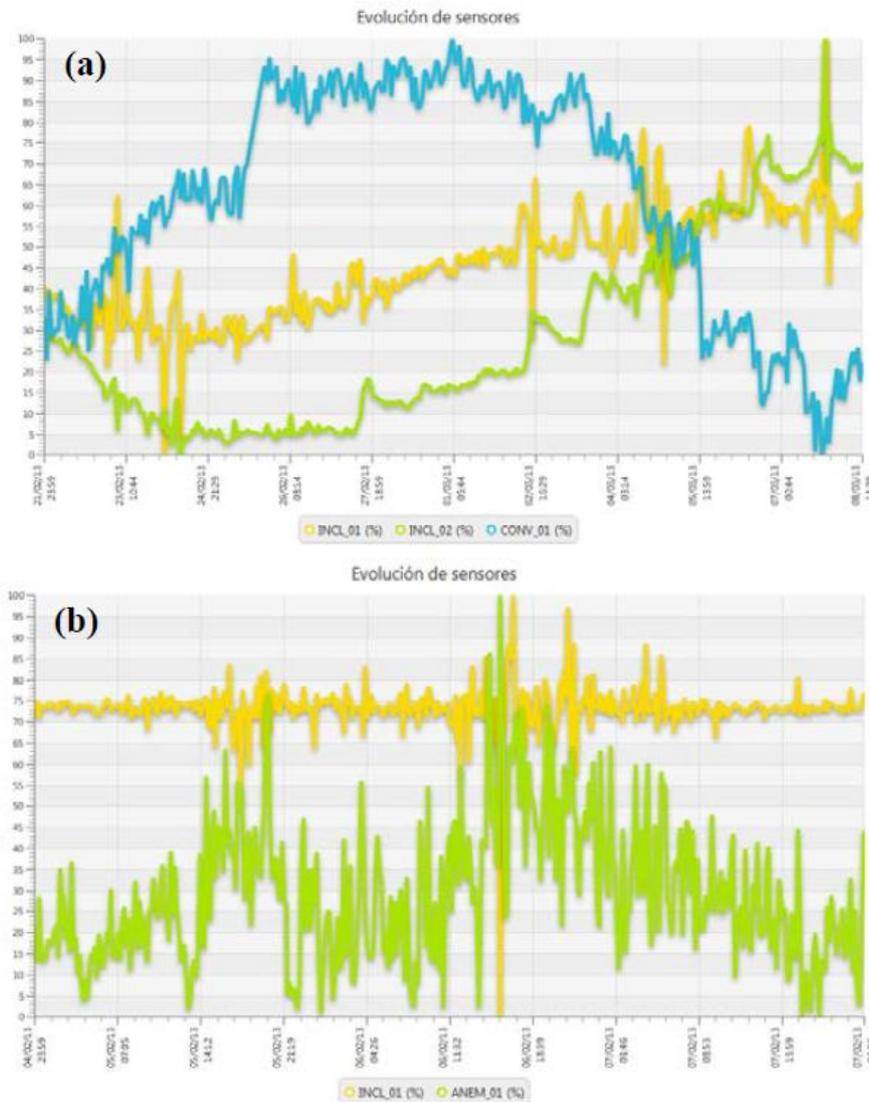


Figura 3.1.14. Ejemplos de relaciones entre los sensores instalados (los ejes de coordenadas están relativizados para cada sensor). (a) A medida que los inclinómetros ("+" indica desplome hacia el interior del muro) registran valores de desplome hacia el interior de los muros, la cinta de convergencia ("- indica acortamiento) refleja un acortamiento, y viceversa. (b) La influencia del viento sobre los muros se refleja en el registro de los inclinómetros mediante vibraciones instantáneas y su posterior atenuación.

3.1.5. INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

Dicha integración se basa en la implantación de una arquitectura RTU sobre PC Industrial, junto a las tarjetas de adquisición de datos adecuadas al tipo de sensores dispuestos, que realiza ininterrumpidamente la recogida de los datos tomados, junto con la instalación de un servidor de aplicaciones, que periódicamente se comunica con el sistema, extrae los datos y les da persistencia en una



base de datos, y finalmente un servidor web, que permite el acceso remoto a estos datos mediante una aplicación desarrollada en JavaFX que constituye una novedosa plataforma para el desarrollo de aplicaciones enriquecidas de Internet.

3.1.5.1. EL BACK-END - ELEMENTOS

3.1.5.1.1 Autómata central y estaciones remotas

Como elemento central, se emplea un PC industrial, de la marca alemana Beckhoff, equipado con placa Intel® Core™2 Duo, como el de la Figura 3.1.15. Dispone de todas sus conexiones en la parte frontal, mientras que la parte trasera permite su encaje en el carril DIN. La ventilación se realiza por la parte inferior.

Se trata de una unidad compacta de procesamiento con 2 GB de RAM, 80 GB de disco duro, alimentado a 24 V en continua, con conexión de red de alta velocidad, Ethernet o EtherCAT. El software de control empleado es TwinCAT.

Dado que el armario central habitualmente no se encuentra en la ubicación de los sensores, se deben emplear estaciones intermedias en otros armarios de distribución.



Figura 3.1.15. PC industrial para armario de distribución C6920.

Para ello, se disponen unidades remotas EK1100, que permiten la conexión entre el PC con los terminales EtherCAT sobre los que se conectan los sensores, a través de la red EtherCAT. De este modo, se pueden poner tantas estaciones remotas como sea necesario, con distancias entre ellas no superiores a 100 m. Las conexiones entre



estaciones y con el PC industrial se realizan igualmente en la red EtherCAT, tal y como se muestra en la Figura 3.1.16.

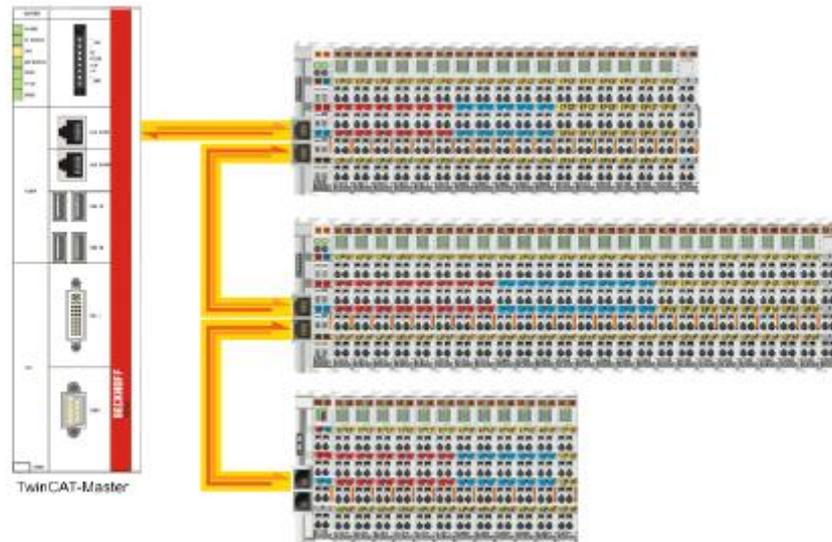


Figura 3.1.16. Conexión entre PC industrial y terminales en varias salas remotas.

3.1.5.1.2 Tarjetas de adquisición de datos

Tal y como se muestra en la Figura 3.1.17(a), la conexión con los sensores se realiza a través de diversos terminales acoplados sobre la estación uno tras otro mediante un sistema de anclaje rápido. En general se tratará de terminales de entrada analógica EL3xxx. Constan de 1, 2, 4 u 8 canales de entrada, y la señal puede ser de voltaje (con tarjetas EL3602 con rango -5V a 5V), de corriente (tarjetas EL3052 con rango de 4 a 20 mA), o de resistencia (tarjetas EL3692 con rango de 10 mΩ a 10 MΩ), con resolución en general de 24 bits.



Figura 3.1.17. (a) Estación remota, terminales. (b) Algunos sensores instalados.



3.1.5.1.3 Sensores

Para la monitorización de los parámetros estructurales se emplearon los siguientes tipos de sensores, Figura 3.1.17(b): Inclinómetros, fisurómetros, cintas de convergencia, termohigrómetros, anemómetro y veleta.

En la Tabla 3.1.2 siguiente se pueden observar nuevamente una relación de los sensores instalados.

Sensor	Modelo	Fabricante	Abreviatura
Inclinómetros	Servo-inclinometer SX41100	Sensorex	<i>INCL</i>
Fisurómetros	LVDT V02505SAN3	Solartrom Metrology	<i>FIS</i>
Cinta de convergencia	WS10-50-R1K-L10-SB0-D8-HG	ASM GmbH	<i>CONV</i>
Termohigrómetro	P18	PCE-Ibérica	<i>THG</i>
Anemómetro	Modelo 3R KYWS	Darrera	<i>ANEM</i>
Veleta	3R KYWD	Darrera	<i>VEL</i>

Tabla 3.1.2. Sensores instalados en el Seminario Mayor

En la Figura 3.1.18 se vuelve a mostrar el caso concreto de la instalación realizada en la Iglesia del Seminario Mayor de Comillas, con la disposición de diversos sensores en tres áreas diferentes con sus correspondientes estaciones remotas.

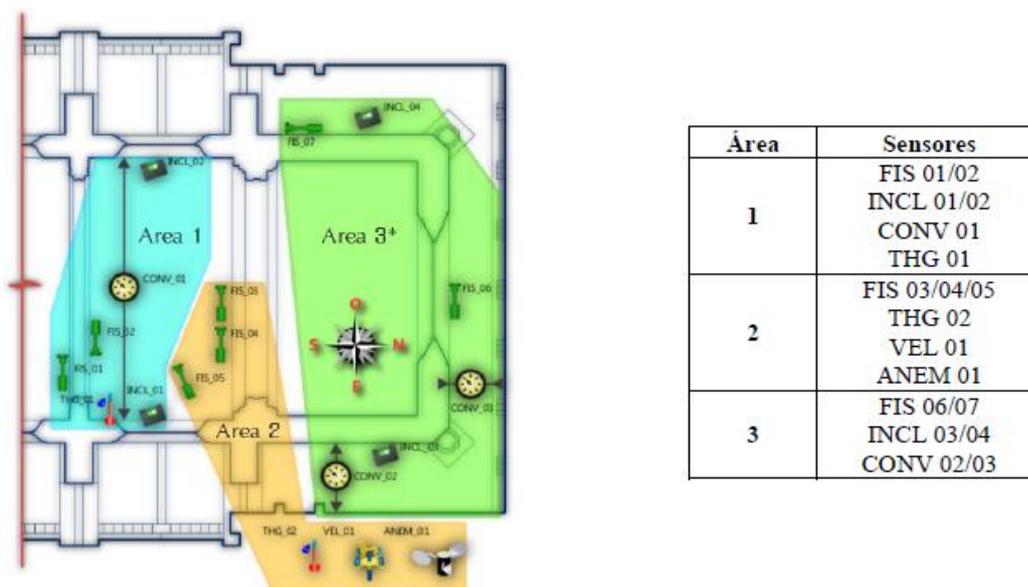


Figura 3.1.18. Disposición de los sensores en las diferentes zonas a monitorizar.



3.1.5.2. SERVIDOR

3.1.5.2.1 PC Industrial

Junto al PC de Beckhoff se instala un segundo PC industrial convencional, con Windows XP/7 como sistema operativo, más tamaño de disco duro y memoria, y posibilidad de acceso remoto, en el que instalar un servidor Java.

De este modo, se disponen de manera desacoplada el servidor del autómeta, lo que permite modularidad, facilidad de remplazo y separación real de componentes de software.

El conjunto de ambos PCs tiene alimentación de respaldo gracias a la instalación de baterías auxiliares, lo cual garantiza una autonomía de una semana.

3.1.5.2.2 Servidor de Aplicaciones

El servidor Java se articula conforme al paradigma clásico Modelo-Controlador-Vista MVC/2. Como se indica en la Figura 3.1.19, la capa de negocio se encarga fundamentalmente de la comunicación con el autómeta, a través del protocolo Automation Device Specification (ADS), propietario de Beckhoff, que permite a través de una librería dinámica la conexión desde el servidor con las variables internas definidas en el autómeta, de modo que en una única llamada realizada en cualquier instante, o de forma periódica, se devuelva el valor en ese instante de todas las variables monitorizadas.

La Figura 3.1.20 muestra un detalle de la comunicación entre ambas plataformas.

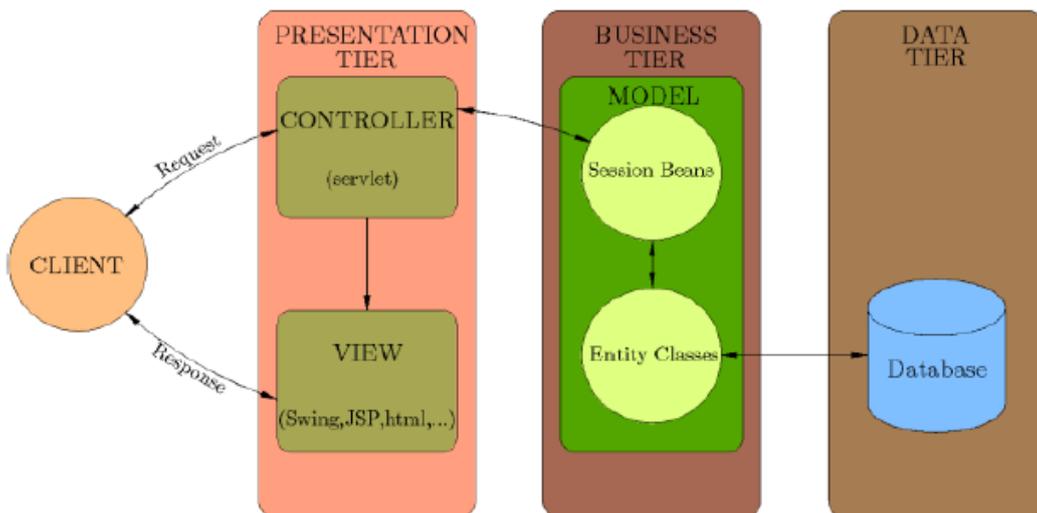


Figura 3.1.19. Modelo MVC/2 implementado



Una de las tareas periódicas del servidor consiste en la toma de datos cada 30 segundos y su persistencia en una base de datos para su posterior estudio. Igualmente se comparan los valores tomados con los rangos límites de validez definidos y se emiten alarmas en caso de que aparezcan valores fuera de rango.

3.1.5.2.3 Servidor Web

Finalmente, la capa de presentación es la responsable de la comunicación con el Cliente, mediante el uso de servlets o servicios REST. Se encarga de transmitir los datos instantáneos de los sensores monitorizados o del conjunto de datos registrados en un período de tiempo para su estudio en gráficas o en hojas de cálculo, toda vez que se haya autorizado el acceso a usuarios registrados. Según el rol de estos usuarios se habilitan ciertas opciones de configuración del sistema.

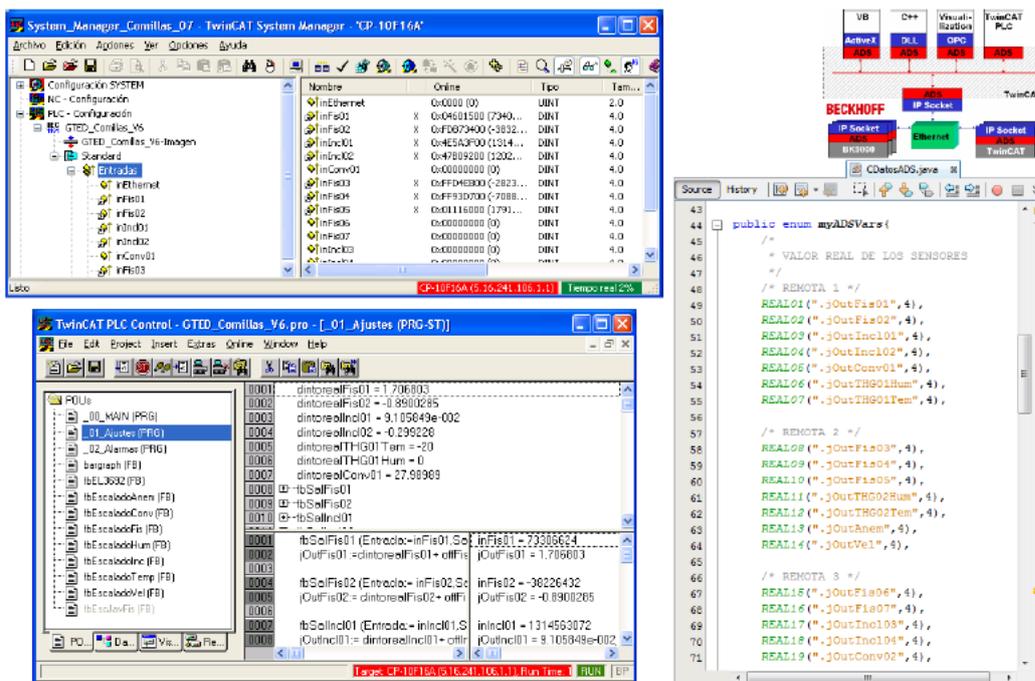


Figura 3.1.20. Conexión entre el autómatas y el servidor Java

3.1.5.3. INTERFAZ DE USUARIO

Del lado del cliente, se ha desarrollado una aplicación de software que permite el acceso remoto a los datos monitorizados sin necesidad de desplazamiento a la instalación, en otros casos evita la toma de riesgos relacionados con la toma de datos en zonas inseguras.



Se ha realizado una aplicación en Java que se comunica a través de Internet con el servidor, empleando el nuevo framework JavaFX 2.2 para el desarrollo de aplicaciones enriquecidas de Internet.

Bajo un diseño gráfico apropiado, se muestra la instalación monitorizada mediante la inclusión de los planos del edificio en formato vectorial, lo que facilita la visualización de los datos recogidos por los sensores en su precisa ubicación, Figura 3.1.21.

Igualmente se facilitan los datos tomados en rangos temporales determinados mediante gráficas de una o varias variables, Figura 3.1.22, o ficheros csv para posterior tratamiento en hoja de cálculo.

Usuarios autorizados pueden modificar ajustes de escala de los sensores, definir rangos de validez de los datos tomados (Figura 3.1.23) y crear alarmas a partir de sensores fuera de dichos rangos que son recibidas por correo electrónico en las direcciones asignadas.

3.1.5.4. RESULTADOS

En relación con los resultados obtenidos tras la implantación de la herramienta descrita, es posible establecer un contraste entre los datos recogidos por los sensores instalados mediante el sistema remoto presentado, con datos tomados manualmente in situ, presentando gráficas de evolución de dichos datos como las que se muestran.

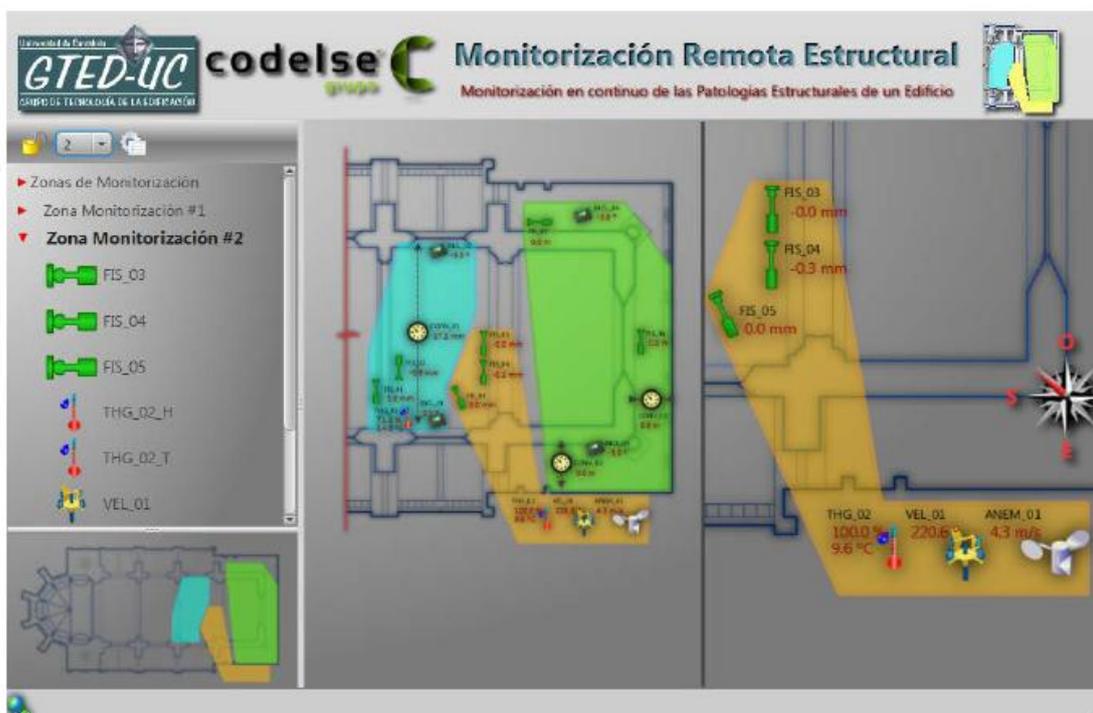


Figura 3.1.21. Aplicación cliente. Visualización en tiempo real de datos de sensores.

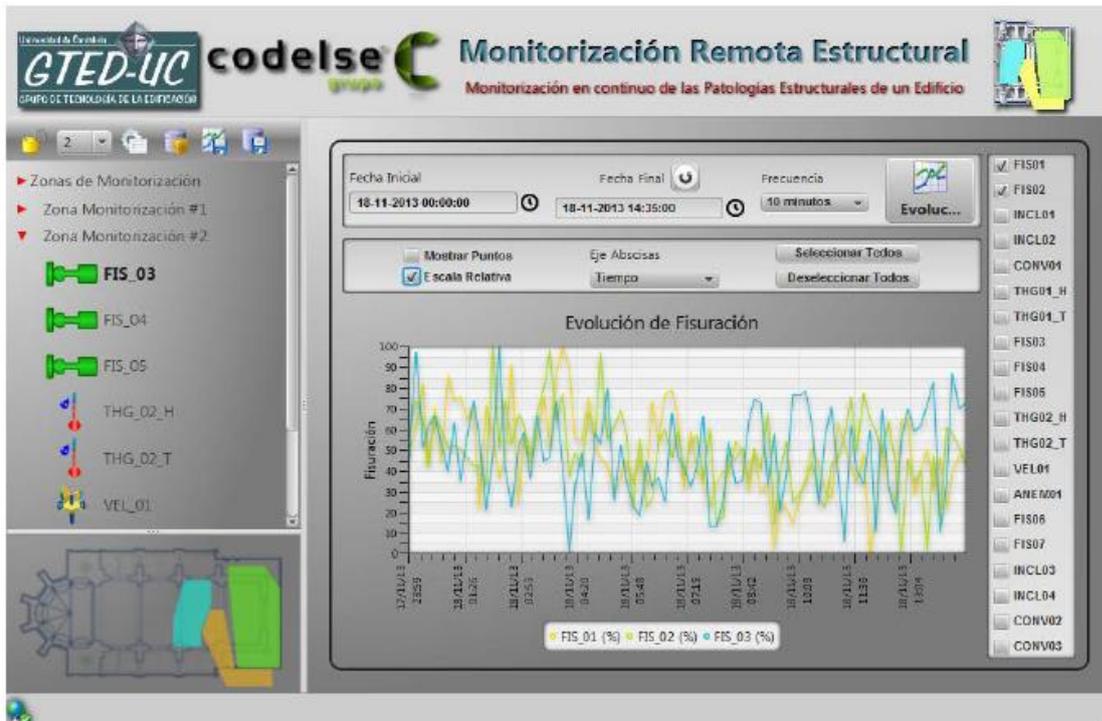


Figura 3.1.22. Aplicación cliente. Visualización de gráficas.

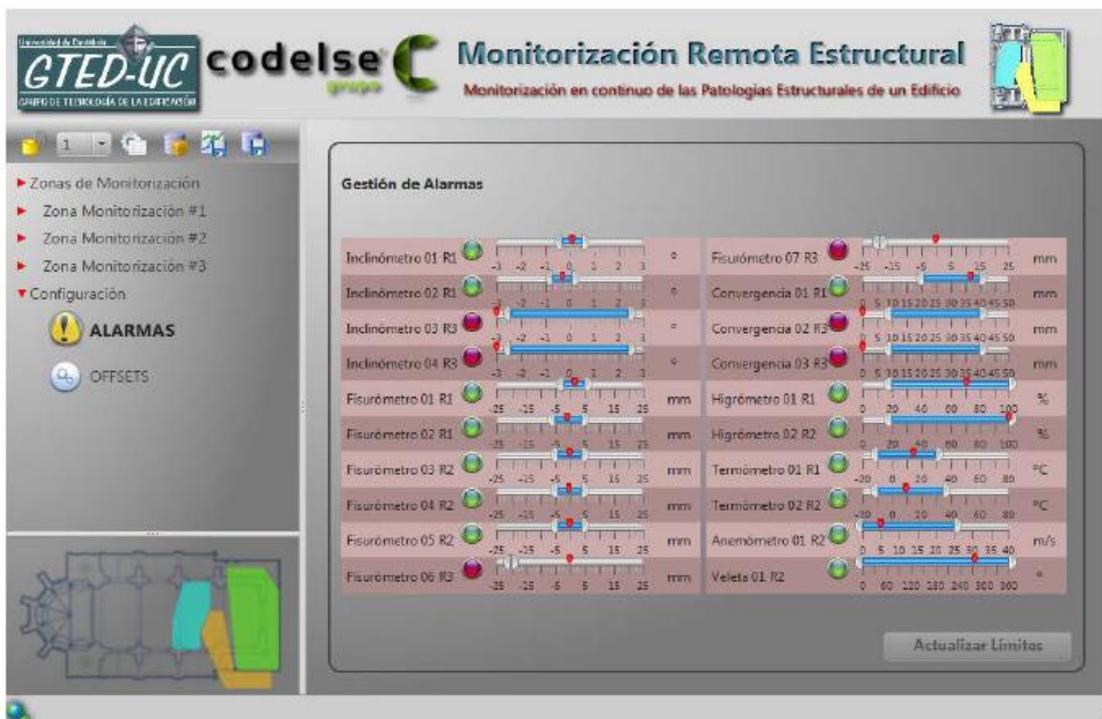


Figura 3.1.23. Aplicación cliente. Definición de rangos de validez y alarmas.



3.1.6. CONCLUSIONES

A la luz de todo lo comentado puede concluirse que los sistemas de monitorización contribuyen de forma indudable al conocimiento de la evolución de determinados procesos en una construcción histórica. Se plantea como una acción especialmente interesante para desarrollar una estrategia de mantenimiento preventivo.

En lo referente a la aplicación práctica concreta presentada, conviene referir la versatilidad conseguida con el sistema implementado, tanto en el aspecto del hardware (autómata, terminales y sensores), como en el apartado del software (servidor de aplicaciones y servidor web, persistencia de datos, y cliente).

También conviene aludir a lo interesante de combinar una monitorización electrónica en continuo con una de tipo manual y discreta, tanto para favorecer el incremento de los puntos bajo control con un sobrecoste reducido, como para disponer de mediciones de contraste de las obtenidas con los sensores electrónicos.

Finalmente, en relación a la evolución de las variables monitorizadas en la Iglesia del Seminario Mayor, tras un año de seguimiento, puede concluirse que los puntos de control manual y continuo no han registrado movimientos significativos, circunstancia razonable a la luz de las estructuras de apeo existentes en el cuerpo de la iglesia frente a acciones verticales, y a los tirantes existentes entre contrafuertes para contrarresto de los empujes horizontales de los arcos.

A lo largo del trabajo realizado en la instalación ubicada en la Iglesia del Seminario Mayor de Comillas se ha mostrado la versatilidad del sistema implementado, tanto en el aspecto del hardware: autómata, salas remotas, terminales y sensores, como en el apartado del software: servidor de aplicaciones y servidor web, persistencia de datos, y cliente.

La modularidad del sistema, la facilidad de incorporación de nuevos sensores o salas monitorizadas, son características del proyecto.

La aplicación cliente desarrollada con la última tecnología en entornos de usuario ha demostrado que se pueden realizar aplicaciones de monitorización industrial amigables y atractivas al usuario, de manejo sencillo e intuitivo, pero con todas las funcionalidades requeridas en el proyecto.



3.2. La torre de la Silla de la Reina en la Catedral de León. **Análisis numérico en combinación con monitorización** **estructural**

3.2.1. INTRODUCCIÓN

3.2.1.1. Contexto histórico

Tras la fusión de los reinos de Castilla y León la ciudad había perdido parte de la pujanza e influencia que tuviera en el pasado. Sin embargo, gracias al esfuerzo entusiasta del pueblo, los reyes y obispos, y al hecho de encontrarse León en la ruta peregrina a Santiago, se obró el milagro de erigir una catedral gótica en el corto periodo de tiempo que media entre 1255 y 1302.

Y se hizo en el mismo lugar *mágico*, el punto más alto de la ciudad, donde los antecesores de los constructores góticos habían situado sus obras a través del tiempo. Ya en el siglo I, los romanos emplazaron allí las termas. Tras un periodo de ruinas, los reyes de León edificaron sucesivos palacios residencia hasta el siglo X. Llegado el año 1000 y una vez superado el pánico milenarista y las invasiones islámicas de Almanzor, una basílica románica ocupó el lugar del palacio y por fin, la catedral. Esta variedad de edificaciones pone de manifiesto la importancia simbólica del lugar y explica una de las causas de la heterogeneidad y problemas de cimentación del templo (figura 3.2.1).

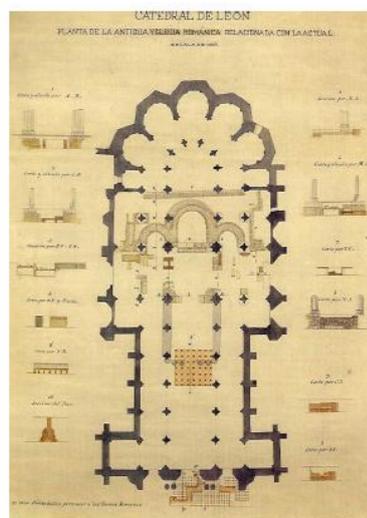


Figura 3.2.1. Planos superpuestos de los vestigios romanos, la basílica románica y la catedral gótica que muestran su estado en el siglo XIX.

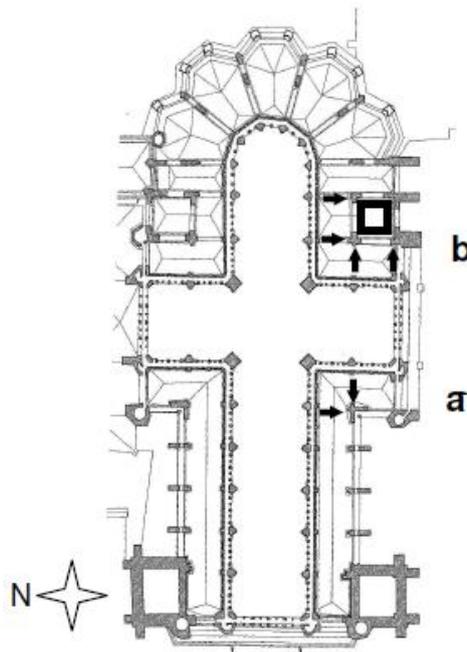


Figura 3.2.2. Catedral de León según los planos actuales: a) Cruce de empujes sobre pilar en el lado oeste. b) Empujes combinados en la zona de la cabeza, posición de la Silla de la Reina sobre la Capilla del Carmen.

3.2.1.2. Función estructural de la torre de La Silla de la Reina

Los empujes laterales de la nave principal se contrarrestan, siguiendo los esquemas góticos, mediante la combinación de arbotantes y botareles situados en el exterior. En el lado de poniente la catedral presenta tres naves, de 30m de altura la central y 13m las laterales. En estos tramos, los arbotantes salvan una luz de 5.25m entre los muros altos de la nave principal y los estribos para conducir los empujes hasta la cimentación. En el quinto tramo desde los pies, los arbotantes de la nave se cruzan con los provenientes del crucero, también de tres naves de idénticas dimensiones. El correspondiente estribo de esquina es especial y se resuelve adoptando una sección en L para proporcionar rigidez en ambas direcciones (figura 3.2.2.a).

El problema se presenta en el lado este del crucero. León, como Reims y otras catedrales góticas, dobla las capillas laterales en esta zona dando continuidad a la girola desde el presbiterio hasta el crucero. De esta forma la composición pasa a ser de 5 naves, la central y dos laterales de igual altura en cada flanco. La solución de estribo en L no es posible aquí



ya que se invadiría el espacio de las capillas. Para resolver este problema, clásico en el gótico medio existen tres soluciones:

a) Suprimir los arbotantes del crucero y situar un estribo masivo adosado al mismo, como en París o Toledo (figura 3.2.3.a). Esta solución exige ocupar una parte del espacio interior de la capilla con el estribo. En León, como en Saint Denis, la capilla cumplía las funciones de sacristía y tesoro, por lo que la interferencia del contrafuerte es inaceptable.

b) Cruzar los arbotantes sobre una pila exenta como en Amiens (figura 3.2.3.b). Esta pila debe resistir las acciones horizontales combinadas exclusivamente con la acción centradora de su peso propio.

c) Erigir una torre, cuadrada en este caso, que recoja los empujes de un tramo completo de nave y transepto. Los empujes se llevan hasta la cimentación en la cara de fachada con ayuda del peso propio de la torre. Esta solución fue la utilizada en Saint Denis, el templo prototípico del gótico, (figura 3.2.3.c).

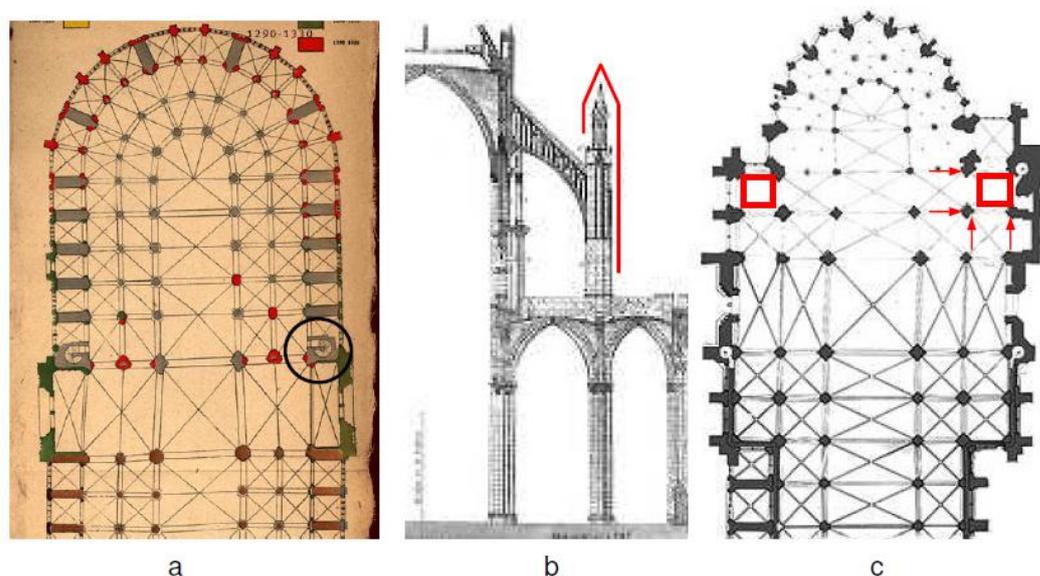


Figura 3.2.3. Soluciones estructurales para los empujes de cruce de nave y crucero: a) París, por medio de la supresión de arcos de vuelo en el transepto y la construcción del contrafuerte masivo. b) Amiens, mediante pilares exentos. c) Las torres que actúan contra los empujes en Saint Denis son similares a las de la Silla de la Reina en León.

En 1454, los maestros de obras Cándamo y Jusquín de Holanda decidieron adoptar esta última solución en ambos brazos del crucero. En el norte se construyó la Torre Limona y en la cara sur la Torre del Tesoro,



desde 1550 Silla de la Reina, (figuras 3.2.2.b y 3.2.4). Ambas construcciones son huecas y presentan ventanas ojivales en sus cuatro fachadas. Dos muros adyacentes son ciegos hasta cimentación mientras los otros dos (norte y oeste en la Silla) se sustentan sobre un pilar exento en el ángulo noroeste de la Capilla del Carmen. En la esquina de fachada (la suroeste) existe un potente contrafuerte que alberga una escalera de caracol para acceder a la planta de cubierta desde la capilla.

Los muros de la torre tienen un espesor de 0.80 m, compuestos de dos hojas exteriores de sillería de unos 0.20 de espesor y un relleno de cascote de 0.40 m. La altura total de la torre es de unos 30 m, 17 hasta la cubierta de la capilla y 13 más hasta la coronación, aproximadamente.

La construcción de la Silla de la Reina se interpreta como un primer intento de evitar, más de 150 años después de haberse completado esta parte del templo, la tendencia del edificio a moverse hacia el sur. La historia de la torre está ligada a los daños más importantes sufridos por la catedral desde el siglo XIII hasta el presente.

3.2.1.3. Antecedentes de patologías de la Silla de la Reina

Las torres La Limona y La Silla de la Reina experimentaron evoluciones y avatares muy distintos. El lado sur (La Silla) es normalmente más problemático en las construcciones históricas ya que está más expuesto a las variaciones térmicas, soleamiento y ciclos hilo-deshielo. Además, en este caso, las condiciones de cimentación del lado sur son las más desfavorables. En concreto el pilar exento de la torre en su ángulo noroeste no coincide en planta con la cimentación de la antigua basílica románica.

Su gemela del lado norte, La Limona, quedó en mejor situación y no cuenta con el segundo cuerpo de muros calados y tracería que se observan en las fachadas sur y este (también en la oeste, en el pasado) de la Silla. Los problemas de la torre provienen no sólo de estas dolencias locales sino que también tienen causas derivadas de su función estructural, acusando las patologías de la fachada sur del crucero y del crucero mismo.



Figura 3.2.4. Vista sur de la Catedral, en donde se ubica La Silla de la Reina.

Se tiene constancia de que en 1586 el cabildo trató los “serios problemas de la fachada sur del transepto”. Los cuatro pilares principales mostraban una fuerte encurvación (que es visible hoy día), a este síntoma siguió el colapso de la bóveda central del crucero, de 12 m. de luz en cada dirección. La solución propuesta, y ejecutada, contribuyó antes a aumentar los daños que a resolver sus causas ya que se cubrió el recuadro del crucero con una cúpula hemiesférica, propia de la construcción renacentista de la época pero incompatible con el esquema gótico (figura 3.2.5).

Probablemente fue entonces cuando se cegaron las ventanas ojivales de las fachadas de la torre.

Los empujes desequilibrados y la mayor deformabilidad del lado sur junto a los mencionados problemas de cimentación condujeron a un colapso parcial en 1743, cuando se derrumbaron las bóvedas de la capilla del Carmen y la adyacente del lado de la cabecera. Este movimiento arrastró (o fue originado) por el hundimiento del pilar principal suroeste y de las pilas menores circundantes. Sólo el pilar exento situado bajo la esquina noroeste de la Silla de la Reina quedó en pie, seguramente gracias al peso estabilizador de la torre.

Según las crónicas de la época, el movimiento de la fachada sur del crucero tuvo una magnitud de 6 pulgadas (unos 0.15 m). Las bóvedas de la capilla bajo la Silla fueron reconstruidas en ladrillo (siendo las únicas



de este material en la catedral) y reforzadas con tirantes de hierro. En estas condiciones resistió la torre el paso el tiempo, incluyendo dos terremotos de cierta importancia, hasta 1881, cuando “*debió ser reparada para detener los movimientos y crecimiento de las grietas detectadas*”. Dos años más tarde, siguiendo un proyecto de Demetrio de los Ríos, las bóvedas de la capilla del Carmen fueron reconstruidas, se eliminaron los tirantes y se restituyeron las ventanas originales.

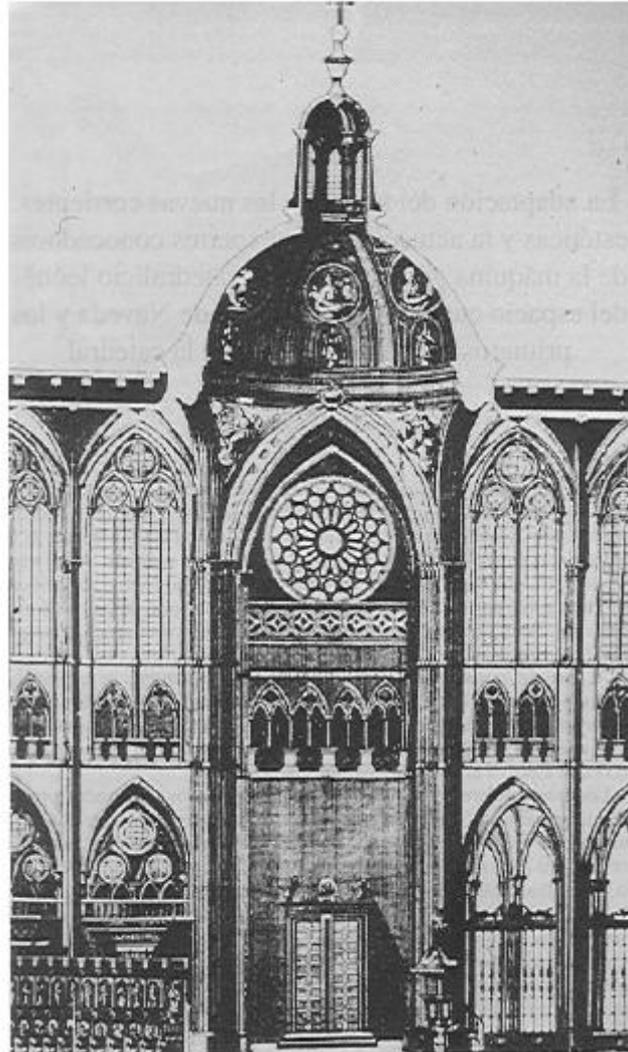


Figure 3.2.5. Corte longitudinal que muestra la cúpula semi - esférica construida en el siglo XVI.

3.2.2. RESTAURACIÓN Y MONITORIZACIÓN



3.2.2.1. Daños actuales en la Silla de la Reina. Selección de los casos de carga.

Durante los trabajos de restauración iniciados en 1999, se detectaron dos grietas importantes en los muros norte y oeste de la torre, los que reciben los arbotantes cruzados de nave y transepto, tal como puede apreciarse en la figura 3.2.6. Ambas comienzan próximas al arranque de los huecos ojivales del primer cuerpo (los que estuvieron cegados hasta el siglo XIX) y progresan en vertical hasta la coronación. La abertura (presumiblemente máxima ya que fue observada en época fría) era variable entre 20 y 50 mm. Se detectó que en ciertos sitios se habían utilizado cascotes, fragmentos de teja, etc. como ripios para rellenar las grietas. La grieta norte se marcaba por igual a ambos lados del muro, es decir era pasante en todo el espesor de 800 mm. La coincidencia observable visualmente en la grieta oeste era sólo parcial. La grieta norte, además de la abertura acusaba una fractura entre ambas caras de unos 40 mm medidos en dirección perpendicular al plano del muro. Esta fractura comenzaba en la cercanía de la acometida del arbotante bajo de la nave al muro norte.

Se realizó un primer análisis estructural con tres objetivos principales:

- a) Comprender las posibles causas de los daños detectados, identificando zonas y elementos críticos.
- b) Valorar la aptitud resistente de la torre frente a la posible inestabilidad de la pila exenta en el interior de la capilla.
- c) Predecir el orden de magnitud de los movimientos y deformaciones previsibles para seleccionar o descartar instrumentos y métodos de auscultación en función de su sensibilidad.

Finalmente se seleccionaron tres casos de carga.

- a) Los empujes originados por viento y cargas gravitatorias en la nave y el transepto, tanto en los arbotantes altos como en los bajos.
- b) La sollicitación térmica sobre la torre.
- c) Un desplazamiento impuesto en la cabeza del pilar exento de la capilla, para analizar efectos derivados de inestabilidad en el crucero o la fachada sur.



Figura 3.2.6. Vista del muro oeste desde la parte interior que muestra la amplia grieta y la fractura previa a la restauración.

3.2.2.2. Análisis estructural

Se ha diseñado un estudio basado en una combinación de análisis numérico y datos experimentales, cuyas líneas generales de dicha metodología puede encontrarse en trabajos previos. En una primera fase, se lleva a cabo un análisis simplificado con el fin de identificar los elementos más comprometidos y las variables críticas en el mecanismo resistente, estimar la magnitud de los movimientos medibles y el umbral de riesgo; es decir, qué valores de las variables críticas deben ser considerados preocupantes o alarmantes en caso de ser medidos durante el periodo de auscultación. Una vez que se disponga de esta información, es posible diseñar una monitorización efectiva y optimizada a los recursos disponibles.

Los cálculos siguen el esquema esbozado en la figura 3.2.7: primero se analizan las bóvedas altas de la nave principal y el transepto para estimar los empujes a los niveles de los arbotantes para las cargas gravitatorias y de viento. Estas cargas son *filtradas* por los arbotantes



antes de acometer a la torre, por lo que se analizan por separado estos elementos obteniéndose límites superior e inferior de los valores de los empujes transmitidos y de su punto de aplicación. Estos empujes se introducen como fuerzas exteriores en un primer modelo lineal de elementos finitos de la torre. Por supuesto existe la posibilidad de analizar el conjunto estructural completo en un modelo general tridimensional, pero, como se ha reseñado más arriba, se trata de *discernir* el funcionamiento estructural y no de obtener una elevada precisión de los resultados, que sería ilusoria en este estadio.

Además de las cargas descritas se considera un caso de carga para un desplazamiento impuesto en la cabeza del pilar. La magnitud de este desplazamiento se obtiene a su vez de un cálculo indirecto: a través de un planteamiento energético de bloques rígidos se halla el mínimo desplazamiento horizontal necesario para movilizar un mecanismo de colapso en las bóvedas de la Capilla del Carmen; colapso que realmente tuvo lugar. Se admite la hipótesis de que este movimiento debe estar localizado a una cota mínima igual a la cota superior de los rellenos de los senos de las bóvedas, punto en que la rigidez baja bruscamente. Se obtuvo un movimiento absoluto de 330 mm en dirección sureste para el colapso en mecanismo multiarco de dos bóvedas contiguas y de 100 mm para el fallo de una sola bóveda. Este último valor se encuentra en el orden de magnitud de los movimientos referidos por las crónicas de 1743.

Los incrementos térmicos impuestos de manera uniforme en el modelo fueron de ± 20 °C, teniendo en cuenta que los muros se hayan expuestos a la atmósfera por ambas caras.

Las cargas de viento se consideran en los cálculos de los empujes de la nave, pero no actuando directamente sobre la torre, en atención a la posición abrigada que ocupa ésta.

3.2.2.3. Resultados de los cálculos, indicios para el diseño de la monitorización

Los cálculos efectuados no permitieron explicar la naturaleza y posición de las grietas observadas. Sin embargo, fueron útiles para el diseño de la instrumentación. Las cargas gravitatorias están ya presentes en la estructura por lo que no es posible plantear una auscultación para medir sus resultados sobre la estructura. Sólo es posible medir efectos diferenciales desde el instante en que se colocan los dispositivos de



medida. Si las grietas están actuando simplemente como juntas de dilatación son previsibles movimientos relativos de décimas de milímetro. Eventuales asentamientos en cimentación o empujes desequilibrados sobre la pila producirían altas concentraciones de esfuerzos en las bóvedas pero no sobre el cuerpo superior de la torre (figura 3.2.8).

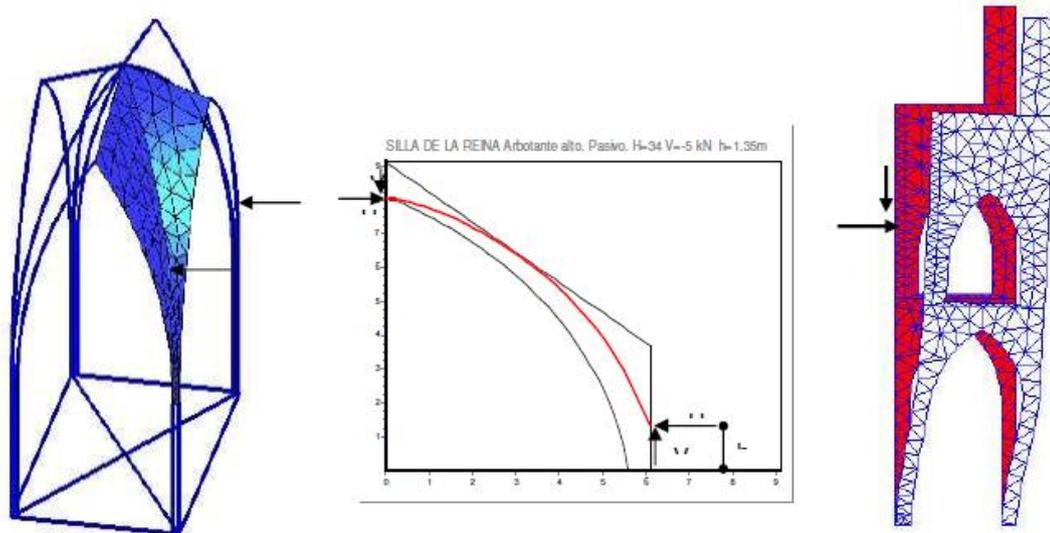


Figura 3.2.7. Esquema de sencillos cálculos para obtener los límites superior e inferior de los empujes de las altas bóvedas de la nave central y el transepto. Acción sobre las bóvedas al nivel del relleno granular, filtrando a través de los arcos de vuelo, y cargas concentradas impuestas al modelo de cáscara de elementos finitos de la torre.

Las cargas de viento no pueden producir esfuerzos significativos ni movimientos medibles en la torre.

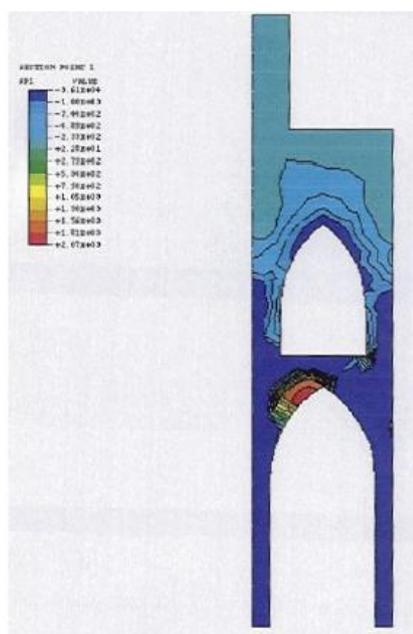


Figura 3.2.8. Contornos de primera tensión principal para el caso de carga con desplazamiento impuesto, lo cual indica la concentración de los daños en lo alto de las bóvedas, no en la parte superior de la torre.

3.2.2.4. Monitorización automatizada

De todos los casos de carga analizados, el único *no anormal* que puede dar lugar a movimientos significativos es el incremento térmico. Para despejar la incertidumbre existente en torno a la inercia térmica de elementos masivos de sillería expuestos por ambas caras a la atmósfera se colocaron 10 termopares tipo J (hierro-constantan) introducidos hasta 100 mm en taladros practicados en sillares de las hojas exteriores de los muros. Los taladros se rellenaron con morteros compatibles, de cal y polvo de piedra. Se instrumentaron de esta manera todos los muros en ambas caras, en zonas altas y bajas. Junto a 4 de los termopares embebidos se colocaron termopares aéreos para registrar a la vez la temperatura del aire en las caras soleadas y de sombra. Se colocó siempre un termopar embebido junto a cada transductor inductivo LVDT.

Especial atención merecen los arbotantes ya que su espesor es mucho menor, 0.50 m, y su relación superficie expuesta / volumen es mucho mayor que en los muros de la torre a los que acomete. Se desea verificar si este hecho, que induciría mayores dilataciones en los arbotantes y empujes adicionales a los estáticos, puede explicar la fractura observada



en ciertas regiones de las grietas. Para ello se colocó un termopar embebido en la cara sur (soleada) del arbotante más cercano al ángulo de levante de la torre.

Las temperaturas en el exterior e interior de la catedral se registraron en continuo cada tres horas.

En previsión de que pudieran existir efectos de dilatación y contracción por variaciones higrométricas (efectos que pueden llegar a ser muy importantes según sea la naturaleza de la piedra) se colocaron dos sensores de humedad, en el exterior a 30 m de altura y en la Capilla del Carmen. La frecuencia de lectura también fue de 3 h para contar al menos con 8 lecturas diarias para captar los ciclos noche/día.

La velocidad y dirección del viento se registraron mediante un anemómetro y una veleta instalados a unos 33 m del suelo, en la coronación de la torre, levemente por encima de la cota más alta de las cubiertas de la nave principal. Para recoger las máximas ráfagas la frecuencia de toma de datos se fijó en 10 s, almacenándose las medias y máximas cada hora.

Para registrar la evolución de la abertura de las grietas se instalaron 4 transductores inductivos de 200 mm de base, dos en cada grieta, uno en cada cara del muro (figura 3.2.10). El objetivo es discriminar si los movimientos siguen las variaciones térmicas estacionales o si presentan una tendencia de crecimiento achacable a un mal estructural.

La instrumentación diseñada para el pilar interior consiste en dos LVDT similares a los situados en las grietas de los muros. En el pilar se colocan en posición vertical, en la cabeza del elemento en dos puntos diametralmente opuestos alineados a 45° de la dirección norte-este (figura 3.2.9). De esta forma, es posible detectar cualquier incremento en la excentricidad del axil, que produciría un aumento de curvatura, presumiblemente máximo en la dirección instrumentada. Otra opción considerada fue la de registrar el movimiento horizontal de la cabeza del pilar, ante la dificultad de disponer la instrumentación necesaria a casi 13 m del suelo tomando a la vez una referencia absoluta se decidió monitorizar las deformaciones verticales.

Todas las lecturas automáticas se registraron en un equipo de adquisición de datos conectado a un PC, instalado en la escalera de caracol de la torre.

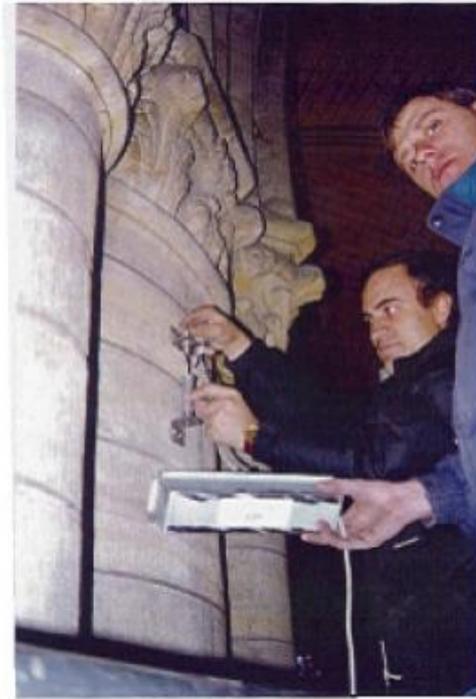


Figura 3.2.9. Puesta en marcha de los LVDTs en la parte superior del pilar.



Figura 3.2.10. En la parte izquierda, disposición del transductor inductivo ubicado en la grieta norte, habida cuenta del taladro realizado para el termopar empotrado. A la derecha, vista del inclinómetro colocado en el ángulo



noroeste.

3.2.2.5. Toma de mediciones presenciales.

La respuesta estructural de la torre depende de que se verifique su monolitismo en planta, es decir, de realmente funcione como una sección cajón solidaria. En caso de abrirse sus muros, los paños funcionarían sin arriostramiento mutuo, incrementándose la esbeltez de cada elemento ante acciones horizontales en dos direcciones. Para verificar que no se produce este efecto, se midieron las distancias relativas entre cada par de muros opuestos, a diferentes alturas utilizando cintas de invar (medidas de convergencia, comúnmente utilizadas en túneles). Las campañas de lectura se realizaron cada 3 meses para registrar las oscilaciones estacionales.

Para registrar las inclinaciones de los ángulos de la torre, se instalaron inclinómetros en las esquinas opuestas sureste (la de máximo soleamiento) y noroeste (la que se apoya sobre el pilar). Estos dispositivos, frecuentemente empleados en la medición de la deformada de pantallas de hormigón armado, permiten la determinación del perfil deformado en toda la altura, a diferencia de los clinómetros, considerados como opción, que sólo registran la inclinación en el punto en que se fijan a la estructura. El inconveniente es que no es posible automatizar las medidas. A cambio de esta contrariedad, se trata de un método asequible y fácilmente adaptable a la aplicación requerida. Hasta donde los autores conocen, no hay precedentes de utilización de inclinómetros en edificios históricos, por lo que su aptitud para esta aplicación es experimental en este trabajo. Las lecturas de inclinometría se tomaron a la vez que las de convergencia por personal especializado.

3.2.3. FUNCIONAMIENTO DE LA INSTRUMENTACIÓN Y RESULTADOS PRELIMINARES

Las lecturas registradas y procesadas en un periodo de un año permiten concluir que los dispositivos instalados han funcionado de manera estable y fiable. A continuación se describen algunos resultados de interés.



3.2.3.1. Variables ambientales

3.2.3.1.1. Viento: Los registros de viento indican que la dirección predominante es la N-S. Las máximas ráfagas se registraron en los meses cálidos y no en temporales de invierno. Por ejemplo, durante el temporal Lotear que azotó a Europa en diciembre de 1999, con velocidades del viento de hasta 170 km/h en el norte de España, la máxima ráfaga medida fue de sólo 55 km/h. Sin embargo, existen datos de puntas esporádicas superiores a 150 km/h en el verano de 2000, cuando se detectó la caída de mortero de las bóvedas altas en el interior de la catedral. El tratamiento estadístico de las lecturas disponibles permite obtener los valores característicos de las medias y máximos anuales, figura 3.2.11.

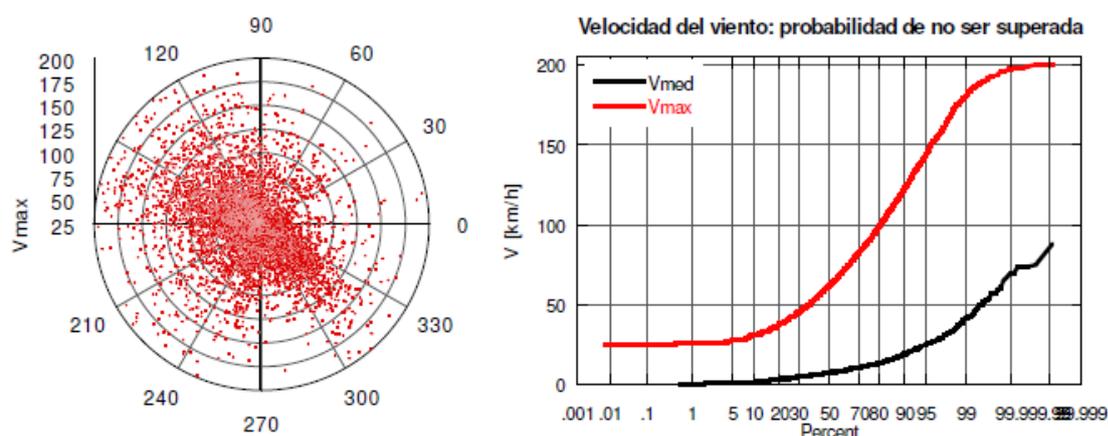


Figura 3.2.11. Registros de la dirección y de la velocidad (km/h) y de la probabilidad total por las ráfagas medias y máximas.

3.2.3.1.2. Temperatura: La inercia térmica de la piedra caliza resultó ser muy importante. Especialmente en tiempo frío. En la figura 3.2.12 se puede observar cómo, mientras la temperatura ambiente en el exterior osciló entre -6 y + 15°C, las variaciones a 100 mm de la superficie fueron de -2 a +10°C. En el periodo frío mostrado, de noviembre a marzo, la temperatura del aire bajó de cero en 59 ocasiones, sin embargo en el núcleo del muro sólo se registraron 10 temperaturas bajo cero. En cuanto a los gradientes entre el interior de la catedral y el exterior, puede observarse que las oscilaciones diarias se amortiguan dentro del edificio, manteniéndose una temperatura sensiblemente constante en torno a 6 °C. La temperatura de la piedra en los arbotantes fue, en todas las estaciones, prácticamente la misma que en los muros de mayor espesor.

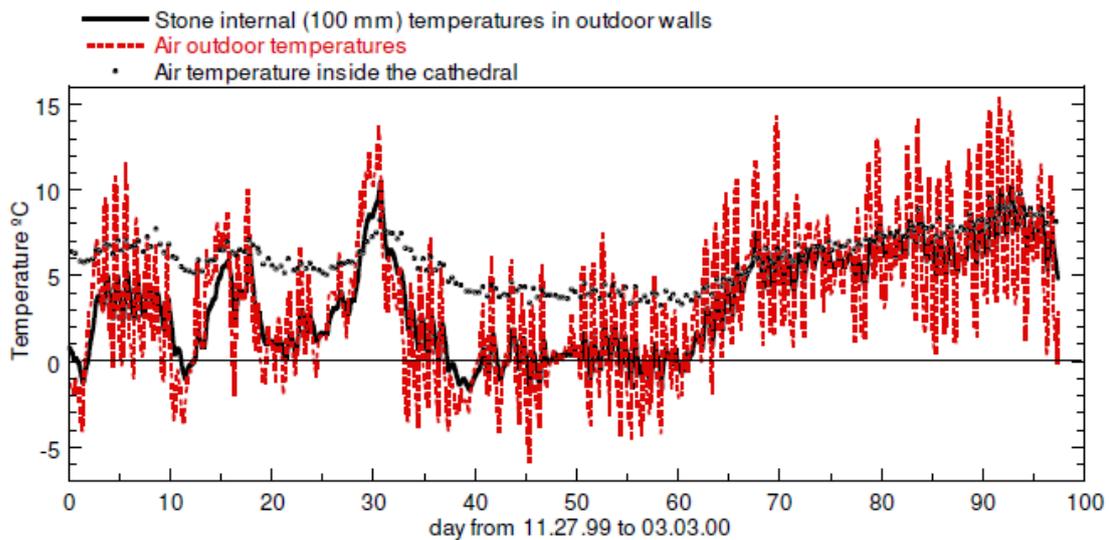


Figura 3.2.12. Comparación entre las temperaturas del aire registradas en el exterior y el interior de la catedral, así como la temperatura en el interior de los bloques de piedra, evaluados a 100 mm de profundidad.

3.2.3.1.3. Humedad: La humedad no resultó tener correlación fuerte con los movimientos observados. El contraste entre el interior y el exterior es grande, con valores próximos al 90 % fuera y variaciones entre 35 y 75% en el interior.

3.2.3.1.4. Presión atmosférica: Los valores de la presión atmosférica registrados por la estación meteorológica indican que los temporales en que se dan las máximas ráfagas de viento en época cálida se ven precedidos por bruscas variaciones de la presión.

3.2.3.2. Variables estructurales

3.2.3.2.1. Abertura de grietas: Los desplazamientos relativos entre los labios de las grietas tienen una magnitud reducida, del orden de décimas de milímetros. Se corresponden con las variaciones diarias y estacionales de la temperatura interior de la fábrica. Los desplazamientos medidos son menores que los calculados, con un coeficiente de dilatación térmica de $0.75 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y la hipótesis de continuidad del material. Las diferencias pueden deberse a una sobreestimación del coeficiente o, más probablemente, al hecho de que la fábrica es discontinua y presenta, además de las grandes grietas multitud de discontinuidades (fisuras,



huecos y juntas, llagas y tendeles) que actúan como juntas de dilatación distribuidas absorbiendo gran parte de la deformación que predice un modelo continuo.

Una posible aplicación que sugiere esta observación consistiría en determinar el *grado de discontinuidad o agrietamiento interno* de un muro (o cualquier otro elemento estructural) de fábrica calibrando en laboratorio de forma fiable el coeficiente de dilatación térmica de la fábrica y, una vez se conozca este dato, midiendo in situ los movimientos ante incrementos térmicos conocidos. Es posible que *el retraso* de los movimientos del muro real respecto al íntegro de laboratorio pueda relacionarse con la integridad estructural del elemento.

La figura 3.2.13 muestra la evolución de las grietas norte y oeste, en ambas caras de cada muro junto a la historia de temperaturas (en el eje de la derecha) para el mismo periodo que se tienen en la figura 3.2.12. Un resultado relevante que se puede extraer de dicha figura es la poca influencia real que tiene la operación de rejuntado de las grietas, ejecutada al final de las obras de rehabilitación a finales de enero de 2000 (día 55). Pese a que visualmente las grietas prácticamente desaparecen, la estructura continua moviéndose sin cambios. Ello es lógico, si se piensa que el rejuntado es una actuación somera que afecta sólo a los primeros cm de un muro de 0.80 m de espesor. Continuando con la idea expuesta en el párrafo anterior, puede suceder que una grieta rejuntada en el pasado resulte inadvertida para el técnico que analiza un cierto elemento estructural de manera que éste funciona con una junta de dilatación oculta para el analista. Así una estructura aparentemente sana mostraría un comportamiento anómalo que puede desconcertar o ser malinterpretado. Circunstancias como ésta forman parte de las muchas incertidumbres presentes en este tipo de construcciones, incertidumbres que se deben tener en mente al afrontar la evaluación estructural de edificios históricos.

La evolución de los movimientos en las grietas en un ciclo estacional completo, figura 3.2.14, indica que los movimientos detectados corresponden esencialmente a sollicitaciones térmicas y permite concluir que no existen procesos patológicos activos en la torre que hagan progresar las grietas.

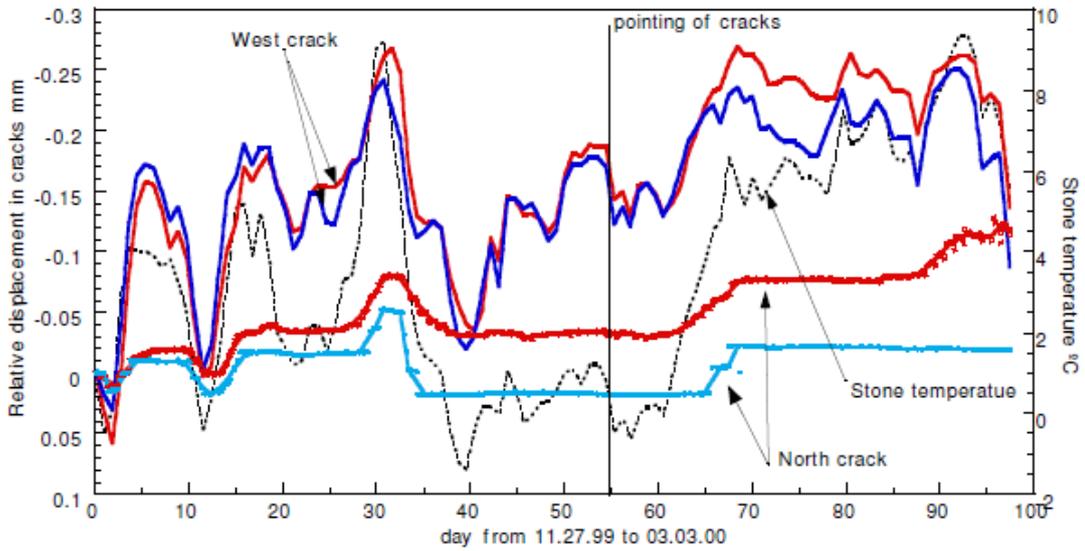


Figura 3.2.13. Evolución durante el invierno del desplazamiento relativo entre los bordes de las grietas y de la temperatura interna (a 100 mm de profundidad) en los bloques de piedra caliza pertenecientes a los muros de múltiples capas exteriores de la torre. Valores promediados diariamente.

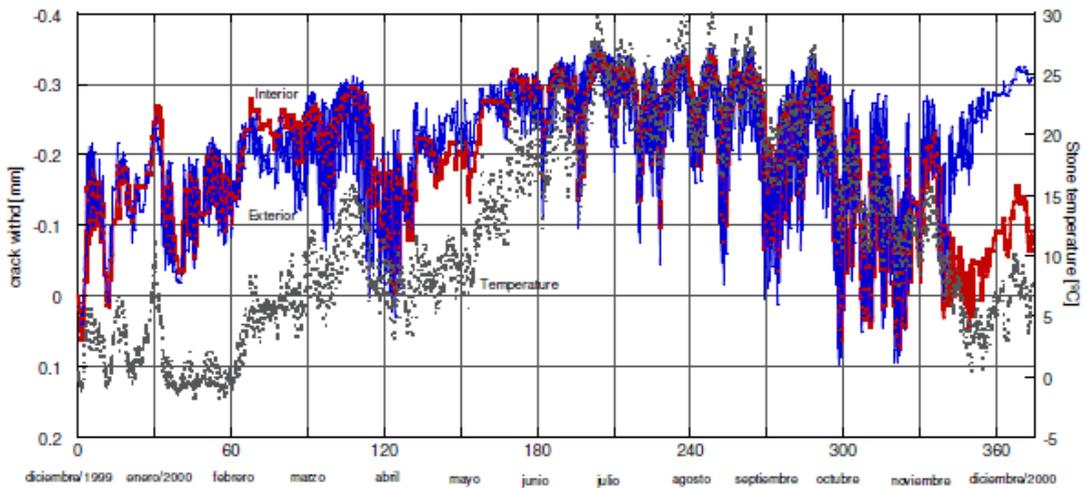


Figura 3.2.14. Seguimiento de la evolución de la grieta oeste y de la temperatura del aire (puntos) durante un período de un año. Los valores negativos (hacia arriba) indican el cierre de la grieta.

Las deformaciones medidas en la cabeza de la pila interior fueron muy pequeñas como se muestra en la figura 3.2.15. Se registraron deformaciones diferenciales entre ambas caras (curvaturas de la sección) sólo en el periodo cálido. Esta curvatura, de muy pequeña magnitud,



$0.02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, con dilatación hacia el sureste puede deberse a la deformación diferencial entre la fachada meridional y el interior de la catedral por efecto térmico. En cualquier caso, no progresa sino que remite hacia el otoño y desaparece en la estación fría. No se detectan, por tanto, excentricidades anómalas en este elemento crítico para la estabilidad de la torre.

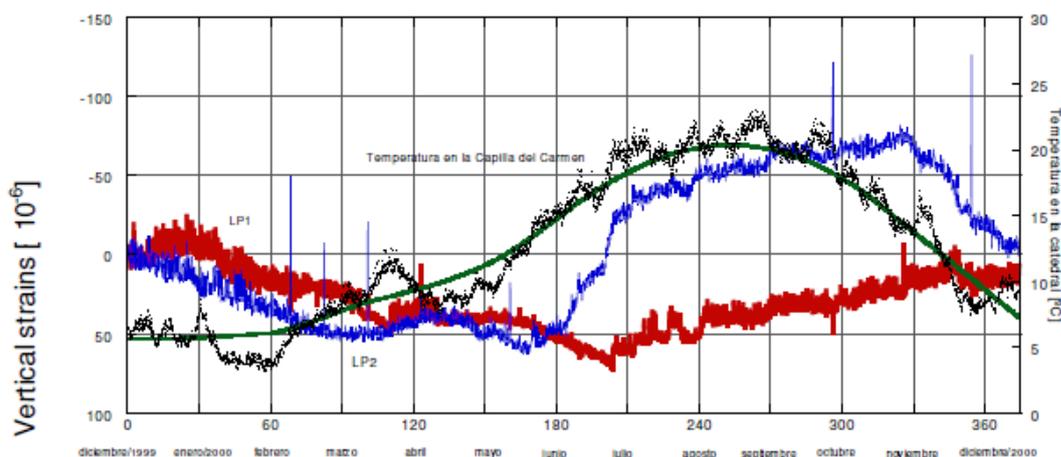


Figura 3.2.15. Tensiones verticales en la cabeza de la pila y temperatura en el interior del templo.

En cuanto a las medidas de inclinometría, los resultados han sido satisfactorios, midiéndose deformadas típicas de una estructura en ménsula a partir del segundo cuerpo de la torre. La inclinación corresponde al mayor incremento térmico de las fibras del sur y sur este respecto a las del norte, más próximas a la catedral. Las máximas deformaciones se dan en verano y alcanzan casi 10 mm en 9 m. La figura 3.2.16 muestra varios perfiles deformados de la esquina SE relativos a la lectura inicial. La dirección de los desplazamientos [mm] es SE.

Es interesante cómo a partir de la cota relativa 5 (tercer cuerpo de torre) los movimientos horizontales son mucho mayores. Ello es debido a que los muros norte y oeste no suben hasta este tercer cuerpo y la sección cajón se convierte en una sección de 2 alas mucho más flexible.

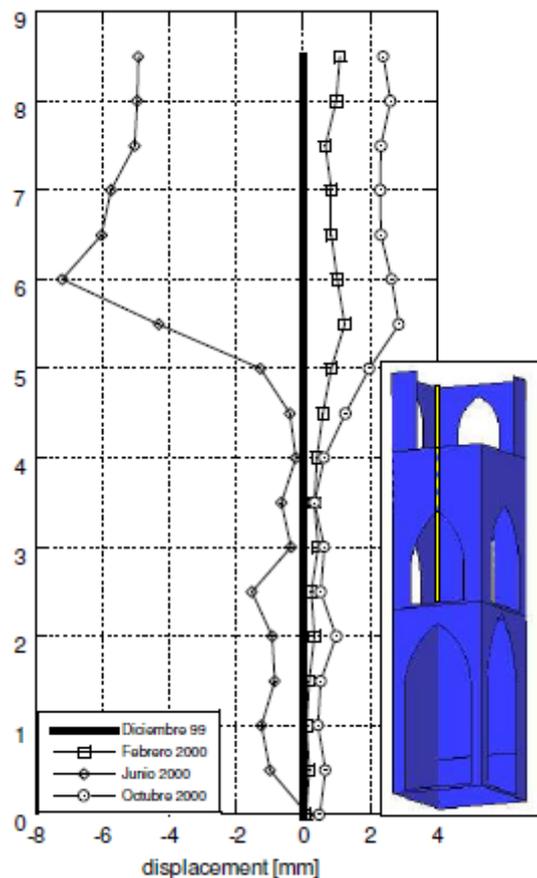


Figura 3.2.16. Perfiles deformados de la esquina SE de la torre. Vista desde el interior que muestra la posición del inclinómetro.

3.2.4. CONSIDERACIONES FINALES

Como han sugerido diversos autores, las incertidumbres inherentes a las construcciones de fábrica (propiedades mecánicas, geometría real, condiciones de contorno y de vinculación o continuidad, etc.) no son tan sólo una grave desventaja para la intervención y evaluación. Son las condiciones en que se desarrolla la actuación del ingeniero.

En la primera experiencia de contacto con la respuesta real medida en la estructura es posible comprobar que es imprescindible reunir en un mismo estudio toda la información histórica de que se disponga, cálculos, ensayos y respuesta estructural determinada de forma experimental.



En cuanto al análisis, parece claro que las incertidumbres son tan grandes que toda evaluación debe comenzar por las herramientas más sencillas y *comprensibles* para el ingeniero.

Ello sin perjuicio de que los datos recogidos por la monitorización permitan más adelante enriquecer de forma fiable los modelos de cálculo. Los estudios de sensibilidad son una pieza de uso constante en todo el proceso.

En el caso particular de este ejemplo se presenta una actuación en la que no ha sido necesario intervenir. Sin embargo, la decisión está fundada en un conocimiento, si no profundo, al menos sí bastante aproximado de la función y el comportamiento resistente de la estructura así como de su buen estado y aptitud frente a las sollicitaciones. El análisis ha permitido identificar los puntos críticos y su monitorización confirmar que no existen problemas estructurales.

La Silla de la Reina, a diferencia de lo que ocurrió en el pasado, goza de buena salud y ello es posible afirmarlo con una base fundada en argumentos más técnicos que la mera constatación del excelente aspecto que presenta hoy al visitante.



3.3. Evaluación y monitorización de las cubiertas del Hipódromo de la Zarzuela de Madrid

3.3.1. INTRODUCCIÓN

La construcción del hipódromo de la Zarzuela fue iniciada en Madrid en el año 1935, un año posterior a su salida a concurso en 1934, en sustitución del hasta entonces existente hipódromo del Paseo de la Castellana. Diseñado por el Ingeniero Eduardo Torroja y los arquitectos Arniches y Domínguez, no fue inaugurada hasta 1941 como consecuencia de la guerra civil española, siendo declaradas las gradas Patrimonio Nacional en 1980. En el hipódromo tuvieron lugar carreras de caballos de forma constante hasta 1996, año en el que la actividad cesó. En 2003 el Patrimonio Nacional Español creó un consorcio para la explotación del hipódromo de la Zarzuela, y en 2005, después de nueve años cerrados, volvió a abrirse, siendo sometido en 2008 a un proceso de restauración que a continuación se describe.

Antes del comienzo de la Guerra Civil la estructura de hormigón del Hipódromo estaba finalizada. Durante ésta la obra quedó enclavada en uno de los frentes de la batalla de Madrid, por lo que sufrió impactos de artillería que fueron reparados bajo la supervisión del propio Torroja a su finalización, inaugurándose en el año 1941. Desde su finalización en ese año, el Hipódromo ha sufrido una serie de reformas en diversos elementos, así como añadidos a la estructura original, no muy afortunados, que desentonan del conjunto original.

En la actualidad el Hipódromo de la Zarzuela es propiedad del Estado, y El Recinto de Carreras, el "Deposito de la copa", las llamadas "Cuadras de Torroja" y las pistas de carreras, están declaradas Bien de Interés Cultural, con categoría de Monumento.





Figura 3.3.1.a. Fotografía panorámica de las cubiertas

Las tres cubiertas de su estructura son consideradas un arte desde el punto de vista ingenieril debido a su perfecto y genial equilibrio físico y mecánico. Se plantearon en su concepción finas láminas de hormigón armado con forma de hiperboloide con espesor variable entre 65 cm en la zona de pilares y 6 cm en los bordes. Su sección ligeramente curva en forma de V, apoyada en voladizo de hasta 13 m de altura sobre un único pilar (Figura 3.3.1.b), es posible gracias al inteligente diseño de armados entrelazados y a la instalación de tirantes pasivos de acero situados en su parte trasera.

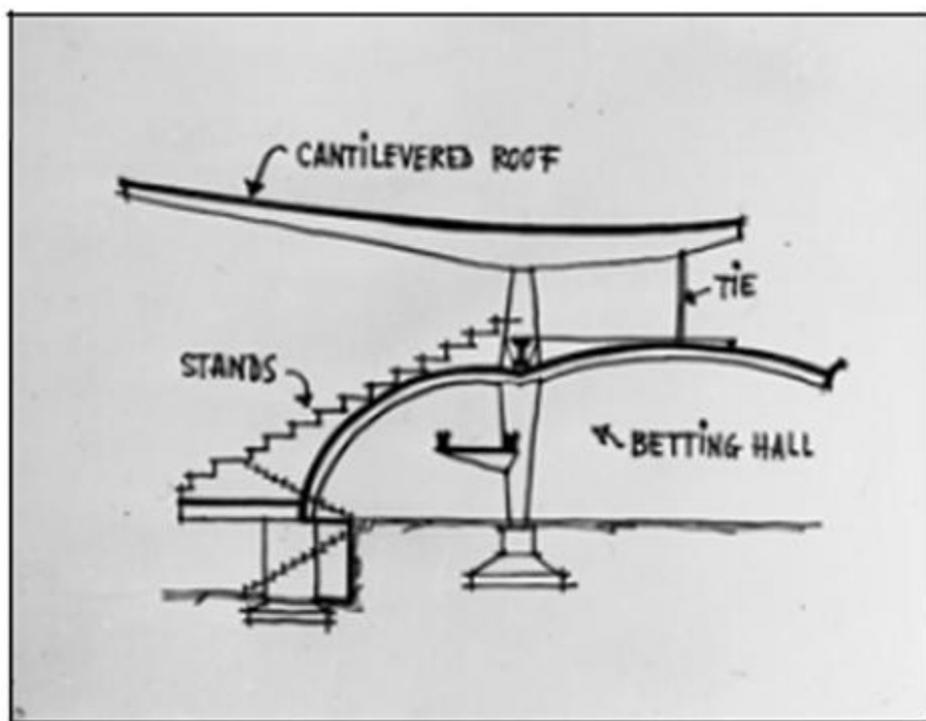


Figura 3.3.1.b. Esquema estructural

El hipódromo tiene tres tribunas sobre las cuales están dispuestas las cubiertas que se denominan de la siguiente forma:

- a) Tribuna Norte (C.N.)
- b) Tribuna Central (C.C.)
- c) Tribuna Sur (C.S.)



Desde el punto de vista de la durabilidad el comportamiento se puede considerar como muy bueno dado que los deterioros encontrados han sido muy locales y debido a la pérdida de la impermeabilización superior de la cubierta que permitió al agua de la lluvia permear a través de la sección de la cubierta. La consideración del grado de buen comportamiento durable se emite al comparar con otras estructuras de hormigón armado menos arriesgadas en su diseño y aparentemente más robustas que han tenido que ser muy reparadas o incluso demolidas con vidas inferiores. El hormigón utilizado, típico de la época y por ello bastante poroso al tener bajo contenido en cemento, estaba parcialmente carbonatado y por ello era necesario plantearse una reparación integral.

La explotación de la estructura como hipódromo ha sufrido diversos avatares por lo que estuvo cerrado al final del siglo XX durante alrededor de una década. Más recientemente se decidió por fin su reapertura y dada la importancia de la obra desde el punto de vista artístico, histórico y de seguridad, las autoridades correspondientes decidieron realizar una obra de restauración de las cubiertas y otras zonas. Aprovechando las inspecciones efectuadas con los proyectistas de la restauración para el dictamen del grado de corrosión de las cubiertas, se les planteó la instalación de un sistema de monitorización mediante sensores, capaces de indicar cualitativamente el riesgo de corrosión en la armadura embebida de la estructura. De este modo, es posible controlar el comportamiento del material frente a la interacción con la acción atmosférica y prever la posible necesidad de intervenciones de mantenimiento futuras, evitando el avance del deterioro con rapidez y garantías.

3.3.2. ESTUDIO DEL GRADO DE DETERIORO

Las cubiertas del Hipódromo de la Zarzuela son estructuras que durante toda su vida en servicio no se ha encontrado documentación que indique que hayan tenido unas actuaciones importantes de mantenimiento.

En su parte inferior presentaban zonas reparadas por parcheo y diversas capas de pintura aplicadas, desaparecidas en ciertas zonas bien visibles en fotos de principios del siglo XXI. Estos parches que presentaban, en algunos casos, desprendimientos y pérdidas de material procedían probablemente de reparaciones puntuales anteriores, siendo algunos de ellos tal vez motivados por la caída de proyectiles durante la guerra civil española (Figura 3.3.2-c y 3.3.2-d).



En la parte superior de las cubiertas se había colocado un sistema de impermeabilización formado por una imprimación asfáltica sobre la que se dispuso una lámina de aluminio gofrado cuyo estado en 2004 se puede apreciar en la Figura 3.3.2-a pero que en 2008 esta impermeabilización se encontró muy deteriorada como lo muestra la Figura 3.3.2-b. Esta lámina de aluminio (Figura 3.3.2-b) se presupone que fue instalada en los años sesenta, posteriormente a la construcción de las cubiertas. El paso del tiempo y la posible falta de mantenimiento han provocado que zonas de esta impermeabilización estuvieran deterioradas y que la imprimación estuviera meteorizada por el efecto de la radiación solar (Figura 3.3.2-a).

Además la mayoría de los sumideros de las cubiertas estaban obstruidos, provocando la acumulación de agua estancada, que con el deterioro de la impermeabilización inducía la penetración del agua a través del hormigón.

Todo ello origina que se iniciaran procesos de deterioro, entre los cuales se destaca como principal patología la corrosión de su armadura embebida dada la carbonatación del recubrimiento de hormigón.

La carbonatación del hormigón ha sido estudiada y cuantificada *in-situ* mediante la determinación del frente de carbonatación a través de ensayos colorimétricos. Dichos ensayos consisten en aplicar el indicador fenolftaleína en disolución alcohólica sobre catas abiertas y sobre fractura fresca de muestras en zonas de estudio de las diferentes cubiertas.

Las profundidades del frente de carbonatación de las diferentes muestras extraídas de la superficie inferior de las cubiertas reflejan como este ha llegado a la armadura. Conviene resaltar además que los recubrimientos de las armaduras son en general escasos. Por ello, en zonas con penetraciones superiores a 60mm, el frente llega a alcanzar la segunda capa de armado generando la corrosión generalizada de las armaduras, y llegando a generar pérdidas de sección locales importantes en algunas armaduras (Figura 3.3.3).

Por el contrario, en la superficie superior de las cubiertas no se aprecia frente de carbonatación ya que, aunque la imprimación de impermeabilización estaba deteriorada, en estas zonas hubo encharcamientos de agua durante mucho tiempo, y por ello gran parte de la superficie del hormigón ha estado casi saturada, lo que ralentiza el avance del agresivo por esa superficie. El problema surge cuando el



frente alcanza las armaduras por la parte de la superficie inferior de la cubierta, y se acelera la corrosión existente debido al alto grado de contenido de agua en el interior del hormigón.

Otra observación realizada que no ha provocado corrosión pero que resultado relevante es la fisuración generalizada que es visible y cuya causa es probablemente la retracción. En el proyecto de rehabilitación se decidió su reparación mediante el sellado con el fin de asegurar el comportamiento solidario de todo el material.

También es necesario nombrar los tirantes que soportan las cubiertas desde su parte posterior, en los que se tomaron muestras de la Cubierta Norte. Estos tirantes estaban compuestos por tres cordones de acero lisos recubiertos por mortero y todo ello a su vez recubierto por una envoltura de fibrocemento que realizaba la función de impermeabilización y de encofrado perdido (Figura 3.3.4).

De los tirantes se tomaron muestras de mortero para comprobar el posible frente de carbonatación que resultó inexistente posiblemente por la protección que ha supuesto el recubrimiento de fibrocemento.

La ausencia de carbonatación justifica el casi perfecto estado en el que se encontraron los cordones de acero.



Figura 3.3.2. Estado de las cubiertas en la parte superior e inferior.



Figura 3.3.3. Medida del frente de carbonatación.

3.3.3. EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN

Después de limpiar la pintura de la superficie inferior de las cubiertas y la capa de impermeabilización de la superficie superior con agua a



presión, se realizó una evaluación del grado de corrosión existente mediante inspección visual y aplicando métodos electroquímicos no destructivos basados en la técnica de la Resistencia a la Polarización para verificar la velocidad de corrosión (Figura 3.3.5).

La velocidad de corrosión (evaluada por el método de confinamiento modulado de la corriente con el corrosímetro portátil Gecor 08) se cuantificó en diferentes áreas de las tres cubiertas (Figura 3.3.6). Como se puede ver en la Figura 3.3.7, la mayoría de los valores de I_{corr} registrados en la Cubierta Norte se encuentran en el rango entre 0,5 y 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo que supone velocidades de corrosión moderadas (10).

Otros indicadores de corrosión, como el potencial de corrosión (E_{corr}) y la resistividad eléctrica (r), también fueron evaluados (Figura 3.3.8 y Figura 3.3.9). E_{corr} se midió con un electrodo de referencia Cu/CuSO_4 . La mayoría de los valores medidos estuvieron en el rango entre -250 y -350 mV, lo que significa un riesgo de corrosión intermedio. Con respecto a la resistividad, los valores son muy elevados (superiores a 200 $\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$).

Estos altos valores no se corresponden con la porosidad del hormigón, pero podrían ser debidos a la carbonatación del recubrimiento que no siempre permite un buen contacto electrolítico entre el sensor y el hormigón.

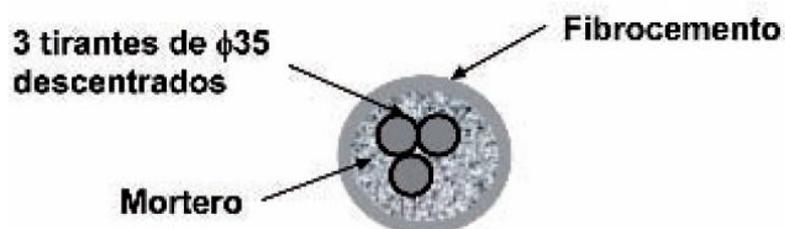




Figura 3.3.4. Detalle del tirante.



Figura 3.3.5. Campaña de medidas realizada en las cubiertas.



① **Zone identification**

The three decks had similar behaviour

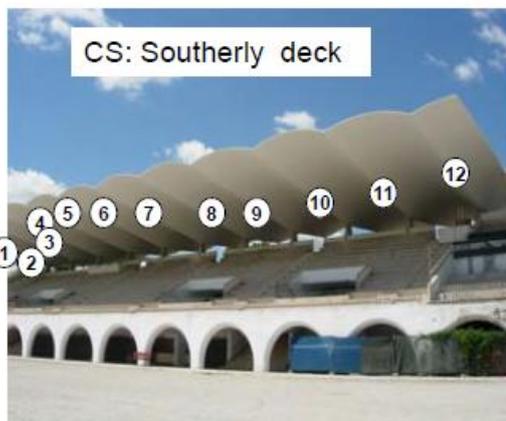


Figura 3.3.6. Zonas de estudio repartidas según las diferentes cubiertas.

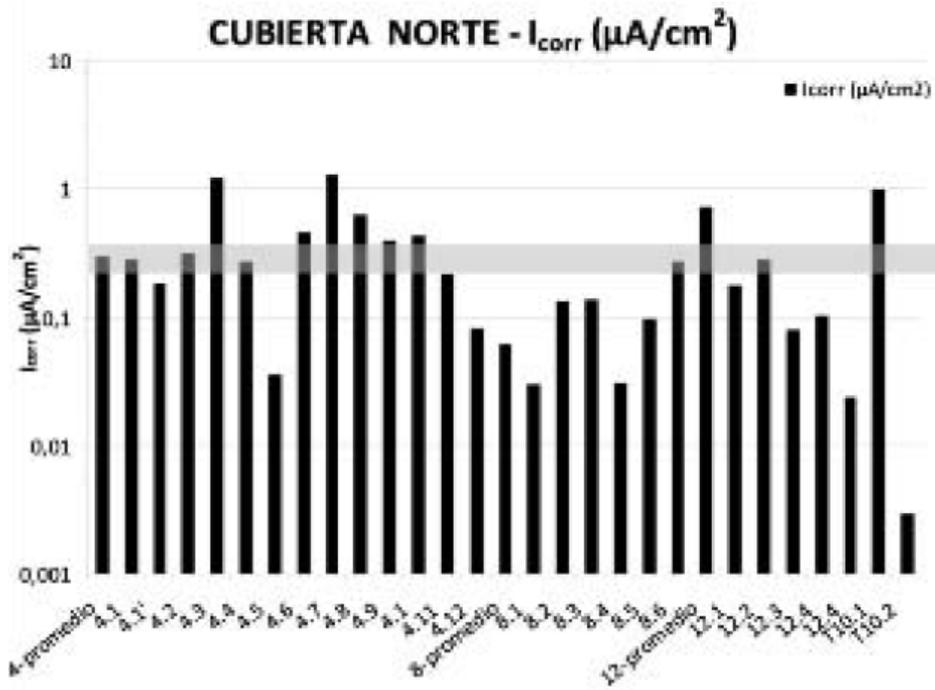


Figura 3.3.7. Medida de la velocidad de corrosión.

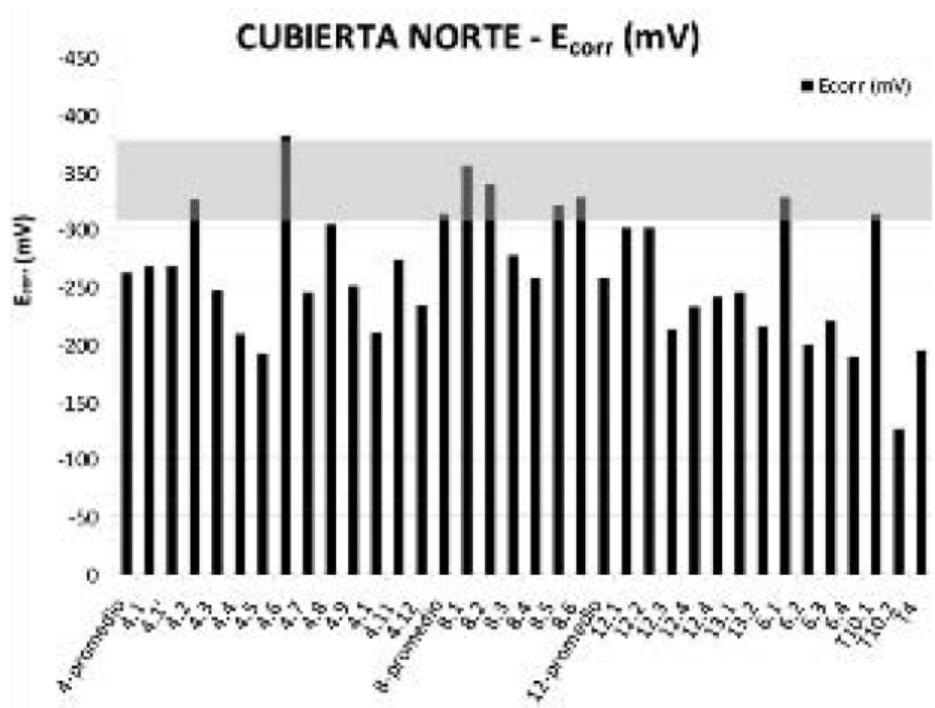


Figura 3.3.8. Resultados obtenidos de E_{corr} en la cubierta norte.

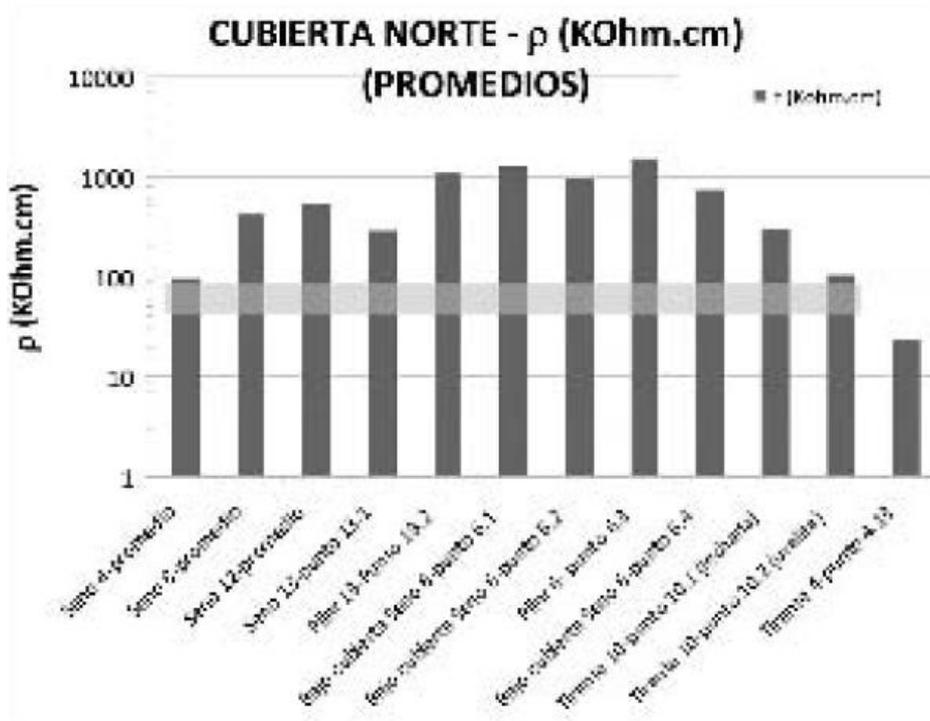


Figura 3.3.9. Resultados de resistividad en la cubierta norte.

La corrosión detectada es generalizada (Figura 3.3.10) con pérdida de sección desde despreciable a alrededor de un 10%. Por lo que el grado de corrosión o corrosión acumulada es variable. Esta corrosión es mucho mayor en las zonas que habían perdido la impermeabilización superior donde la pérdida de sección se considero elevada (hasta el 40%) si bien estos casos son puntuales y no afectan al comportamiento global de las cubiertas. A pesar de la corrosión detectada no se apreciaban fisuras longitudinales con la armadura, el saltado del recubrimiento muy local indicaba que el proceso es también sólo puntual.

De las figuras se puede deducir que al menos un 50% de los puntos medidos presentan corrosión activa en el momento de la inspección. Los puntos de medida se han elegido al dividir las diferentes cubiertas en distintos lotes diferenciando la superficie exterior e interior de las cubiertas (y a su vez las zonas de los valles y senos de cada una de ellas), y los tirantes. Aunque se eligieron puntos que mostraban un cierto deterioro, la corrosión detectada indica que la corrosión esta activa y es necesario acometer alguna actuación para que el proceso no continúe.



Figura 3.3.10. Presencia de una corrosión generalizada.

3.3.4. INTERVENCIÓN

En el año 2004 tuvo lugar el concurso internacional convocado para restaurar y rehabilitar el recinto de carreras, de tal modo que las obras comenzaron en 2008, siguiendo su curso. En referencia a las láminas de las cubiertas se realizaron las siguientes intervenciones (Figura 3.3.11):

1. Eliminación de toda la pintura inferior y la impermeabilización superior mediante chorro de agua.
2. Saneado de las zonas de desprendimiento de material y huecas, limpiando las armaduras vistas, cepillándolas y pasivándolas; para después reparar la zona con un mortero específico.
3. Tratamiento de fisuras mediante su saneo abriéndolas, introduciendo cánulas por las cuales se inyecta resina después de sellarlas con masilla y tapándolas finalmente con mortero de reparación. Este tratamiento se realizó tanto en la superficie superior como en la inferior de las cubiertas.
4. Acabado en la parte inferior con mortero imitando la terminación original con las tablillas de encofrado de madera y posterior pintura anticarbonatación.
5. Impermeabilización de la parte superior con lámina de poliuretano de 3-4 mm de espesor, sobre mortero de puente de unión de baja retracción.
6. Rehabilitación de los tirantes de las cubiertas. Se retiró el recubrimiento exterior de fibrocemento y el mortero que rodeaba los tirantes metálicos y se saneó hasta llegar a limpiar completamente los mismos (Figura 3.3.12).



Una vez ejecutados los pasos anteriormente descritos, se pintaron con una imprimación impermeable para posteriormente inyectar una lechada de terminación, estableciendo dos capas para garantizar la impermeabilización.

De este modo, es posible a día de hoy concluir que las labores de reparación se realizaron de manera satisfactoria, pese a no ser objeto su descripción en más detalle.



Figura 3.3.11. Intervenciones realizadas en el tratamiento de las cubiertas.



Figura 3.3.12. Tratamiento llevado a cabo en los tirantes.



3.3.5. MONITORIZACION DE LA ESTRUCTURA

Como se ha mencionado se aprovechó la rehabilitación para colocar sensores que informen sobre la posible aparición de deterioros sin necesidad de extracción de muestras.

3.3.5.1. Ubicación de los grupos de sensores

Después de la evaluación del estado de corrosión de la estructura se instalaron sensores de corrosión permanentes capaces de indicar el riesgo en las cubiertas y en los tirantes. Se instalaron siete grupos de sensores en las tres cubiertas (Figura 3.3.13).

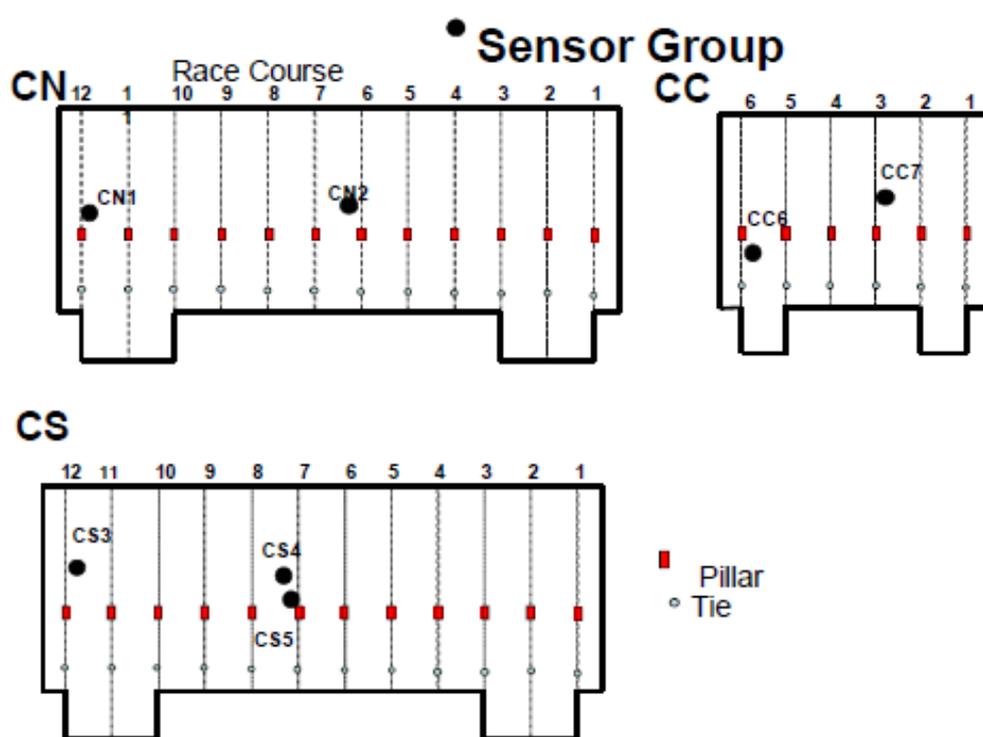


Figura 3.3.13. Instalación de los diferentes grupos de sensores en las cubiertas.

3.3.5.2. Descripción de los grupos de sensores

Cada grupo está compuesto por tres tipos de sensores (Figura 3.3.14):

- Sensor de detección de presencia de agua líquida (Doble barrita);
- Sensor de medida del potencial de corrosión (Ecorr) de la armadura embebida, con electrodo de referencia tipo Mn/MnO;



- Sensor de medida de la temperatura (Termopar tipo TMC6-HD).

Los tres tipos de sensores instalados son sensores pasivos, lo que significa que no es necesario aplicar ningún estímulo o aporte energético para obtener las correspondientes respuestas.

Por ello solo es necesaria la instalación de un datalogger (se utiliza un HOBO U12-006) para el registro continuo de los valores.

El sensor de agua líquida es cualitativo ya que informa sobre la presencia/ausencia de agua en estado líquido (condensación) pues desarrolla una diferencia de potencial entre los dos terminales del sensor. Cuando no hay agua en estado líquido, la diferencia de potencial medida entre los dos terminales del sensor es próxima a 0 mV, pero cuando existe agua aumenta los valores de diferencias de potencial hasta unos 700 mV.

Por otro lado, el sensor de medida de potencial de corrosión lo constituye un electrodo de referencia de Mn/MnO, que se conecta a la armadura para evaluar su potencial electroquímico. Este parámetro nos indica la probabilidad de que la armadura sufra corrosión.

En cuanto a la temperatura, los termopares utilizados son TMC6-HD, de rango -40 a 50 °C) y con resolución de $0,25$ °C a 20 °C.

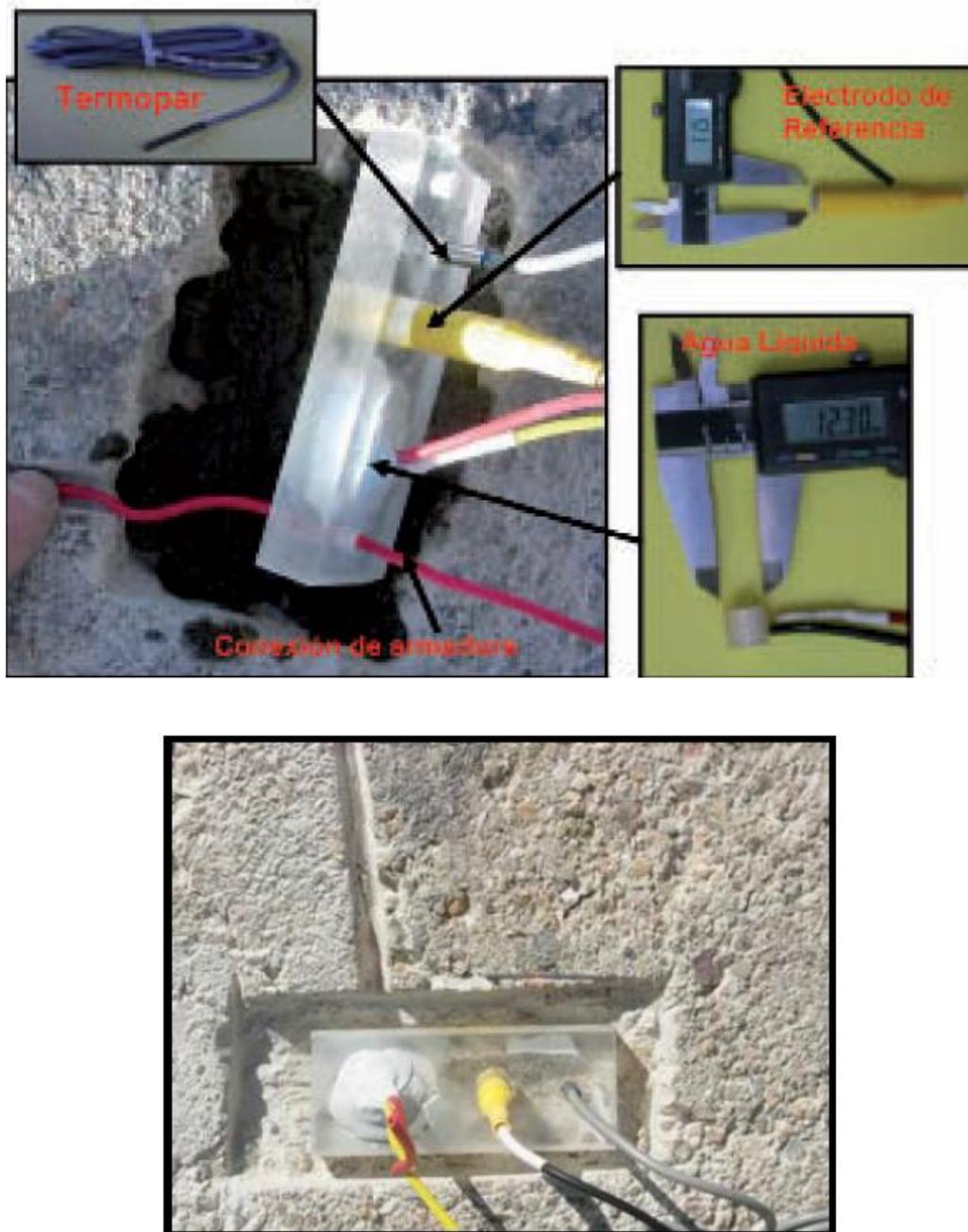


Figura 3.3.14. Grupos de sensores instalados.

3.3.5.3. Instalación de los grupos de sensores en las cubiertas

El procedimiento de instalación de cada uno de los grupos se lleva a cabo en 3 fases: preparación previa de la zona de instalación, la fijación del grupo de sensores y posterior instalación de la caja-estanca de polietileno para el emplazamiento del datalogger.



Preparación previa de la zona para la colocación del grupo de sensores es necesario realizar una pequeña cata en la superficie del hormigón que permita embeber la placa de fijación y distribución de los sensores, para poder conseguir que la capa de impermeabilización que se coloque después sea lo más lisa y continua posible (Figura 3.3.15).



Figura 3.3.15. Catas para cada uno de los sensores.

Aparte de la cata en la que se aloja el grupo de sensores, es necesario realizar una roza para poder embeber y llevar el cable para la conexión con la armadura. La conexión con la armadura se asegura con una fijación de soldadura fría para garantizar la continuidad eléctrica.

a) Fijación del grupo de sensores.

Una vez realizada la cata donde alojar el grupo de sensores, se prepara un mortero de baja resistividad. Primero se aplica una fina capa de base donde se introducen los diferentes sensores y después se termina rellenando con este mortero toda la cata hasta dejar totalmente embebido el dispositivo (Figura 3.3.16).

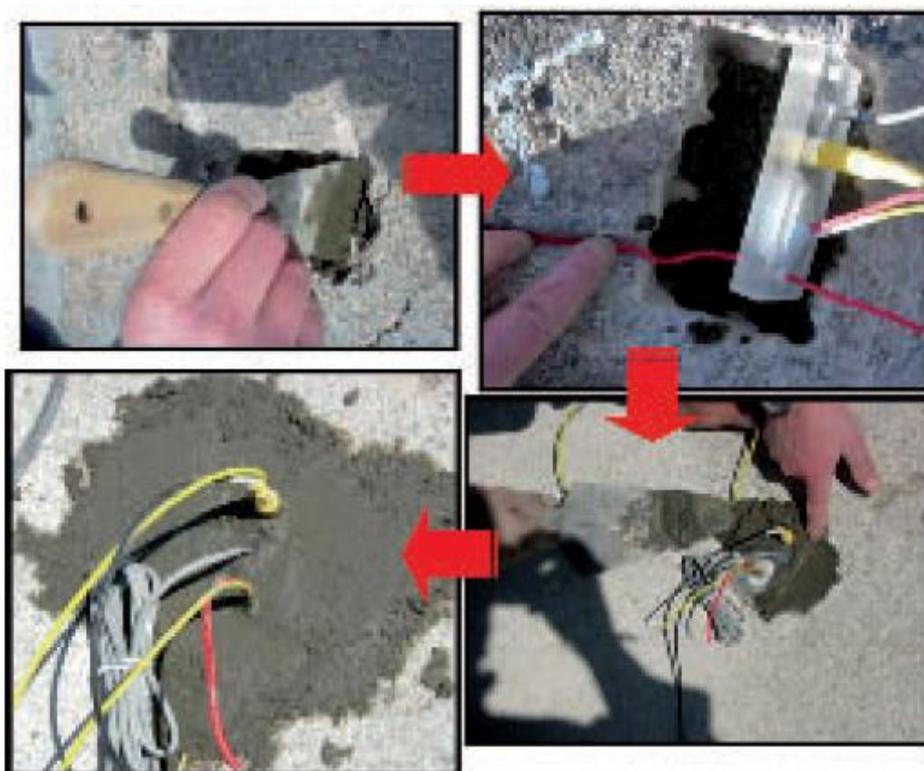


Figura 3.3.16. Instalación de los grupos de sensores.

b) Instalación de caja de polietileno e impermeabilización.

Una vez instalados los diferentes grupos de sensores en cada una de las cubiertas, se protegieron las terminaciones eléctricas y se aplicó la capa de impermeabilización con lámina de poliuretano de 3-4 mm de espesor a toda la cubierta, poniendo especial cuidado en la aplicación en estos lugares. El aspecto de las zonas después de la aplicación de la impermeabilización se puede ver en la Figura 3.3.17. Después de la aplicación de la capa de impermeabilización se acopló encima de la zona de las terminaciones eléctricas una caja estanca de polietileno donde queda instalado el datalogger.

Como ya se ha mencionado, se instalaron en las tres cubiertas un total de 7 grupos de sensores permanentes, de los cuales 6 se instalaron en la superficie superior de las cubiertas Norte, Sur y Central y uno en la parte inferior de la Cubierta Sur. En esta Cubierta Sur se pudieron colocar en la misma zona un grupo por la superficie superior y otro por la parte inferior.



En la Figura 3.3.18 se representa la localización de los diferentes grupos en la Cubierta Sur.



Figura 3.3.17. Zona de sensores. Aplicación de impermeabilización.



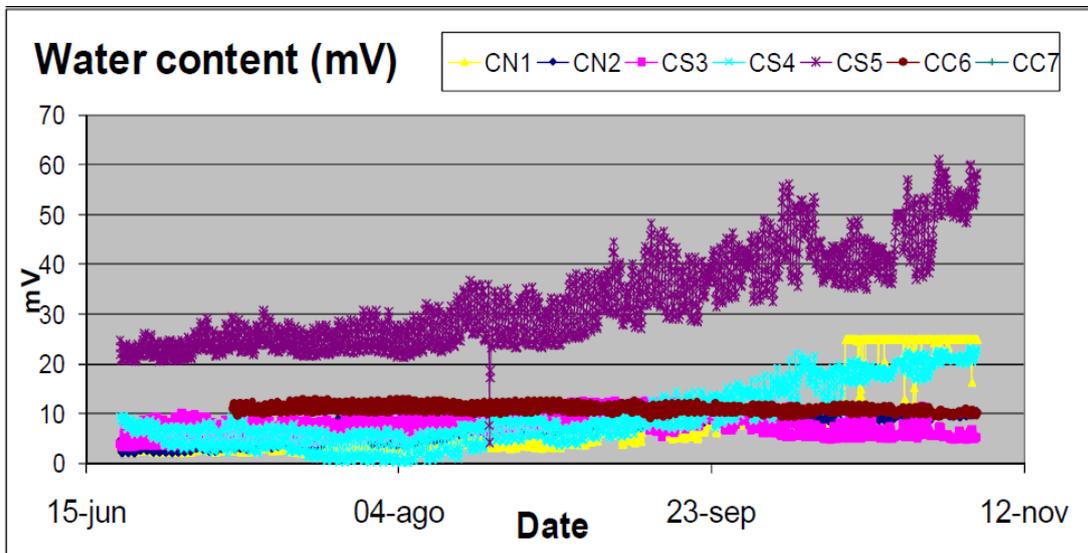
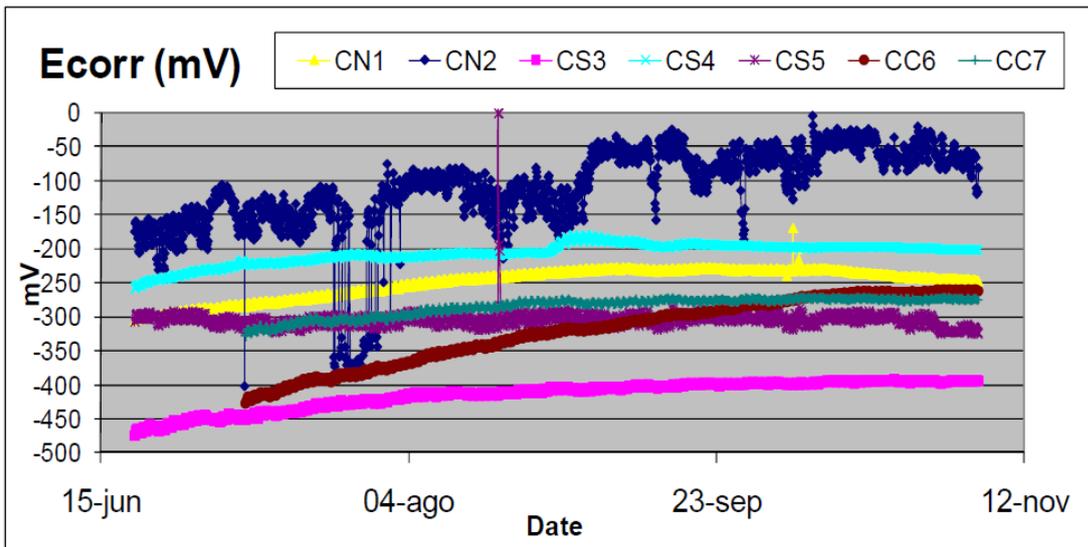
Figura 3.3.18. Grupos de sensores en la cubierta sur.

3.3.5.4. Resultados de los sensores permanentes

En la Figura 3.3.19 se presentan los valores de potencial de corrosión y de presencia de agua líquida de todos los grupos instalados en las cubiertas.



Se observa como la evolución del potencial de corrosión (E_{corr}) en prácticamente todos los sensores es hacia valores de potencial más positivos, lo que indica la tendencia a pasivarse de las armaduras tras la reparación. En todos los sensores de agua líquida los valores de diferencia de potencial registrados se sitúan en torno a 20 mV, lo que indica la no presencia de agua líquida en el interior del hormigón.



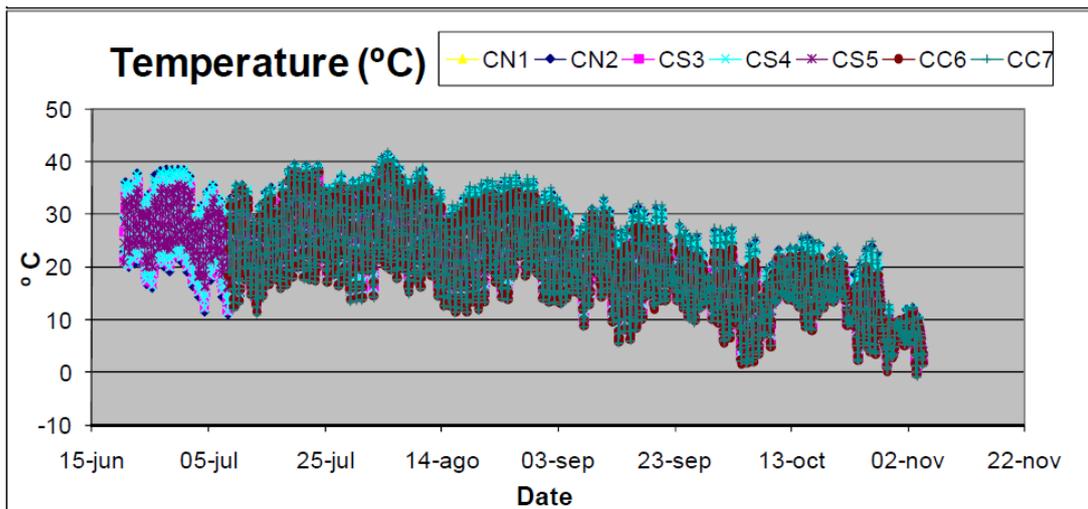


Figura 3.3.19. Medidas de los sensores instalados.

3.3.6. CONCLUSIONES

Las cubiertas del Hipódromo, que siguen asombrando por su ligereza y esbeltez, han resistido el paso del tiempo y la acción de los agentes atmosféricos de una forma sobresaliente, al presentar solo deterioros por corrosión de las armaduras muy locales por fallos en el sistema de impermeabilización que se debió aplicar en los años 60.

Del trabajo desarrollado para su rehabilitación integral se pueden expresar de manera resumida y esquemática las siguientes conclusiones más relevantes relativas a los trabajos para el estudio de su durabilidad y control permanente de los parámetros de corrosión:

- Antes de la intervención la estructura presentaba un grado de carbonatación alto en la parte inferior de todas las cubiertas. Pese a no haber grandes pérdidas de sección de manera general, toda la armadura inferior presentaba corrosión generalizada, cuantificada mediante técnicas electroquímicas no destructivas.
- La corrosión que se detectó sólo en las zonas donde se había deteriorado la impermeabilización, es mayor en la superficie superior de la cubierta por el acceso del agua de lluvia en las zonas donde la lamina asfáltica estaba deteriorada. Esta impermeabilización ha resultado esencial, ya que solo satura el hormigón a grados que induce la corrosión activa la acción directa del agua de la lluvia. Las zonas inferiores de las



cubiertas, aunque carbonatadas, no han llegado a un grado de corrosión significativo.

- En cuanto a las tres barras asimétricas que componen cada uno de los tirantes, esenciales en el comportamiento estructural, pese al peculiar mecanismo de impermeabilización que se encontró compuesto por una camisa tubular de fibrocemento, su estado tras 75 años de exposición al ambiente era muy aceptable, presentando escasa carbonatación en su recubrimiento de mortero y ausencia de corrosión.
- Después de la intervención los resultados después de un año procedente de los sensores permanentes embebidos, muestran que la reparación de las cubiertas se ha ejecutado de forma satisfactoria, ya que los potenciales de la armadura presentan valores de ausencia de riesgo de corrosión al igual que los sensores de agua indican la ausencia de condensación.
- Es importante resaltar la importancia de cuantificar las velocidades de corrosión para la predicción de la evolución futura del deterioro, así como la ayuda que suponen los sensores instalados de forma permanente para el control no destructivo de la eficacia de la reparación.



3.4. Caracterización dinámica en relación con los campanarios de las estructuras religiosas: métodos, propósitos y desarrollos en el campanario de la Iglesia del Carmine

3.4.1. LA DINÁMICA DE LA TORRE DEL CAMPANARIO DE LA IGLESIA DEL CARMINE

La importancia histórica y arquitectónica de la torre del campanario de la Iglesia del Carmine he llevado consigo la ejecución de una prueba no invasiva, pero eficaz al mismo tiempo, mediante la utilización de actuadores ambientales así como el empleo de instrumentos de alta sensibilidad con técnicas avanzadas de análisis modal operacional.

Los resultados del trabajo experimental han permitido calibrar el modelo FE desarrollado por la Universidad de Nápoles, por medio de la utilización de índices de correlación apropiados y algunos más proporcionadas para el desarrollo y consolidación de la metodología propuesta. Además, en vista de una vigilancia de la salud estructural, ha sido pionero en un programa de control dinámico durante 24 horas al día, la obtención de información sobre la variabilidad de los parámetros dinámicos como una función de los parámetros ambientales tales como la cantidad de tráfico, la temperatura y el funcionamiento de las campanas.

La campana o más generalmente los monumentos históricos artísticos representan un área importante de aplicación de los estudios dinámicos, puesto que la geometría de su estructura y el tipo de estrés al que están sometidos los hace particularmente sensibles a problemas de naturaleza dinámica. En ellas es importante tener en cuenta su considerable edad y muy a menudo sufren de problemas de degradación que hacen necesaria la toma de acciones para la recuperación.

3.4.2. TIPOLOGÍA DE PRUEBA ADOPTADA

En el caso en cuestión, ya que se trata de un edificio de interés histórico situado en un complejo monástico, hay una tendencia hacia un tipo de prueba completamente no invasiva. Por lo tanto, se decidió utilizar como actuadores las tensiones de carácter impulsivas y ambientales inducidas por el viento y por el tráfico de vehículos sustancial en este ámbito, así como las tensiones inducidas por el sonido de las campanas.



Para llegar a una correcta identificación de los parámetros dinámicos han sido seguidos los siguientes pasos:

- Desarrollo de un modelo preliminar de elementos finitos, que es útil tanto para evaluar las características modales en una primera aproximación, como para hacer un diseño apropiado de la evidencia experimental que define la gama de frecuencias de interés, el estrés y el número de sensores.
- Ejecución de una prueba dinámica en el campo mediante la medición de la aceleración o la velocidad en ciertos puntos.
- Preparación y determinación de parámetros modales (frecuencias naturales, formas modales y amortiguación).
- Calibración del modelo numérico utilizando los índices de correlación correspondientes.

3.4.3. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

Los aparatos utilizados para la realización de la prueba consisten en sensores de aceleración-servo balanceada uniaxial (Episensor ES-U2-Kinematics) y una unidad de adquisición de datos NI PXI. El acelerómetro tiene una gama dinámica de 145 dB y se caracteriza por un bajo nivel de ruido de fondo. El rango de frecuencia de operación es de DC a 200 Hz. Módulo PXI-4472 de National Instruments es el diseñado específicamente para la adquisición dinámica con alta resolución en frecuencia. Hay 16 canales que se muestran simultáneamente.

El disparador se presenta tanto en el modo de predisparo (adquisición antes y después de una cierta condición de umbral) como el postrigger (después de una cierta condición de umbral). El proceso de adquisición incluye un tratamiento preliminar de los datos y se gestiona con sw desarrollado en LabView. Como actuador se ha empleado un martillo instrumentado de PCB Piezotronics.

3.4.4. EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos del ensayo fueron dirigidos principalmente a la identificación de las frecuencias fundamentales de vibración y de las formas de los modos asociados, con el fin de proporcionar una guía para la calibración adecuada del modelo numérico de elementos finitos



desarrollado para el diseño de una restauración. Además, al haber comprobado la opción de dejar el equipo en la adquisición de todo un día, ella presentó la oportunidad de comprobar que no existen cambios en el comportamiento de la estructura en función de parámetros ambientales y, en particular, ante el sonido de las campanas.

La obra, desde el punto de vista de la arquitectura, es de mampostería. Es posible, sin embargo, reconocer dos tipos de construcción, la que se extiende primero hasta el cuarto nivel y ve el uso de una toba; la segunda desde el cuarto nivel en la parte superior, hecho de mampostería de ladrillo. El campanario terminado en el siglo XVII ha sido sometido en varias ocasiones a los trabajos de restauración, en el último de los cuales fueron reemplazados por completo los suelos de madera con pisos de hormigón armado.

El procedimiento tuvo lugar entre el 16 y 20 de marzo de 2006, en diferentes etapas, instrumentando primeros dos cubiertas con ocho sensores por piso y luego todo el eje vertical, con uno o más pares de acelerómetros para cada nivel. Los sensores fueron colocados en las cubiertas cerca de las esquinas por medio de placas especiales sujetas con Fischer.

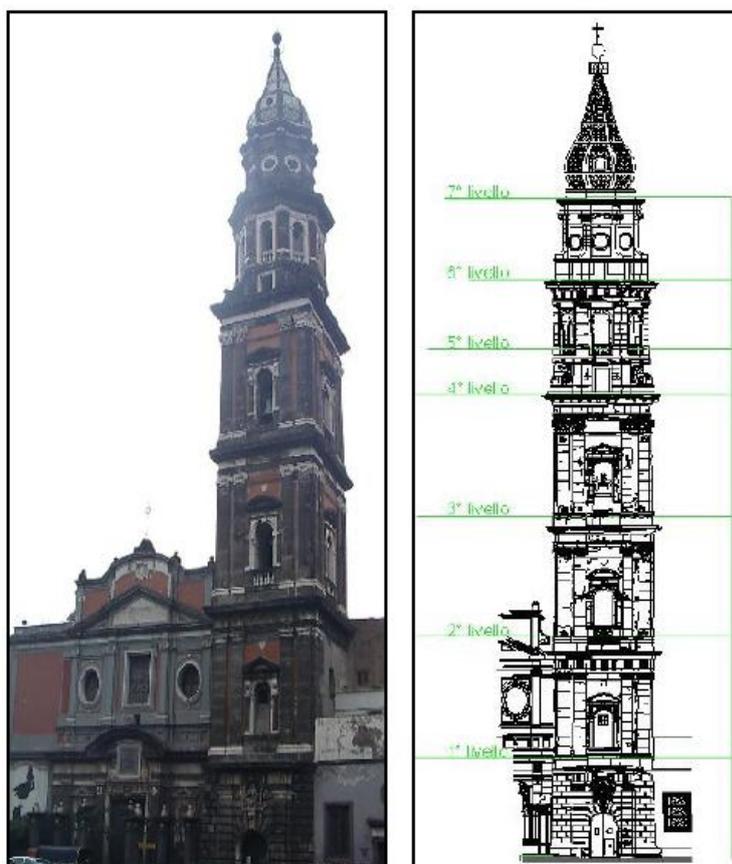


Figura 3.4.1. Campanario de la iglesia de Santa María del Carmine, con el plano de colocación de los sensores en diferentes niveles de la estructura.

3.4.5. MODO DE PROCESAMIENTO

El procesamiento consta de una primera fase de estudio del análisis temporal y de la frecuencia teniendo en cuenta las funciones de los espectros cruz auto, coherencia, PSD (densidad espectral de potencia) que nos permiten obtener información sobre los parámetros modales. El segundo paso consiste en la extracción de los parámetros modales utilizando un análisis modal por medio de LMS, un operativo software comercial. Las frecuencias naturales están muy cerca, pero la identificación no parece problemática para las formas de flexión.

Más compleja es la detección de torsión, en la que se es capaz de extraer información con claridad sólo cuando se tiene en cuenta todos los sensores dispuestos en ambas direcciones de medición. A partir de los valores es evidente que las excitaciones naturales son suficientes para la



detección de formas y que las formas de los modos de flexión no están acopladas.

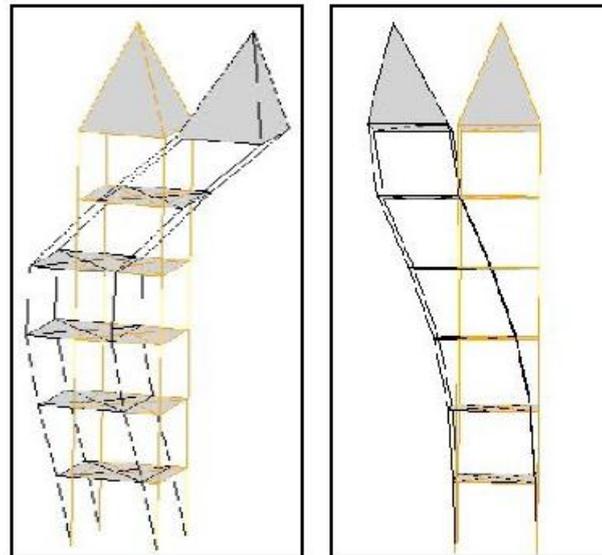


Figura 3.4.2. Identificación de los modos de vibración de excitaciones naturales.

3.4.6. VARIACIÓN DE PARÁMETROS DURANTE UN DÍA

Se propone una evaluación de los valores de la aceleración RMS dependiendo de la hora de registro para ver cómo los diferentes niveles de estrés ambiental, causados principalmente por el tráfico de vehículos, afectan el nivel de tensiones inducidas en la estructura. A partir de los resultados obtenidos para cualquier momento de la adquisición desde de las 18:00 del 17/03/2006 hasta las 02:00 del 19/03/2006 se propone un histograma de los niveles de RMS para la cubierta final.

Esta tendencia es fácilmente relacionable con el tamaño de tráfico a lo largo del día: muestra un patrón de niveles de aceleración, tanto a lo largo de x como a lo largo de y, la más alta durante el día que tiende a aumentar en particular entre las horas de 09:00 a 12:00, y de 17:00 a 20:00.

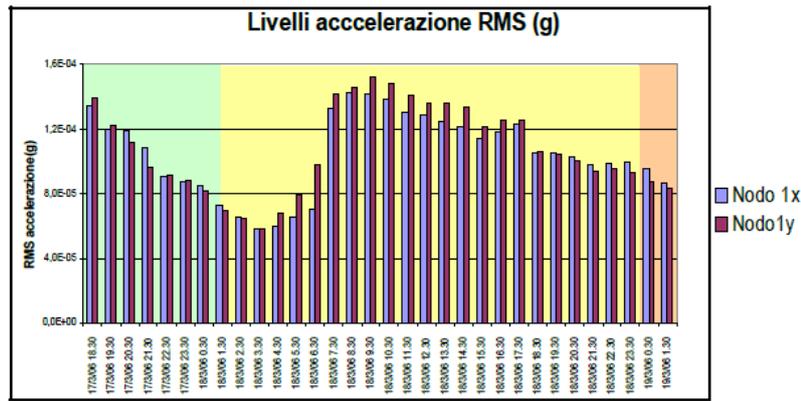


Figura 3.4.3. Niveles de aceleración en relación con el tráfico de vehículos.

En última instancia, parece que los cambios en los niveles de RMS se correlacionan bien con los de tráfico de vehículos. En la Figura 3.4.4 se muestran, sin embargo, los valores de las frecuencias para las dos primeras formas de los modos obtenidos con una resolución de 0.002 Hz. En el gráfico, con relación al primer modo de vibración, hay una tendencia creciente en la frecuencia a partir de las 8:00 hasta las 14:00 que se mantiene regularmente por unas horas y luego comienza a disminuir.

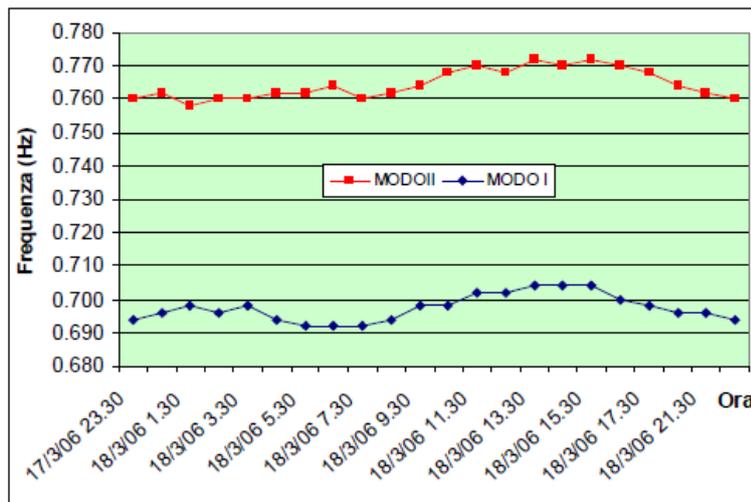


Figura 3.4.4. Valores de las frecuencias para los dos primeros dos formas modales.



3.4.7. EFECTOS DE LAS CAMPANAS

Las grabaciones fueron adquiridas con las campanas de nivel III en la operación, con el fin de poner de relieve los efectos de las campanas en los niveles de vibración. Para ello, se evaluaron los valores eficaces de desplazamiento, obtenidos por doble integración, antes, durante y después del sonido de las campanas. Desde el primer histograma parece claro que, incluso en términos de desplazamiento, el efecto de las campanas se hace sentir especialmente en nudos 04:03 (teniendo en cuenta que las campanas están en el tercer nivel), principalmente en la dirección x.

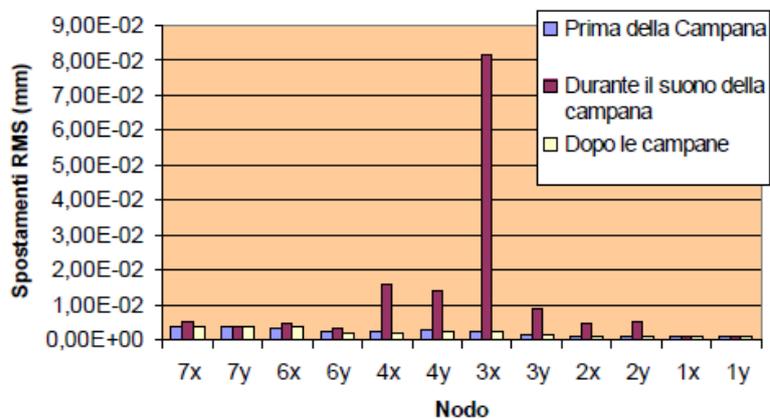


Figura 3.4.5. Los valores de desplazamiento antes, durante y después del sonido de las campanas.

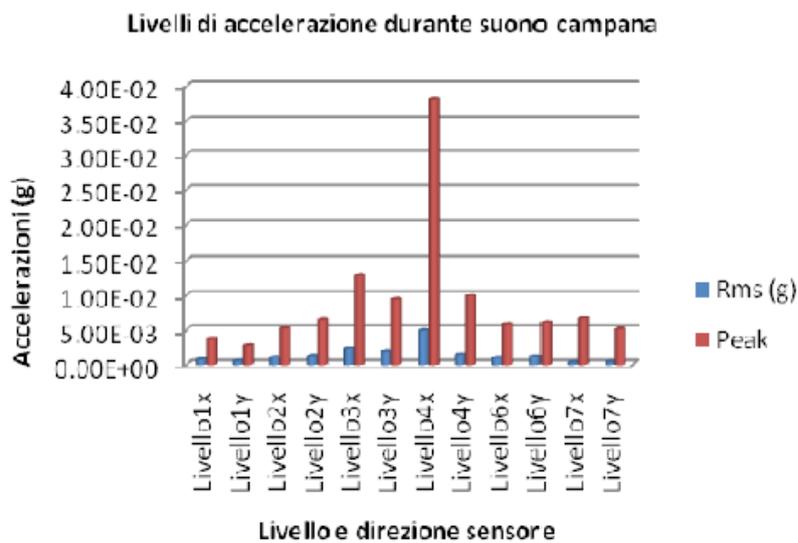


Figura 3.4.6. Niveles de aceleración durante el sonido de las campanas.



Además de los estudios sobre los niveles de vibración, parecía interesante realizar un estudio de los espectros de frecuencias durante el funcionamiento de las campanas, esencialmente con el fin de verificar si las frecuencias naturales de la estructura estaban cerca o menos a las de las campanas y más generalmente si fuera posible distinguir fenómenos vinculados a un oscilaciones de frecuencia bien definidos inducidos por las campanas.

3.4.8. EVOLUCIÓN TEMPORAL

En las Figuras 3.4.7 y 3.4.8 se dan acelerogramas registrados con frecuencia de muestreo de 500 Hz, la comparación de las gráficas de los registros relacionados con los pares de sensores dispuestos para el nodo 4, ubicado en el nivel III, de las campanas, y el nodo 2 del nivel VI. El estrés relacionado con las campanas es muy evidente en los gráficos.

Se observa que en el nodo 3 los niveles de aceleración son muy similares a aquellos en el nodo 4. En ausencia de las campanas, se observa que mediante la comparación de tanto el valor de cresta que lo de RMS, las aceleraciones aumentan con el subir de nivel. Cuando entran en la función de las campanas en su lugar los niveles 2, 3 y 4 son los más estresados

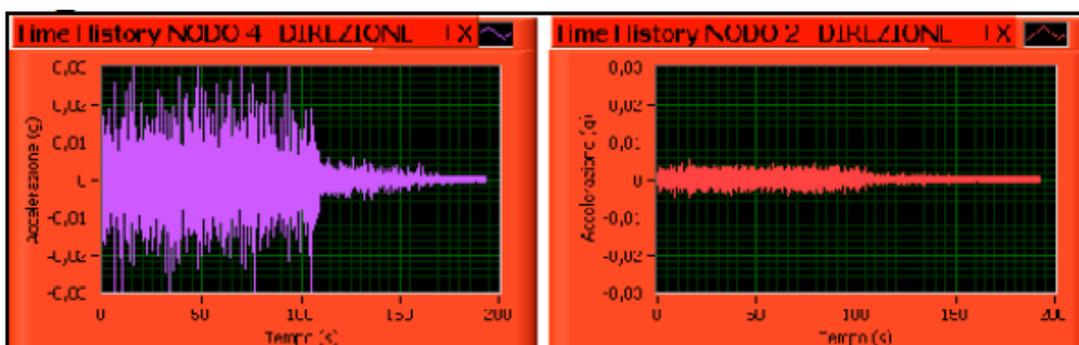


Figura 3.4.7. Acelerograma 500 Hz de frecuencia para el nodo 2 y el nodo 4.

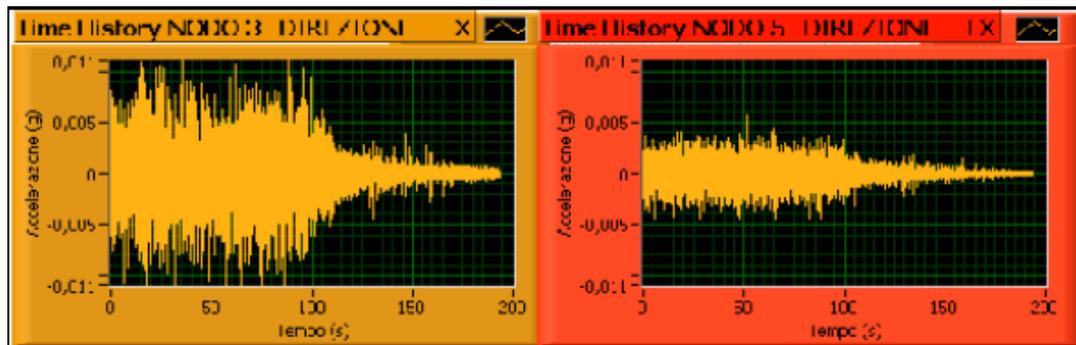


Figura 3.4.8. Acelerograma 500 Hz de frecuencia para el nodo 5 y el nodo 3.

3.4.9. ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA

Es interesante evaluar en detalle los posibles efectos en la frecuencia determinada por las campanas en las frecuencias bajas y luego en la banda donde se encontraron los primeros modos de vibración. Cabe señalar que, de hecho, no se muestran picos relacionados con la presencia de sus formas. En este caso por un análisis con un espectro de cruz es detectado por los sensores x un pico en 1.4 y otro a 2.3 Hz, mientras que para los sensores y picos a en 0.9, 1.3, 2.3 Hz.

Mientras que el pico a 2,3 se asocia con la segunda forma de los modos de flexión, los otros tres constituyen picos distintos de los definidos en el análisis modal, pero son a frecuencias distantes que los de los tres primeros modos de vibración.



3.5. Caracterización Dinámica de la torre del campanario perteneciente al monasterio de Santa Clara de los baluartes situados en la ciudad de Castello

3.5.1. PLANTEAMIENTO DE LA INTERVENCIÓN REALIZADA

Una importante contribución al estudio del movimiento de las campanas fue proporcionada por la caracterización dinámica de la torre del campanario perteneciente al monasterio de Santa Clara de los baluartes situados en la ciudad de Castello.

Las pruebas se llevaron a cabo a raíz de la detección óptica de la presencia de un patrón de grietas preocupantes ubicadas principalmente en la parte media de las tres columnas que sostienen los arcos superiores y las vigas de soporte del sistema - campanas de la torre en estudio.

Las pruebas dinámicas se llevaron a cabo con el propósito de:

- Detectar los fenómenos de resonancia en la estructura durante el movimiento de las campanas, que el caso sería muy oneroso y peligroso, sobre todo para las peculiares características de la obra que no lo hacen adecuado para los movimientos cíclicos del tipo dinámico.
- Obtener los parámetros dinámicos de la obra, tales como las frecuencias fundamentales, formas modales y amortiguación.
- Aplicar y calibrar un modelo de elementos finitos de la estructura, con el propósito de tener un soporte útil y necesario para cualquier análisis preliminar, diseño y / o verificación, en función del tipo de intervención a realizar.

La prueba se realizó con actuadores como el estrés ambiental (viento), el estrés impulsivo (martillo instrumentado) y el estrés forzado (sonido de las campanas), mientras que el instrumental utilizado fue el mismo que el utilizado durante las pruebas de caracterización dinámica de la torre del campanario de la iglesia de Carmine en Nápoles.



Figura 3.5.1. Campanario de Santa Clara de los baluartes en la ciudad de Castello.

La prueba con las campanas es extremadamente importante no tanto para la extracción de los parámetros dinámicos de la estructura, sino para la evaluación de las aceleraciones inducidas a la estructura y especialmente para las evaluaciones de los posibles efectos de resonancia. En la Figura 3.5.2 se da una señal adquirida y su FFT.

3.5.2. PRUEBA CON LAS CAMPANAS

Lo que se nota es una reducción en las frecuencias máximas de 4,2 Hz alrededor de la torre del campanario, hasta 1,8 Hz sobre la zona de interacción campanas - campanario. Este fenómeno se debe en parte al hecho de que la excitación tiene lugar en un valor cercano a la de resonancia de la estructura, y en parte a los fenómenos de no linealidad como se muestra por las lesiones presentes en la torre. También hay que señalar que en este caso el sonido de las campanas hace que sea identificable sólo un pico en la frecuencia al contrario de lo sucedido en el campanario de la iglesia del Carmine, debido a la diferente masa de las dos estructuras.

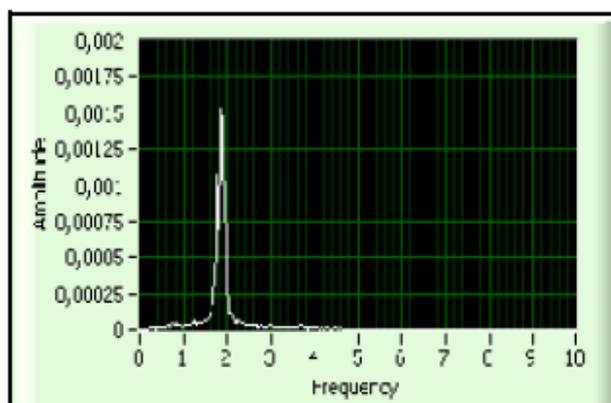


Figura 3.5.2. Señal adquirida a 1,8 Hz y en FFT.

El análisis muestra que preocupa especialmente el movimiento de las campanas, cuya frecuencia es muy cercana a la del primer modo de la estructura.

Además, la reducción de la frecuencia de oscilación que se observa con las campanas en movimiento muestra claramente la presencia de efectos de degradación muy evidente que dan lugar a fenómenos de no linealidad. A tales efectos, se han presentado hipótesis de intervenciones dirigidas a:

- Mantener la frecuencia de vibración de la estructura de los de las campanas.
- Restaurar la grieta y poner en práctica un plan de recuperación de la totalidad de la obra.
- Reducir el forzamiento que surge debido al movimiento oscilatorio de las campanas.
- Reducir la amplitud de las oscilaciones de la torre que el complejo a continuación.

También se ha propuesto la verificación del funcionamiento de los motores que accionan el movimiento de las campanas, que no excluye que podrían afectar a la dinámica de la estructura de la torre.



Diferentes métodos de intervención son entonces factibles para lograr los objetivos propuestos, pero para su aplicación real, inevitablemente se tiene que tener en cuenta las restricciones a las que está sujeta la obra.

3.5.3. CONSIDERACIONES FINALES

Las experiencias han demostrado cómo los estudios dinámicos pueden proporcionar valiosas directrices para la aplicación de medidas destinadas a la recuperación y conservación de este tipo de estructuras, la identificación y la determinación de las causas de deterioro. Dicha información puede ser obtenida directamente de los resultados de las pruebas o, posteriormente, a través de un modelo numérico de elementos finitos de la estructura de calibrado en base a los resultados de las investigaciones experimentales. Generalmente se siguen dos enfoques: en primer lugar el modelo numérico que resulta esencial para hacer predicciones, así como la evidencia experimental, que proporciona información sobre el estado de salud actual de la estructura, sobre todo si las medidas se llevan a cabo sobre una base regular.



3.6. Investigaciones y caracterizaciones dinámicas asociadas al edificio Intramoenia (Avellino): métodos, finalidad y desarrollos

3.6.1. DESCRIPCIÓN GENERAL Y CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA

El proyecto consiste en la adecuación sísmica de una estructura de hormigón armado que nunca fue terminado, el cual supone parte del hospital de la ciudad de Avellino y que albergará un centro para los ancianos. El ajuste sísmico se logró mediante el uso de técnicas de aislamiento de la base (Figura 3.6.2). En particular, el sistema de aislamiento sísmico consta de aisladores de tipo elastoméricos de alta amortiguación y de los dispositivos de deslizamiento.

El edificio se compone de tres partes (Figura 3.6.1), con cuatro pisos de altura más uno aislado en la planta baja, separadas por una junta de dilatación y unidas, sin embargo, en la zona de la cimentación mediante una solución constructiva de zapata corrida.

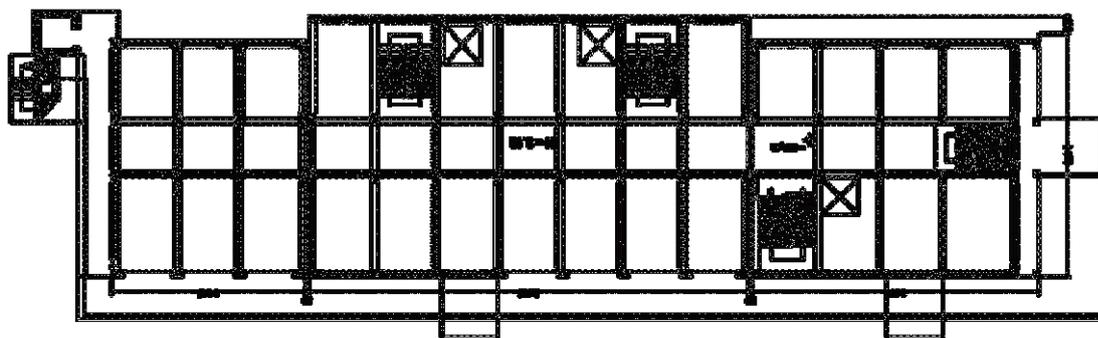


Figura 3.6.1. Plano del hospital: estructura dividida en tres cuerpos.

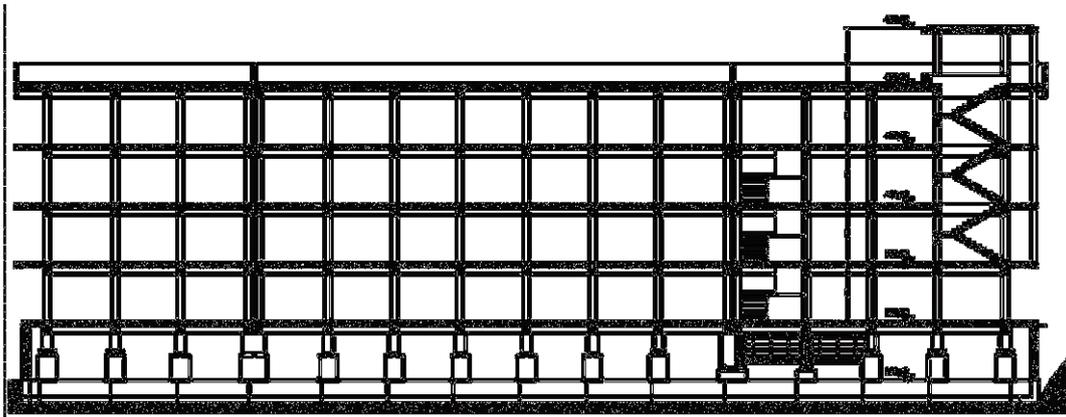


Figura 3.6.2. Sección del hospital después de la inserción de los aisladores.

3.6.2. DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Se reprodujeron 3 tipos diferentes de modelos de elementos finitos:

- Un primer modelo de referencia que presenta las características dinámicas del edificio tras el procedimiento de intervención, es decir, en la configuración final del proyecto (la placas del primer piso y de la planta baja monolíticas, con el corte de los pilares inferiores para la inserción de elementos aislantes – aisladores, manteniendo la articulación en alzado)
- Un segundo modelo, derivado de que en el proyecto se hace referencia a una condición intermedia del edificio, cuando la placa del primer piso se ha unido mientras que los pilares subyacentes están todavía intactos y aún no se han cortado para insertar los aisladores.
- Un tercer modelo consiste en placa rígida y aisladores, presentándose los aisladores con una rigidez más alta compatible con la deformación esperada durante la prueba en sí. Esta rigidez fue evaluada de manera aproximada después del análisis de las señales transformadas registrados durante las mediciones, habiendo observado que las frecuencias naturales de la estructura, eran del lado de una condición en la que muy probablemente los aisladores expresaron una rigidez mucho mayor que la considerada en el proyecto para la condición de frontera.



3.6.3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS PRUEBAS DINÁMICAS

Los métodos basados en la medición de las vibraciones se pueden utilizar tanto en el funcionamiento activo, excitando externamente la estructura (vibrodyne, golpes, etc...), como pasivo, donde la excitación consiste en ruido ambiental producido por la acción independiente de la medición. Las características de uso del edificio en cuestión son tales que no se permite la realización de mediciones de vibraciones en el funcionamiento activo con evidencia de tiro y de lanzamiento. Por lo tanto, las pruebas dinámicas se realizan utilizando la medición de las vibraciones ambientales, así como también mediante el uso de una vibrodyne particularmente eficiente a la excitación de baja frecuencia.

Estas medidas son la base para la caracterización del comportamiento dinámico de los tres edificios para pequeños desplazamientos y para calibrar el modelo estructural basado en las frecuencias naturales y en las formas modales obtenidas experimentalmente.



Figura 3.6.3. Vibrodyne electromecánico.

La instrumentación utilizada está constituida por todos los acelerómetros de tipo piezoeléctrico. Los datos se recogieron y se muestrearon a 200 Hz con el software preparado especialmente, tanto para la fase de adquisición, como para la fase de procesamiento.

Durante la sesión de captura (19 de diciembre de 2011) se hicieron mediciones de vibración ambiental y también se ha utilizado un vibrodyne para solicitar mejor las vibraciones en frecuencias esperadas para la



estructura aislada. El período de adquisición fue de 16 o 30 minutos con el fin de tener en cuenta las vibraciones ocasionales de auto-excitación de la estructura.

El vibrodyne se utilizó con la activación de una frecuencia de alrededor de 1 Hz, con desplazamientos debidos a las aceleraciones de las masas, incluso a 2 Hz. La Figura 3.6.4 muestra los detalles de la adquisición de la señal acelerométrica en el curso de una de las pruebas dinámicas realizadas.

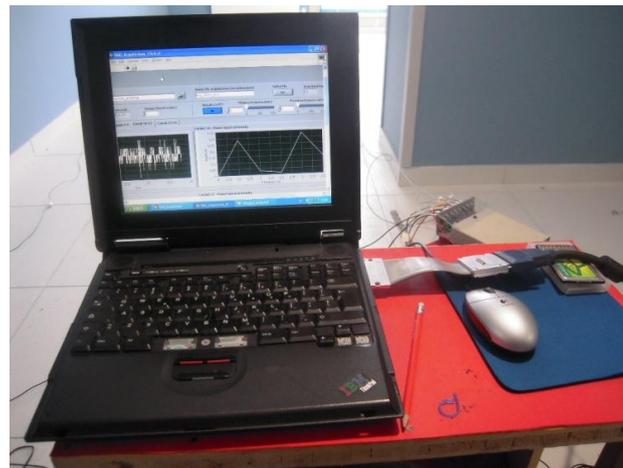


Figura 3.6.4. Adquisición de la señal durante la prueba dinámica.

Asimismo, se organizaron acelerómetros, tanto triaxiales como uniaxiales en número suficiente para activar de manera simultánea 25 canales de medición (Figura 3.6.5).

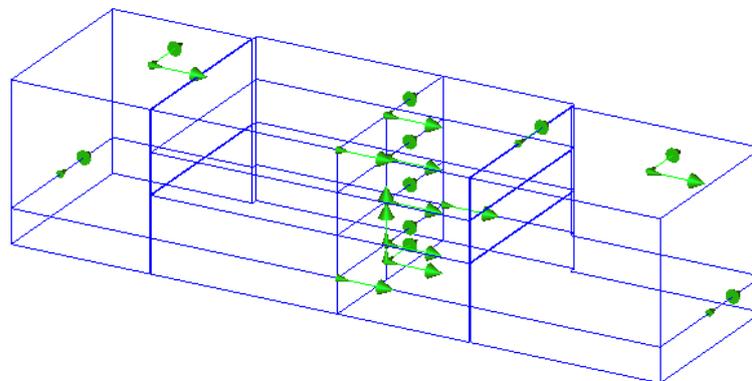


Figura 3.6.5. Disposición de los sensores en los diferentes pisos del edificio.



3.6.4. IDENTIFICACIÓN DE FRECUENCIAS Y ANÁLISIS MODAL

El análisis modal en el caso de las pruebas dinámicas llevadas a cabo, tanto con vibrodyne como para las acciones ambientales, mostraron una clara discrepancia entre los valores de rigidez del sistema de aislamiento medido experimentalmente con los del modelo numérico realizado en software. He aquí la importancia del análisis modal, a través del cual resulta posible, en un momento posterior, volver a calibrar la rigidez de los elementos de aislamiento en el modelado FEM y aumentar su valor. Con ello, se llevó a cabo un nuevo análisis modal, sobre el mismo modelo usado para el proyecto, para reemplazar a la rigidez convencional de los aisladores por otra cerca de 10 veces la convencional, lo que podría justificar la frecuencia física identificada para la estructura y que es igual a alrededor de 1 Hz.

3.6.5. TÉCNICAS PARA LA EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS MODALES Y LA IDENTIFICACIÓN DE LAS FRECUENCIAS NATURALES DE LA ESTRUCTURA

Las pruebas se llevaron a cabo mediante la medición de las vibraciones ambientales causadas por el viento, el tráfico y un vibrodyne instalado temporalmente en un área periférica de la construcción, para maximizar los efectos de torsión. En la mayoría de los casos la intensidad de las señales registradas era más bien modesta, y muy baja es también la relación entre la señal y el ruido de fondo.

En consecuencia, la señal grabada se amplificó y se filtró a través de un filtro de paso bajo entre 0 y 30 Hz (Se observó, sin embargo, que el ruido electromagnético ambiental muchas veces se superpone a la señal débil de los sensores, a menudo confundiendo la lectura de las mediciones). La identificación de las frecuencias de resonancia se llevó a cabo mediante el análisis de la señal en el dominio de la frecuencia. En particular, para cada una de las señales registradas se caracterizó la función de densidad espectral de potencia, que expresa la variación de la potencia de la señal cuando varía la frecuencia. Las frecuencias de resonancia se pueden identificar fácilmente a través de los picos que son evidentes a partir de un examen de la gráfica de la densidad espectral de potencia.

El método también se denomina Peak-picking, el cual permite identificar las principales frecuencias mediante el examen de la señal transformada



en el dominio de la frecuencia. A través de la aplicación repetida de la técnica de selección de valores de pico se identificaron ciertas frecuencias significativamente aceptables en términos de correlación con las frecuencias esperadas.

3.6.6. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los valores resultantes en términos de frecuencia y modo de forma esencialmente se identificaron mediante la evaluación del índice de MAC (Modal Assurance Criteria), además de una evaluación visual de la compatibilidad con las formas identificadas numéricamente. El índice evalúa la correlación entre dos formas modales diferentes ψ_1 y ψ_2 numéricamente.

$$MAC(X_{teor}, X_{sperim}) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n \psi_{x_teor} * \psi_{x_sperim} \right|^2}{\left(\sum_{j=1}^n \psi_{x_teor} * \psi_{x_teor} \right) * \left(\sum_{j=1}^n \psi_{x_sperim} * \psi_{x_sperim} \right)}$$

Donde X_{teor} y X_{sperim} son dos formas de los modos correspondientes, uno de los cuales se obtiene de manera numérica mientras que el otro es evaluado por mediciones dinámicas.

En general, un valor MAC más alto indica una mejor correlación entre los modos, es decir, las dos formas modales con correlación de 100% representan una correlación perfecta. Tal y como puede observarse en la Tabla 3.6 hay un buen paralelismo entre las formas del modo esperado, que se calculan con una rigidez de los aisladores en el rango elástico multiplicada por 10, y las obtenidas de las pruebas.

Modo	Frequenza [Hz]			Variazione frequenza		Indice MAC	
	Modellazione K x 1	Modellazione K x 10	Misure dinamiche	K x 1 %	K x 10 %	Confronto K x 1	Confronto K x 10
1	0.31943	0.96007	0.971875	204.25	1.23	0.91434	0.9451
2	0.32806	0.98749	0.984375	200.06	0.32	0.99838	0.9985
3	0.38555	1.13279	1.190625	208.81	5.11	0.99647	0.9946

Tabla 3.6. Comparación de las frecuencias calculadas con las frecuencias



identificadas, validado con el índice MAC.

En la Tabla 3.6 se puede observar que los tres primeros modos de identificar, en términos de forma, corresponden a un buen índice de MAC (por encima de 90%), y de hecho la segunda forma del modo (movimiento en dirección X) alcanza casi el 100%.

En conclusión, con referencia a lo anterior, se puede decir que los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas son satisfactorios de acuerdo con las suposiciones realizadas acerca de la estructura y los materiales.





4 . PROPUESTA DE MONITORIZACIÓN: **LA COLEGIATA DE SANTA JULIANA Y LA** **NECESIDAD DE PRESERVAR UNA** **BELLEZA ANCLADA EN EL TIEMPO**



4.1. Introducción

La historia de Santillana del Mar es inseparable de la de su Colegiata. La poca documentación conservada impide ser muy precisos en cuanto a sus orígenes que, como en otros muchos casos de fundaciones montañosas, datan de finales del siglo VIII o principios del IX, cuando los reyes astures iniciaron su política de repoblación con la construcción de pequeños monasterios. La primera referencia documental segura aparece en su *Cartulario* o *Libro de Regla* y data del año 943, fecha en la que el monasterio ejercía ya algún dominio en la comarca por lo que su fundación debió de ser algo anterior. Se ignora si fue dúplice en sus primeras décadas de existencia, pero a partir de 980, cuando es nombrado abad Indulfo, es solo masculino.

Favorecido siempre por los condes castellanos primero y la monarquía después, su influencia en la primera mitad del siglo XI fue grande y no cesó de ampliar su patrimonio ya fuera debido a generosas donaciones o compras que se intensificaron en la siguiente centuria. Su transformación en Colegiata, según Escagedo, se hizo paulatinamente durante los siglos XI y XII. En 1197 el cabildo colegial ya está completamente constituido. Esta época de máximo esplendor coincide con el momento en que sobre la antigua edificación mozárabe del siglo X se construye la actual iglesia, que pudo levantarse entre las dos últimas décadas del siglo XI y las dos primeras del XII.

El claustro, que se empezó a construir por su ala sur, es de finales del XII y principios del XIII. La Colegiata se suprimió el 1 de octubre de 1852. En 1899, cuando afortunadamente la actitud hacia nuestro patrimonio artístico y eclesiástico era ya del todo distinta, la real orden de 12 de marzo la declaró Monumento Histórico Artístico, el primero de la comunidad cántabra en recibir tal distinción.

4.2. Patologías identificadas durante las visitas

- Presencia de humedades en la zona Norte entre el Claustro y la Iglesia
- Bajas temperaturas debido a las altas humedades
- . Inclinación de la torre Oeste hacia el exterior
- Presencia de fisuras de abertura considerable bajo la zona del órgano, propiciadas por el desplome de la torre anexa

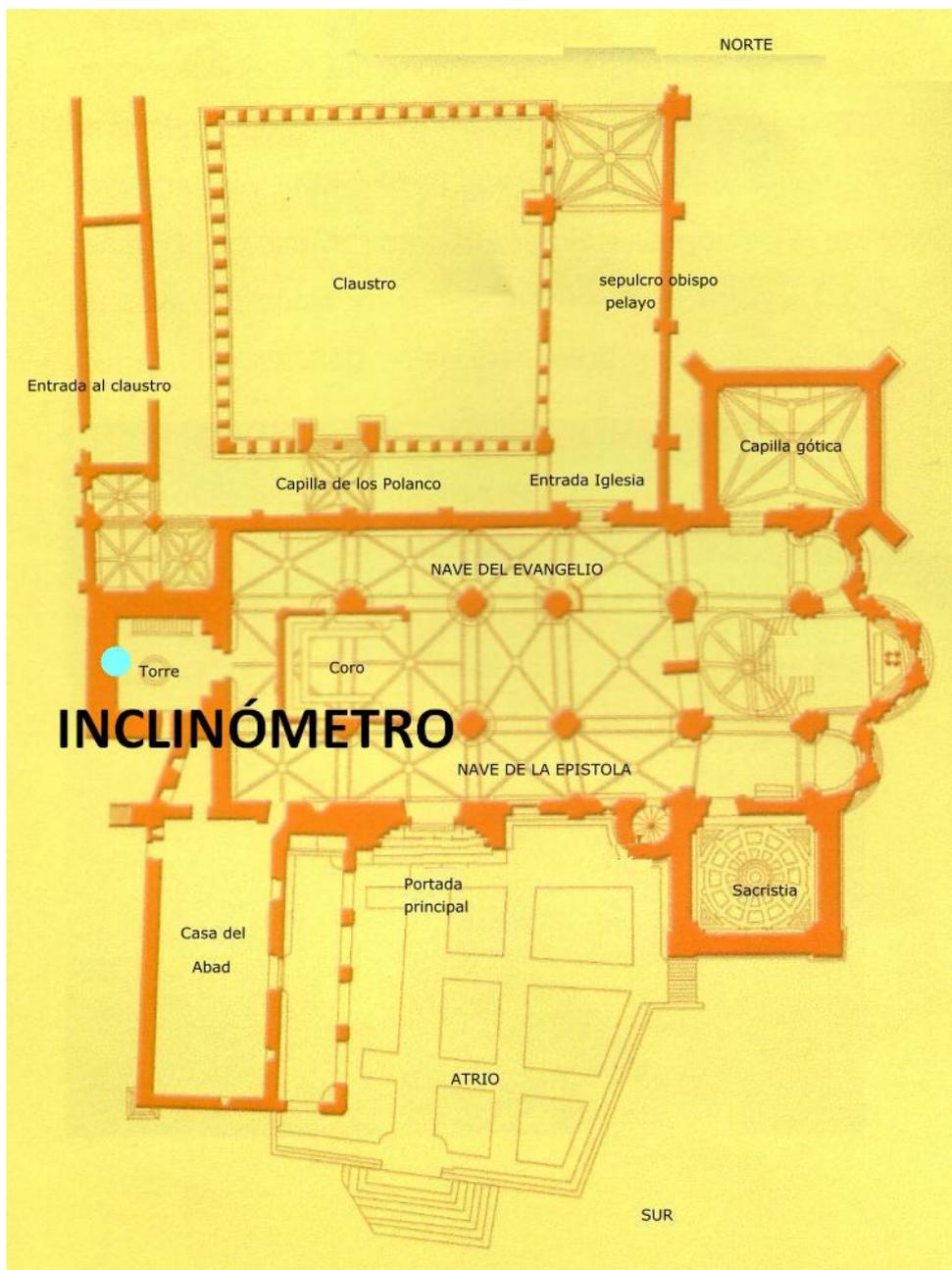


- Aparición de grietas de menor importancia en los muros de mampostería

4.3. Propuesta de monitorización

4.3.1. MONITORIZACIÓN DE LA INCLINACIÓN DE LA TORRE OESTE

4.3.1.1. UBICACIÓN DEL INCLINÓMETRO





4.3.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL INCLINÓMETRO

Servoinclinómetro SENSOREX SX41900

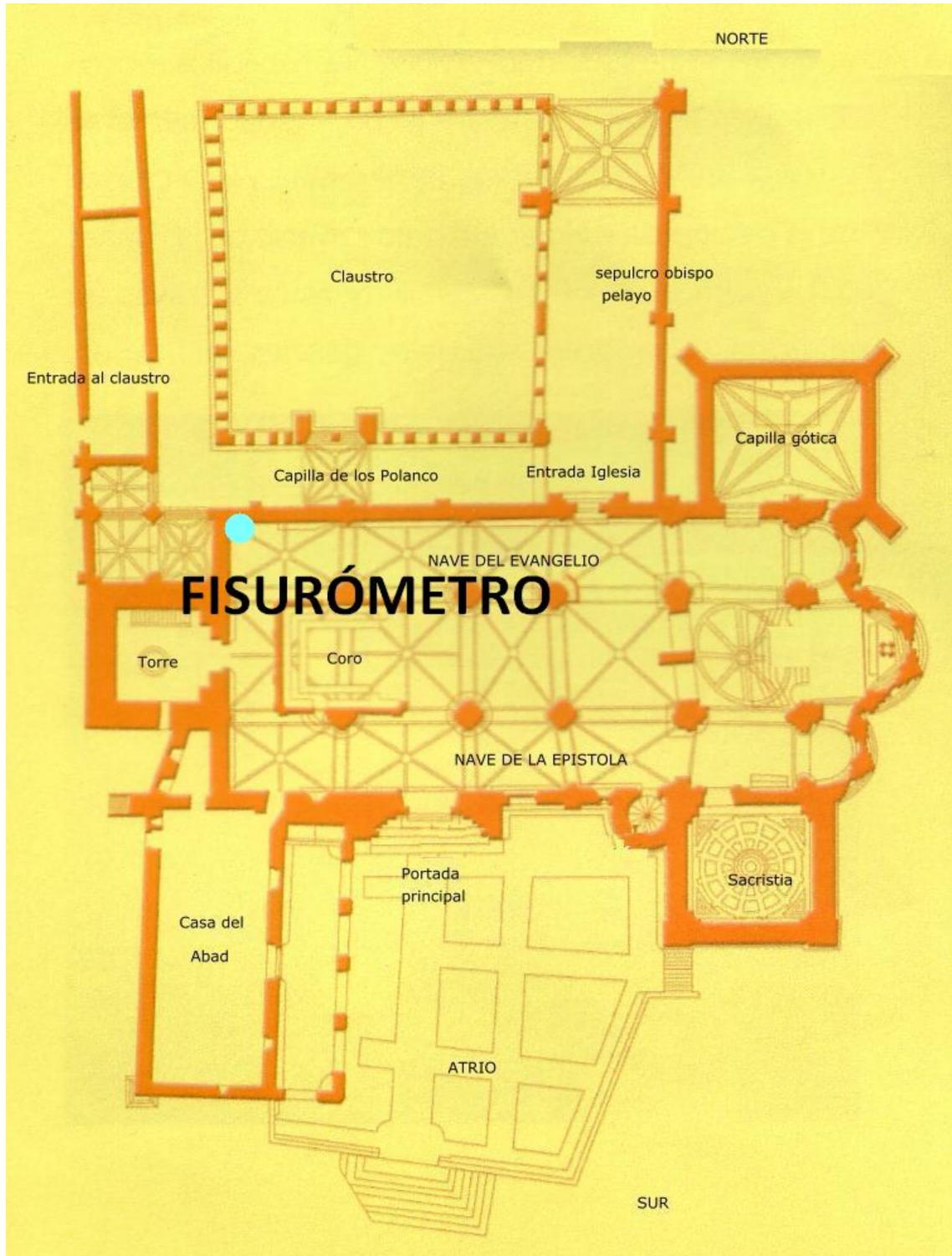


- a) **Rango:** $\pm 5.75^\circ$ hasta $\pm 90^\circ$.
- b) **Salida:** Analógica en corriente y tensión. Digital RS232 y RS485.
- c) **Linealidad:** 0.1%.



4.3.2. MONITORIZACIÓN DE LAS FISURAS BAJO EL ÓRGANO

4.3.2.1. UBICACIÓN DEL FISURÓMETRO





4.3.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL FISURÓMETRO

Fisurómetro Rissfox Mini-RS



Especificaciones técnicas

Rango de medición	10 mm (± 5 mm)
Resolución	0,0025 mm
Longitud de cables de sensor	2 m
Memoria	16000 registros de datos

Ejemplos de la capacidad de memoria



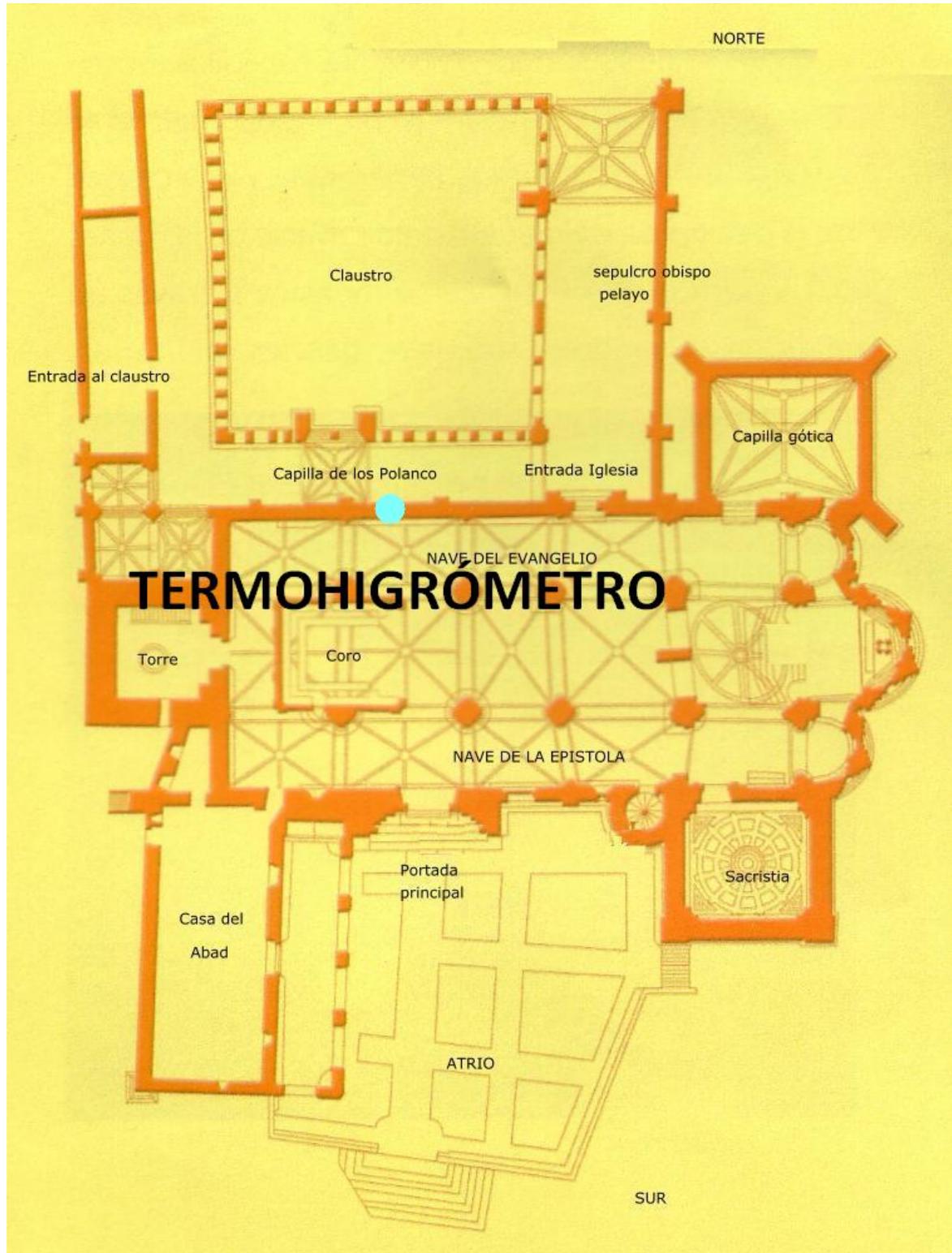
Tamaño memoria	Sensores activos	Cuota medición	Tiempo registro
16000 valores	Sensor de grietas	15 minutos	167 días
16000 valores	Sensor de grietas	1 hora	667 días
64000 valores (opcional)	Sensor de grietas	15 minutos	667 días

Coste(con IVA): 520'30€



4.3.3. MONITORIZACIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD

4.3.3.1. UBICACIÓN DEL TERMOHIGRÓMETRO





4.3.3.2. CARACTERÍSTICAS DEL TERMOHIGRÓMETRO

Termohigrómetro PCE-HT110



Especificaciones técnicas del termohigrómetro

Rangos de medición

0 ... +50 °C / 10 ... 90 % H.r.

Precisión

± 0,8 °C
≥ +70 % H.r. ±4 % del valor de medición
±1 % H.r.
< +70 % H.r. ±4 % H.r.

Resolución

0,1 °C / 0,1 % H.r.

Memoria

Tarjeta SD 1 ... 16 GB (se incluye en el envío tarjeta de 2 GB)

**Cuota de medición/
intervalo de registro**

ajustables: 5, 10, 30, 60, 120, 300 o 600 segundos, o automático (almacena



	un dato cuando hay una alteración del valor de ± 1 °C, o ± 1 % H.r.)
Fecha y hora	programable
Alimentación	6 x baterías 1,5 V AAA / 9 V adaptador de red (opcional)
Condiciones ambientales	0...+50 °C / 0 ... 90 % H.r.
Dimensiones	132 x 80 x 32 mm
Peso	282 g
Coste (con IVA):	163'35€



5. PERSPECTIVAS FUTURAS



5.1. Últimas tendencias

En vista del estado actual y de la evolución inherente de las técnicas y los materiales, es posible aventurar algunas pautas de desarrollo futuro:

- Los sistemas de monitorización estructural están cada vez más vistos como una importante herramienta en el mantenimiento de estructuras. Bajo esa óptica, todos los avances y perspectivas futuras pasan por el desarrollo de materiales inteligentes y estructuras "vivas".
- Los materiales con sensores incorporados en su interior servirán para proporcionar información sobre las condiciones estructurales del propio material. Así, de manera análoga a los músculos que cuentan con nervios en su interior para proporcionar al cerebro toda la información sobre la condición de los músculos, las estructuras contarán con sensores integrados que harán las veces de nervios.
- Las estructuras vivas son la última moda del diseño y el análisis en la ingeniería civil, siendo capaces de evaluar cargas, deformaciones y daños así como corregir y tener en cuenta los efectos de las cargas. Frente a las estructuras actuales que son altamente teóricas, dicho planteamiento emplea materiales de auto – accionamiento emergentes.
- Parece evidente la clara necesidad de desarrollo de técnicas de monitorización mediante tecnologías de fibra óptica.
- Dada la problemática asociada al modo en que la alta temperatura afecta a los sensores, se están desarrollando sensores capaces de actuar bajo condiciones de incendios. En esa dirección ya se han realizado pruebas con resultados bastante alentadores.
- La instalación de sensores durante la construcción de las estructuras tiene múltiples ventajas como la posibilidad de colocar éstos embebidos en el hormigón. Esto significa que sería posible llevar a cabo evaluaciones estructurales en cualquier momento de la vida de la estructura. Sin embargo, esta no es la situación cuando los sensores son instalados tras la ejecución de la estructura. Por esta razón y con claras perspectivas futuras, sería interesante estudiar un método o procedimiento que permita la evaluación estructural de aquellas estructuras existentes monitorizadas tras su construcción. Obviamente dicho procedimiento requeriría de una evaluación del estado inicial de la estructura.



- En relación con la tecnología wireless, actualmente los experimentos se están llevando a cabo con el fin de probar el comportamiento básico de los sistemas, así como para recoger una cantidad suficiente de datos que permitan extraer modelos más refinados de las respuestas dinámicas de las estructuras.
- Se espera que mediante la combinación de las técnicas de monitorización, los métodos de ensayo convencionales y los métodos de ensayo no destructivos más sofisticados, así como herramientas de simulación y modelado, el conocimiento de las estructuras históricas y las técnicas para preservar éstas para las generaciones futuras se vean acrecentadas significativamente.
- En relación al estudio de parámetros como la temperatura y la humedad relativa del aire ambiente, la temperatura superficial o el contenido de agua de los materiales, además de los instrumentos comúnmente utilizados en la actualidad, existen otros de funcionamiento análogo, pero con un desarrollo tecnológico mucho mayor. De este modo, los antiguos termohigrógrafos de tambor han dado paso a modernos sistemas de tamaño reducido y con una gran capacidad de almacenamiento de datos para su posterior procesamiento mediante ordenador, sondas de contacto con prestaciones realmente altas que permiten precisar y afinar aún más en los datos registrados.

5.2. Una mirada al pasado, garantía de un futuro alentador

5.2.1. EL PRECURSOR DE LA VIGILANCIA ESTRUCTURAL MODERNA: LA EXPERIENCIA DEL PADRE ALFANI

En 1904, en la revista de Física, Matemáticas y Ciencias Naturales de Pavia, el Padre Guido Alfani del Osservatorio Ximeniano de Florencia, ilustró algunas experiencias sobre la torre del Palazzo Vecchio en Florencia, diseñada por Arnolfo di Cambio. Para llevar a cabo los estudios, el Padre Alfani subió al balcón más alto de la torre en correspondencia con las columnas del campanario y observó a través de los instrumentos diseñados y elaborados con el fin de detectar las oscilaciones de la torre.



Figura 5.2.1.1. Torre del Palazzo Vecchio (Florenca).

Las herramientas que utilizó para su trabajo fueron:

- Un "horizonte artificial", es decir, un cuenco de cristal circular con un diámetro de 11,5 cm lleno de mercurio, pues tal como afirmaba, "tiene gran facilidad para producir ondas en la superficie".
- Un sismógrafo simplificado constituido esencialmente por una masa libre para oscilar con el extremo conectado a una palanca, que tiene la función de grabar y amplificar la vibración imperceptible de la masa.

5.2.1.1. INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍAS UTILIZADAS

Las primeras observaciones del Padre Alfani, hechas con el horizonte artificial, son distintas en "vibraciones" y "oscilaciones" e identificadas principalmente por la duración del período, muy corta para las primeras, que no invaden toda la masa sino sólo la superficie del mercurio, y más amplia para las segundas, que invaden toda la masa de mercurio. Esta primera serie de observaciones también conduce al estudiante a distinguir las diferentes causas de los movimientos de la torre:



- El movimiento de los viandantes y principalmente de los vehículos (vagones y carruajes) que pasan en la Piazza della Signoria, que inducen muy cortas atenuaciones al horizonte artificial.
- La onda de choque causada por el golpe de cañón del mediodía.
- El sonido de las campanas que llevaron a la oscilación de la masa de mercurio.
- El viento que causó fluctuaciones apreciables del horizonte de mercurio.

Después de esta primera campaña de pruebas, el erudito perfeccionó un sismógrafo simplificado que consiste en un péndulo conectado a un sistema de palancas para expandir las oscilaciones del péndulo. Por lo tanto, la masa cilíndrica de aproximadamente 18 kg de péndulo, suspendido por 3 cadenas c , c' , c'' (Figura 5.2.1.2) oscila y transmite el movimiento a un marco de centrado en el punto fijo d atado a uno de los estantes m . En el extremo de G hay un lápiz de luz con la punta de vidrio que traza las oscilaciones más grandes en un pedazo de papel ahumado.

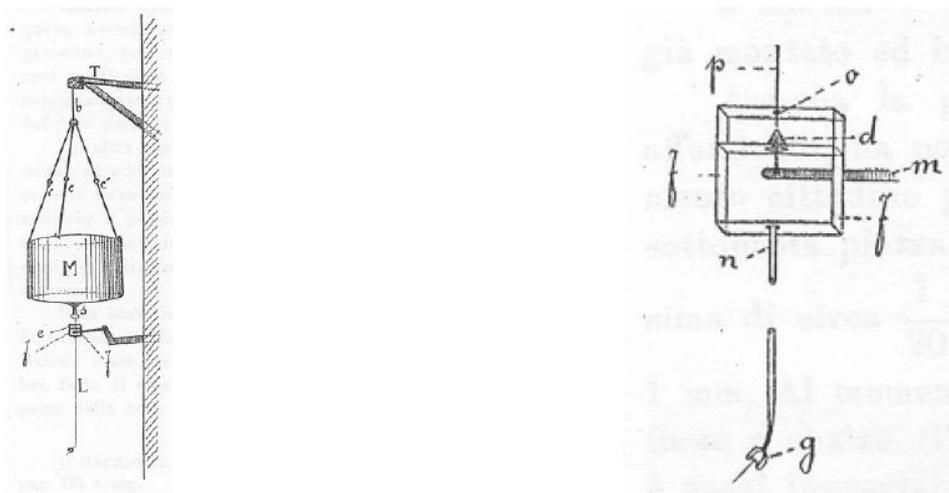


Figura 5.2.1.2. Palanca de sismógrafo simplificado y especial que amplifica las oscilaciones.

En los siguientes días hasta el 9 de mayo, el Padre Alfani registró con el sismógrafo simplificado diversos fenómenos.



- El fenómeno de las vibraciones causadas por el movimiento de la ciudad. Supone una causa de movimiento de la herramienta que se pone a dibujar una línea gruesa y tiene un grosor igual a 1 mm (en contraposición a la más delgada de 1/20 mm de la punta de vidrio).
- El fenómeno del sonido de la campana que se encuentra en una amplitud de movimiento de aproximadamente 22 mm amplitud de pico a pico.
- El fenómeno del disparo de cañón que conduce a la rápida vibración y a un choque de la pluma que no es detectado por el instrumento de medición.
- Las oscilaciones más fuertes son, sin embargo, debidas al viento que registró sus valores más el 8 de abril, con una velocidad de grabado de 20 m/s

5.2.1.2. IDENTIFICACIÓN ESTRUCTURAL EXPERIMENTAL

Se basa en la búsqueda con precisión del período de la torre y de las aceleraciones máximas a las que ésta estaba sometida. Con respecto al período de un movimiento oscilatorio, el erudito lo define como: "la mitad del tiempo empleado por una partícula que vibra u oscila para volver al mismo punto del que había partido". Sin embargo, el período definido por el Padre Alfani resulta ser la mitad de lo que propiamente se define hoy.

Así, resume los periodos naturales de oscilación:

- Semi período natural de la torre en el 1:38 s viento.
- Semi propio período de la torre del campanario en 1,2 s.

Luego pasa de la amplitud de los desplazamientos resultantes a la amplitud de las aceleraciones con la fórmula utilizada para el movimiento sinusoidal.

$$A = 4\pi^2 a / T_0^2$$

Con "a" que es la amplitud máxima de las oscilaciones en mm y T₀ su periodo de tiempo de oscilación. De acuerdo con el investigador, es más



significativo para la prueba estructural no tanto la magnitud de los desplazamientos sino la aceleración de la estructura.

En cuanto a las oscilaciones causadas por la onda de choque de los cañones, hizo las siguientes consideraciones: la fuerza aplicada es impulsiva y provoca desplazamientos (trepidación fugaz) de aproximadamente 1/10 mm de offset de residuos que, reducida de amplificación, conduce a un pico a pico de amplitud de 0,002 mm.

El Padre Alfani no se detuvo en este valor del offset, que es de un orden de magnitud mucho menor que el del movimiento de un ciudadano y pudo excluir la influencia de los cañones, pero profundizó en el tema diciendo que "sin duda que este valor es muy pequeño, mucho menor que la obtenida por el ciudadano en movimiento. Sin embargo, usted debe tener muy en cuenta el principio de que lo que es causa de daños en un edificio que recibe un impulso, no es tanto la magnitud de este movimiento como la aceleración. Por citar un ejemplo, los terremotos amplios y muy poco intensos, debido a un valor de aceleración muy pequeño. Por el contrario, terremotos de pequeña amplitud que son muy fuertes, debido a que su valor de aceleración es muy grande".

Esto conduce al cálculo de la aceleración máxima de 0,004 m / s² derivada de la estimación durante el periodo de 1/10 de un segundo (sobre la base de su experiencia). "El valor es muy bajo y da una buena razón para creer que la torre no puede estar dañada como consecuencia del cañón".

En cuanto al efecto de la campana, el Padre Alfani determina en virtud de esta acción un valor incorrecto de la aceleración de amplitud igual a 3,28 mm / s² (que en realidad es de 6.08 mm / s²). Incluso ese caso aunque con un razonamiento inadecuado no es considerado peligroso para la torre.

Finalmente el viento que provoca la aceleración de 16,8 mm / s², se convierte en la causa más importante de excitación. (El Padre Alfani, para el corto período de observación supuesto, no había podido experimentar la acción sísmica que está en efecto en la masa de la torre que domina la acción). Sin embargo, resulta sorprendente la precisión, el rigor y amor a la ciencia y la experiencia que conduce al Padre Alfani a un tratado que, más allá de ciertas concepciones anticuadas por el desarrollo de la ciencia, supone una referencia en la línea de razonamiento que aún hoy en día debe ser seguida, incluso por todos los ingenieros.



[“El control dinámico de estructuras: de las experiencias de Padre Alfani Torre del Palazzo Vecchio a las técnicas actuales de monitorización remota”]

5.2.2. EL SISMÓGRAFO ZHANG HENG

El primer instrumento utilizado para la medida de terremotos fue el sismógrafo Zhang Heng, un detector de terremotos inventado por el inventor y astrónomo chino que le da su nombre, inventado en el año 132 d.C, es decir, 1700 años antes del primer sismógrafo europeo. Se trata de un artefacto formado por ocho dragones que situados alrededor de un cuerpo central marcan los puntos cardinales.

Cada uno de ellos consta de una bola de cobre en su boca, de tal modo que al menor movimiento sísmico el dragón orientado según el mismo dejará caer la bola en el interior de la boca de una rana colocada bajo éste, permitiendo conocer la orientación del terremoto.

La limitación del sismógrafo radica en la imposibilidad de cuantificar intensidades, lo que lo convierte en un utensilio poco útil hoy en día pero de valor incalculable teniendo en cuenta la época en que se concibió, siendo un precursor de tecnologías posteriores.



Figura 5.2.2.1. Sismógrafo Zhang Heng.

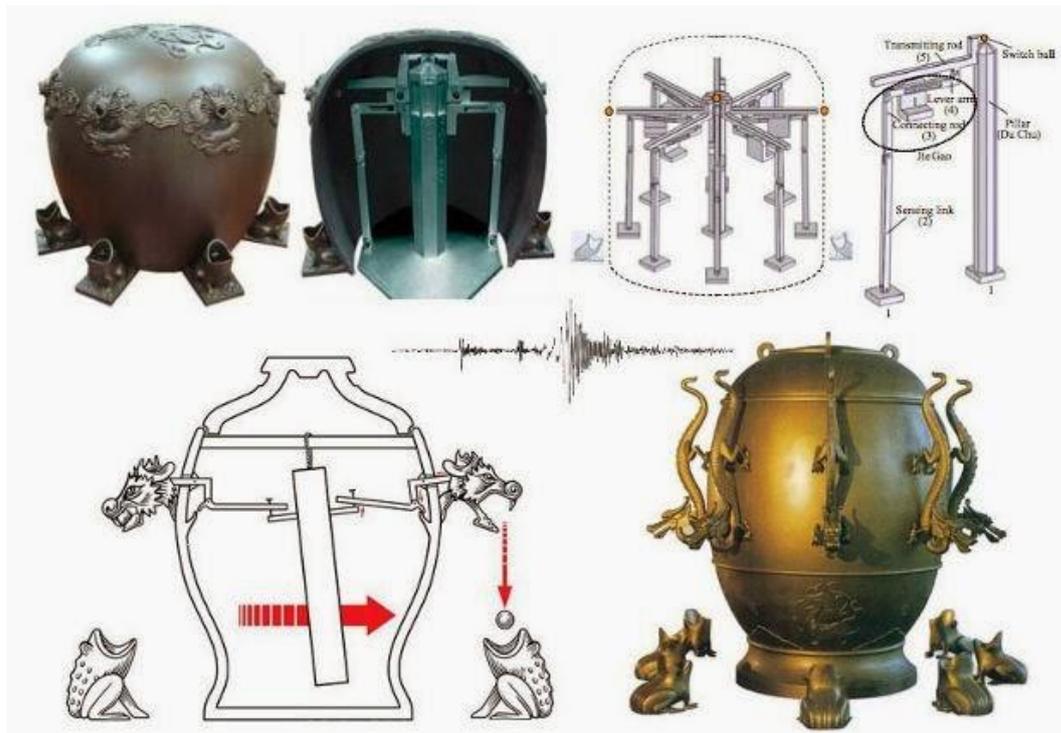


Figura 5.2.2.2. Funcionamiento del sismógrafo Zhang Heng.

5.2.3. TÉCNICAS DE VIGILANCIA MEDIANTE SENSORES MÁS AVANZADOS: REDES NEURONALES

El control estructural tradicionalmente se basa en medidas de tipo global realizadas utilizando un número limitado de sensores distribuidos sobre un área relativamente grande de la estructura. La resolución espacial limitada de las mediciones, sin embargo, sólo permite la identificación de las condiciones de daño bastante significativas.

El desarrollo de redes de sensores inalámbricos se caracteriza por un potencial de mayor densidad en comparación con las soluciones de medición más tradicionales, lo que ha permitido la superación parcial de las limitaciones de la vigilancia de la salud estructural. Sin embargo, la práctica en el campo de la ingeniería de la forma convencional de monitorización estructural se basa en la adaptación a la aplicación específica de soluciones de medición ya disponibles en el mercado comercial. De esta manera la capacidad de integración de los sensores en el cuerpo estructural está todavía bastante limitada.



Un enfoque innovador para la monitorización de la salud estructural requiere el diseño e implementación de sistemas integrados, posiblemente a través del desarrollo de soluciones adaptadas a la propiedad individual. Tales sistemas deben ser capaces de superar los problemas típicos relacionados con la robustez del hardware, la integración de los sensores en el interior de los elementos estructurales y autonomía operativa (incluyendo problemas relacionados con el suministro de energía).

En este contexto, el desarrollo de los sistemas neuronales innovadores para la monitorización de la salud estructural es una oportunidad vital para la evaluación integrada del estado funcional y la salud de la estructura y la gestión racional de las actividades de mantenimiento. Un sistema neuronal que esencialmente imita la estructura y función del sistema nervioso humano, basándose en la integración en el cuerpo estructural de un número muy grande de sensores distribuidos, con una infraestructura distribuida para la comunicación y el procesamiento en paralelo de datos.

La miniaturización y la integración en el cuerpo de la estructura son los requisitos principales para la aplicación efectiva de los sistemas neuronales. La integración de sensores en el cuerpo estructural conduce a una serie de ventajas, la principal de las cuales está representada por la capacidad de identificación de daños en posiciones que de otra manera no son fácilmente accesibles. Las soluciones comerciales desde el punto de vista de los sensores requieren, sin embargo, un diseño específico con el fin de operar sin introducir alteraciones en los elementos estructurales, y asegurar la inserción de los sensores sin daño para el rendimiento de la misma en términos de rigidez, resistencia y ductilidad.

Los materiales inteligentes con propiedades de auto-diagnóstico proporcionan, por lo tanto, nuevas oportunidades para la integración de elementos sensibles en el cuerpo de la estructura, lo que justifica la creciente atención de la comunidad científica internacional hacia ellos.

5.2.3.1. NANOTUBOS DE CARBONO

Particularmente prometedores en este contexto son los sensores basados en nanotubos de carbono. Estos permiten la adopción de un "bottom-up" en el desarrollo de sensores integrados en la estructura y de materiales inteligentes, caracterizándose por un rendimiento mecánico interesante y



la capacidad de proporcionar una respuesta eléctrica medible a estímulos aplicados, tales como voltajes, deformación, grietas.

Los nanotubos de carbono fueron descubiertos por Iijima en 1991 y se componen de átomos de carbono unidos entre sí para formar una estructura cristalina helicoidal, pudiendo ser de pared simple o de pared múltiple. Desde el punto de vista geométrico, los nanotubos de pared simple están constituidos por una sola celosía cilíndrica de átomos de carbono, mientras que los nanotubos de pared múltiple se caracterizan por múltiples celosías cilíndricas colocadas concéntricamente.

Estos se obtienen generalmente a través de un proceso de acreción llamado deposición de vapor químico. La síntesis se obtiene en presencia de un catalizador bajo condiciones estrictamente controladas. Los nanotubos de carbono se caracterizan por diámetros del orden de nanómetros y forman relaciones muy altas. Desde el punto de vista mecánico, los nanotubos de carbono presentan un comportamiento de tipo elástico y una rigidez extremadamente alta ($E \approx 1$ TPA). La estructura de celosía particular de los átomos de carbono también es responsable de la alta resistencia a la tracción (20 a 60 GPa, con una desviación máxima en el orden de 10%).

Desde el punto de vista eléctrico, los nanotubos de carbono pueden ser clasificados como conductores o semiconductores, dependiendo de la orientación de los átomos de carbono en la estructura reticular. Varios estudios publicados recientemente han centrado su atención en la funcionalización de nanotubos destinadas para su uso en una variedad de aplicaciones diferentes. La alta rigidez y resistencia así como una alta conductividad eléctrica y térmica hacen a los nanotubos de carbono extremadamente prometedores para el desarrollo de numerosas soluciones de aplicaciones, incluyendo materiales compuestos innovadores y de alto rendimiento inteligente para la monitorización estructural.

El análisis comparativo de los resultados experimentales y desarrollos teóricos disponibles hasta ahora ha permitido la identificación de criterios y pautas útiles para la fabricación de materiales compuestos de matriz de cemento con nanotubos de carbono optimizados para la monitorización de la salud estructural de la construcción civil. Los campos de investigación hoy día convergen en diferentes aspectos como la funcionalización, dirigido a mejorar la compatibilidad de los nanotubos con la matriz de cemento y la dispersión de los nanotubos en la pasta de cemento. Diferentes aspectos de la producción de materiales compuestos



de matriz de cemento con nanotubos de carbono también son objeto de estudios y análisis científicos, centrándose en particular en las aplicaciones de la misma en el contexto de la vigilancia de la salud estructural.

5.2.3.2. FUNCIONALIZACIÓN

La principal propiedad de los materiales compuestos de matriz de cemento con nanotubos de carbono para el desarrollo de materiales inteligentes con propiedades selftest es la piezoresistividad. Un material piezoresistivo, cambia su resistencia eléctrica en respuesta a la deformación aplicada. El comportamiento piezoresistivo de los materiales compuestos de matriz de cemento con nanotubos de carbono es una consecuencia directa de la dispersión de nanotubos de carbono en la pasta de cemento.

Los nanotubos dispersados en la matriz de cemento aumentan la conductividad eléctrica de ésta, pues se caracterizan intrínsecamente por una alta conductividad eléctrica, de modo que la resistencia eléctrica de los compuestos en presencia de cargas aplicadas, se ve modificada debido al cambio de la longitud y el diámetro de los nanotubos.

5.2.3.3. DISPERSIÓN

La funcionalización covalente y no covalente no son en sí mismas suficientes para asegurar la dispersión efectiva de los nanotubos en la matriz de cemento, por lo que también es absolutamente necesario aplicar energía ultrasónica. Sin embargo, la información sobre el poder de baño de ultrasonidos, aunque básica, es difícil de obtener de las publicaciones científicas.

No obstante, ya que un poder excesivo puede causar defectos o daños graves a los nanotubos de carbono, un baño sónico a baja potencia es sin duda preferible para mantener la longitud óptima y la estructura de los nanotubos. Los baños sónicos típicamente usados se caracterizan por las siguientes especificaciones técnicas: $80 \div 130$ W como la entrada de potencia máxima, y una frecuencia de 20 a 40 kHz. Es posible, por último, adoptar el siguiente valor de referencia de potencia por unidad de volumen de la solución con el fin de evitar la rotura de los nanotubos: $0,4626$ W / ml.



5.2.3.4. ASPECTOS PRÁCTICOS RELACIONADOS CON LA FABRICACIÓN DE SENSORES

Hay procedimientos estandarizados para la fabricación de los sensores en la matriz de cemento con nanotubos de carbono, para aplicaciones de monitorización estructural, entre los que se analizan cuestiones prácticas relativas a la fabricación de sensores, incluyendo el procedimiento de envasado, el esquema de medición, tipo de electrodos...

En cuanto al envasado, son aspectos muy importantes los relativos a la definición de una adecuada relación A/C, y a la evaluación del efecto del contenido de agua, sobre la respuesta piezoresistiva del material compuesto de matriz de cemento con nanotubos de carbono de pared múltiple. La relación A/C normalmente oscila entre 0,4 y 0,6 dependiendo del tipo de funcionalización requerida, las características de los nanotubos y el proceso de envasado del compuesto.

En el desarrollo de los sensores a base de cemento con nanotubos de carbono, se debe tener en cuenta el efecto del contenido de agua en la respuesta piezoresistiva. La ejecución de las medidas requiere la definición de un esquema de medición apropiado. Los principales problemas en este sentido están representados por la selección de la frecuencia de la corriente y por la elección entre un esquema de medición de dos electrodos o de cuatro electrodos.

En la matriz de cemento compuesto con nanotubos de carbono de pared múltiple funcionalizados con ácido, la resistencia muestra una respuesta a los cambios de presión de tipo reversible en presencia de cargas de compresión aplicadas. Sin embargo, este tipo de compuesto muestra no sólo una respuesta resistiva, sino también capacitiva, siendo ésta insensible a cargas de compresión. El cumplimiento de las medidas de resistencia es también crucial para el mantenimiento de los electrodos limpios y no susceptibles a la corrosión.

Sobre la base de las consideraciones discutidas anteriormente, es posible delimitar un procedimiento estandarizado para la fabricación de los sensores en la matriz de cemento con nanotubos de carbono, tal como se ilustra en la Figura 5.2.3.

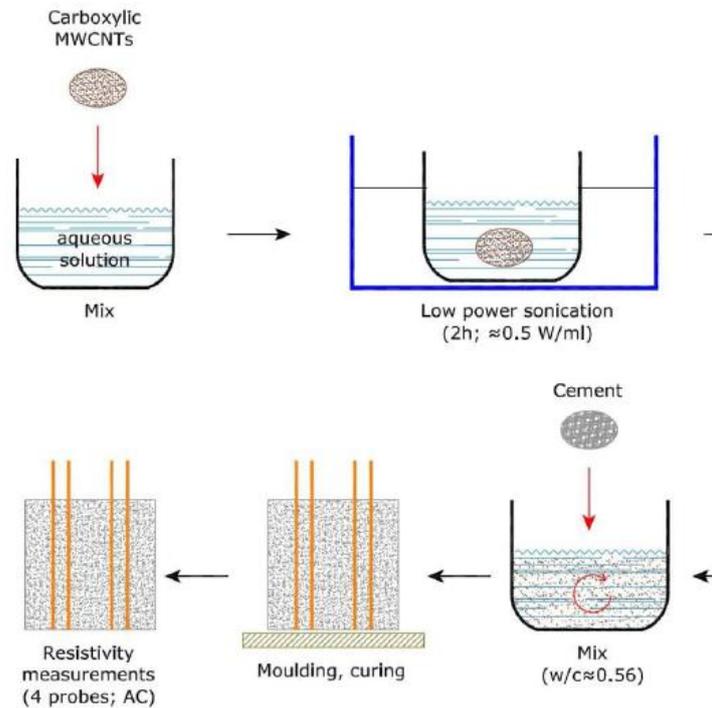


Figura 5.2.3. Ilustración del proceso de fabricación de los sensores en la matriz de cemento con nanotubos.

5.2.3.5. CONSIDERACIONES FINALES

Lo anteriormente expuesto representa uno de los resultados de un programa de investigación conjunta entre Italia y EE.UU, el cual tiene como objetivo desarrollar un sistema de monitorización para las estructuras civiles de tipo biomimético. El componente principal de este sistema está representado por los sensores en la matriz de cemento con nanotubos de carbono que se incorporarán a la estructura que se está supervisando.

Son por tanto, analizados los diversos aspectos relativos a la fabricación de materiales compuestos de matriz de cemento con nanotubos de carbono para aplicaciones de monitorización estructural, y se busca identificar los criterios para el desarrollo óptimo de los sensores en la matriz de cemento con nanotubos de carbono para la supervisión de estructuras civiles.

Actividades específicas de investigación en esta área están siendo desarrolladas y representan la continuación de la investigación en el campo de la monitorización estructural en el futuro próximo.



6. CONCLUSIONES



A partir de todo lo anteriormente expuesto es posible extraer varias conclusiones, bien sean de carácter general o bien particularizadas a aspectos concretos de la temática abordada. Así, en primer lugar de modo general no encontramos con las siguientes:

- La monitorización de las estructuras durante un período concreto de tiempo puede ser una medida adecuada para ayudar a la elaboración de la diagnosis, particularmente cuando se desarrollan fenómenos de inestabilidad, permitiendo un seguimiento de su evolución.
- Las técnicas de monitorización pueden variar desde la sencillez de pequeña instrumentación hasta modernos sistemas basados en sensores, los cuales están conectados a un sistema de adquisición de datos que puede tomar los mismos según períodos de tiempo definidos.
- La técnica de la fotogrametría puede ser también utilizada como técnica de monitorización.
- Es posible implementar técnicas de monitorización durante fases de rehabilitación, en las cuales la información obtenida es utilizada como un factor a considerar en la toma de decisiones, permitiendo, a veces, la reducción de las dimensiones de la intervención. Asimismo, la monitorización en continuo puede ser muy útil si se prolonga tras las tareas de rehabilitación, o cuando aún hay dudas en cuanto a la necesidad o no de más medidas de intervención. Esto constituye una monitorización en continuo.
- La comparativa entre los resultados obtenidos por medio de la monitorización y los resultados obtenidos de los modelos, hace posible refinar los modelos. Al mismo tiempo, permiten el almacenaje de los datos obtenidos y su transmisión vía líneas terrestres, internet, satélite... y puede funcionar como alarma, lo que resulta de gran utilidad en algunas situaciones.
- Dado que la instalación de los sistemas de monitorización son, por lo general, muy caros, debiera llevarse a cabo un análisis coste - beneficio y tan sólo la información relevante de la evolución de los fenómenos analizados ha de ser registrada. El posterior tratamiento de la información adquirida ha de estar igualmente garantizado.
- Es que conviene utilizar la monitorización manual junto con la monitorización remota para cerciorarse de que los resultados obtenidos



de forma remota sean coherentes en comparación con los obtenidos en la manual.

- Destaca la versatilidad de estos sistemas, cuyo desarrollo no sólo va encaminado a estructuras ya construidas sino que se implementa para su integración en estructuras de nueva construcción a fin de hacerlas cada vez más inteligentes y autónomas.

- La instrumentación y monitorización de las obras es una práctica cada vez más generalizada y sin duda técnicamente muy desarrollada, que permite no sólo detectar fallos en la estructura sino, sobre todo, conocer diversos parámetros de la misma en tiempo real, así como su evolución temporal.

- El nivel de sofisticación alcanzado con las últimas tecnologías es notable y se detectan parámetros con una elevada precisión. Pero a la hora de interpretar los resultados obtenidos no existe bibliografía técnica especializada.

- En ese sentido es preciso desarrollar herramientas que faciliten la interpretación de los resultados de los controles de los diversos parámetros, mediante la aportación de rangos orientativos o bien mediante la identificación de niveles de riesgo, con los objetivos siguientes:

a) Distinguir la naturaleza de los valores entre valores anómalos patológicos, indicativos de la degradación de la estructura y los valores cíclicos o estacionales propios de las estructuras.

b) Establecer los factores que originan los valores estructurales de carácter cíclico y cuantificar en la medida de lo posible su influencia.

c) Establecer rangos cuantitativos para los diferentes valores relacionados con niveles de seguridad de las estructuras.

d) Establecer umbrales de valores a partir de los cuales quedan justificadas determinadas intervenciones.

e) Reunir en un documento gran número de casos reales que aporten una visión global del tema.

f) Mejorar la comprensión sobre el funcionamiento de las estructuras, según la tipología a la que pertenezcan.



- En relación a las construcciones en mampostería de piedra, éstas siguen siendo el conjunto más numeroso en el patrimonio edificado en España pese a que aún resultan grandes desconocidas. Así, en las últimas décadas se está prestando especial atención a las estructuras de fábrica y los técnicos que se dedican a su estudio son conscientes de que su comportamiento es muy diferente a las estructuras habituales de hormigón y metálicas, no teniendo la mayoría de los profesionales que trabajan con ellas conocimientos suficientes para valorar a fondo su comportamiento estructural. Además no se disponen de las herramientas de cálculo tan detalladas y validadas como las existentes para las estructuras de hormigón y acero por lo que los técnicos que se dedican a la valoración de los niveles de seguridad de las estructuras de fábrica tienen que valerse de otros parámetros para su evaluación estructural. Y para la obtención de esos parámetros la monitorización estructural se erige como una buena herramienta, con cuyos resultados se puede determinar el estado de "salud" con el que goza la estructura.
- Las magnitudes medidas tanto en la monitorización manual como remota se ven claramente afectadas por las condiciones climatológicas y ambientales, así como de la ubicación física de las referencias y sensores de medida (viento, soleamiento...). Esto hace que sea necesario prolongar la duración de la monitorización durante al menos un año, a fin de poder realizar una comparativa de datos recogidos bajo condiciones análogas, siendo recomendable que sea más de un año.
- La interpretación de los resultados requiere una valoración a lo largo del tiempo, sin resultar necesariamente determinantes valores individuales que pudieran estar motivados por incertidumbres del método de medida o por factores ajenos al mismo, tales como daños en los equipos instalados, acciones no previstas (pájaros o golpes en el caso de sensores remotos), reordenaciones localizadas de mampuestos en la fábrica, efectos locales motivados por incrementos de temperatura o humedad, etc.
- Valores inusualmente elevados respecto a los habituales en el edificio requerirán una indagación complementaria, pudiendo consistir ésta en una nueva lectura para la confirmación. En caso de mantenerse, se adoptarían otro tipo de iniciativas, algunas relacionadas con la disminución en el periodo de medida de las referencias instaladas, complementar la monitorización instalada con nuevos equipos o la realización de trabajos adicionales como son la inspección visual o/y ensayos complementarios.



- La integración de sistemas de instrumentación electrónica de adquisición de datos permiten al investigador monitorizar de manera remota, sin necesidad de desplazarse a la localización, la evolución en tiempo real de los datos recogidos por los sensores instalados. Realizar un histórico de los datos tomados, accesible tanto en forma de gráficas de evolución entre diferentes períodos de tiempo, como de fichero para su post-procesado. Y finalmente, permite establecer protocolos de actuación que evalúen sistemáticamente y de forma computarizada los factores que producen el deterioro en las edificaciones, definiendo alarmas automáticas en caso de que las magnitudes controladas excedan valores límites prefijados.
- La monitorización estructural proporciona a los ingenieros un amplio abanico de posibilidades para la supervisión, el análisis y la comprensión del estado de las infraestructuras, así como las herramientas esenciales y los datos necesarios para los ingenieros que deben tomar medidas a fin de mejorar la sostenibilidad de dichas infraestructuras, y determinar los momentos óptimos para la ejecución de acciones de conservación antes de que el daño es irreparable.
- El proceso de vigilancia de las estructuras ha de estar enmarcado en un protocolo de diagnóstico para obtener datos que sirve para lograr un diagnóstico preciso.
- Adquiere especial importancia el carácter multidisciplinar de la monitorización, ya que para que ésta sea completa, la participación en las diversas etapas del sistema aplicación de especialistas en diferentes disciplinas (arquitectos, patólogos, historiadores, ingenieros, etc..) es crítica.
- La monitorización en continuo nunca podrá reemplazar el experto conocimiento de los técnicos, pero supone una poderosa herramienta para reunir información más detallada de los procesos de deterioro y sus influencias y así comprender mejor los mismos.
- Actualmente el comportamiento dinámico de las superestructuras es estudiado ampliamente. No así los aspectos geotécnicos tales como el comportamiento dinámico de estructuras de carácter geotécnico, que son menos investigados. No obstante, el aspecto más importante se asocia con la posibilidad de mezclar las experiencias y los modelos estructurales y geotécnicos y aplicarlos en diferentes campos.



- Las medidas obtenidas mediante la instrumentación y monitorización estática de estructuras permiten realizar un diagnóstico y análisis cuantitativo del estado en que se encuentra la construcción bajo estudio.
- A través de la monitorización estática estructural de los cuadros fisurativos es posible evaluar el grado de estabilidad en que se encuentran las construcciones por medio de los movimientos presentes en las grietas encontradas. De este modo, se puede conocer el margen de seguridad que presentan las estructuras, a fin de estimar el grado y la urgencia de intervención necesarios en las mismas.
- A su vez, las medidas realizadas deben ser complementadas con modelizaciones de elementos finitos y otros ensayos de carácter no destructivo, que permitan llevar a cabo un análisis más profundo y cualitativo de los daños producidos.
- En la difícil labor de conservación del patrimonio histórico y cultural construido, se deben llevar a cabo acciones no agresivas y que a su vez contribuyan a realizar un diagnóstico preciso y acertado, a fin de evitar intervenciones costosas en la estructura que pueden resultar en gran cantidad de casos innecesarias.
- Se evidencia la falta de pautas de validación definidas con claridad sobre el diseño de nuevos sensores, dependiendo del material y de los parámetros a medir.
- Se precisa del desarrollo de una metodología de modelado predictivo que permita realizar estudios extensos de parámetros a fin de determinar la sensibilidad de los métodos de detección de daños y la insensibilidad frente a factores de confusión como los cambios ambientales, las vibraciones, la variabilidad de fabricación estructural...
- La deformación de los materiales es uno de los parámetros medibles más importantes dentro de la monitorización estructural, razón por la que los sensores de medida de deformaciones adquieren una especial importancia. Deben ser lo suficientemente precisos como para obtener información fiable y relevante que permita asegurar que sus lecturas son perfectamente válidas.
- La medida de las variaciones de temperatura es también de capital importancia en la monitorización. Éstas afectan no sólo a los estados tensionales y deformacionales de las estructuras, sino también a los



propios aparatos de medida. Las variaciones de temperatura pueden alterar significativamente las lecturas de los sensores de deformación.

- De acuerdo con lo anteriormente establecido, el diseño de los sensores de deformación y las condiciones para su instalación en la estructura son de gran relevancia a fin de obtener resultados precisos. Sin embargo, en lo que a diseño e instalación de sensores de temperatura respecta es mucho más sencillo. En ese caso basta con colocar el sensor mecánicamente aislado de la estructura de modo que las variaciones de medida se deban únicamente a variaciones térmicas.

- Dada la complejidad intrínseca de los sistemas de medida de deformaciones, se requiere la ejecución de estudios especiales en los que es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

a) Estudiar la interacción de los sensores con la estructura.

b) Asegurar una transmisión óptima entre la estructura y el sensor.

c) Considerar la existencia de variaciones en las deformaciones como consecuencia de nuestra intervención.

Cabe concluir que se ha llevado a cabo poca investigación sobre estos aspectos pese a su importancia.

Como conclusiones asociadas a la medida de los movimientos de las estructuras:

- La monitorización de movimientos de estructuras del patrimonio construido constituye una herramienta clave en la interpretación del comportamiento deformacional de la estructura, no sólo por la información que aporta en sí misma, sino por su aptitud para relacionar los resultados con modelos matemáticos.

- Sin embargo, cuando los movimientos tienen un origen, diferente del higrométrico y son de elevada magnitud en comparación con estos últimos, la monitorización permite una detección temprana y el análisis de las posibles causas, pudiendo adoptarse, si fuera necesario, medidas urgentes y valorar su eficacia.

- Al igual que sucede con el resto de variables ambientales y tal y como se establece con anterioridad en las conclusiones, para discriminar posibles movimientos de origen térmico respecto de otros orígenes, el



periodo de medida mínima debe ser un año natural, siendo recomendable con carácter general la ampliación de dicho periodo de medición.

- Adquiere notable valor la información de las tendencias generales de movimiento de la estructura.
- En las mediciones llevadas a cabo en edificios en los que se han controlado movimientos durante años sucesivos se han observado que tras un año natural de medida, habitualmente la situación no es totalmente la misma que al inicio del control, sino que existe una pequeña amplitud de movimiento que habitualmente no es recuperable. A pesar de que no es una medida relevante en un único ejercicio, dicho fenómeno se repite en sucesivos ciclos, pudiendo generar lesiones asociadas al comportamiento térmico del edificio.
- En aquellos casos en los que se vaya a proceder a una intervención en la estructura o en sus proximidades, el seguimiento de sus movimientos constituye una herramienta que aporta información valiosísima para valorar su incidencia en el patrimonio construido y permitir la adopción de medidas urgentes para garantizar su integridad estructural.

En relación con aspectos referentes a los sistemas de transmisión wireless:

- El desarrollo de este tipo de tecnologías permite a los usuarios interactuar con el sistema, no sólo para ver los datos recogidos, sino también para modificar su comportamiento y así ajustarlo a los dinámicamente cambiantes requisitos.
- En comparación con los sistemas de cable, la tecnología wireless se caracteriza por su fácil instalación, su rentabilidad y su perfecta adecuación para monitorizar estructuras de carácter histórico debido a su mínimo impacto estético.
- Son capaces de operar de manera autónoma y a largo plazo bajo el control y la programación remota.
- Pueden ser personalizados para la adquisición y análisis de parámetros físicos sofisticados como tensión, deformación, inclinación, contenido de sal y humedad en el interior de los materiales, vibración...



- Ofrecen una configuración flexible de la recopilación y transmisión de datos según la tarea en cuestión.
- Es preciso tener en cuenta que la monitorización inalámbrica debe ser configurada, probada y calibrada con gran cuidado para asegurar resultados fiables y útiles.
- Las redes inalámbricas de sensores (WSN) han resultado ser un método efectivo y económico para recoger las respuestas de aceleración que se pueden utilizar a través del análisis modal para identificar posibles daños estructurales. Así, los algoritmos del análisis modal se utilizan para extraer las propiedades modales de las respuestas de aceleración recogidos en una estructura por medio de sensores.
- El pequeño tamaño de los distintos componentes, la ausencia de cables, el bajo consumo y un mantenimiento reducido, convierte a este sistema en la solución ideal para edificios histórico/artísticos que deben mantener su apariencia y funcionalidad mientras se lleva a cabo la monitorización. De igual manera, se trata de la solución más robusta cuando simultáneamente se llevan a cabo trabajos de restauración o modificación de dichos edificios.

En base a la información analizada sobre la tecnología de la fibra óptica:

- Los sistemas de monitorización por medio de fibra óptica presentan múltiples ventajas, tales como:
 - a) Posibilidad de llevar a cabo medidas estáticas y dinámicas con los mismos sensores.
 - b) Capacidad de un amplio rango de medida.
 - c) Facilidad en el montaje.
 - d) Facilidad para la compensación térmica de los sensores.
 - e) No se ven afectados por interferencias / campos electromagnéticos.
 - f) No requieren amplificadores de señal ni acondicionadores externos.
 - g) Posibilidad de colocar muchos sensores en un cable (conexión de sensores en serie).



h) Larga vida útil de los sensores.

i) Seguridad intrínseca debido a la ausencia de señales eléctricas.

- Uno de los aspectos objeto de mayor número de investigaciones no es otro que la transferencia de deformaciones hacia la fibra óptica, como consecuencia fundamentalmente del encapsulado propuesto y de la interacción existente entre el sensor y la estructura monitorizada. Dichas investigaciones son todavía escasas. Sin embargo, resultan fundamentales en todos aquellos sistemas de sensores basados en tecnologías de fibra óptica, pues la omisión de este aspecto puede traer consigo algunas consideraciones incorrectas o poco exactas, tales como:

a) Adopción de la deformación medida por el sensor como la deformación real de la estructura.

b) Calibración de los sensores únicamente en base a resultados experimentales.

c) Inexistencia de modelos teóricos que reproduzcan el comportamiento de los sensores ópticos ante una variación de cualquier parámetro que pueda influir en su fabricación o instalación en la estructura a monitorizar.

- Otro aspecto objeto de investigaciones es la integración de la fibra óptica en su encapsulado y la afección que ésta presenta sobre la señal del sensor. En este sentido se plantean dos opciones. Aquella que estudia las causas que provocan una distorsión en la forma de la señal para evitar su aparición y otra que cuantifica dicha distorsión y evalúa el modo en que ésta afecta los resultados obtenidos.

- Dada la importancia de la relación entre el sensor y la estructura, en la fibra óptica el sensor ha de estar lo más pegado posible a la superficie de la estructura monitorizada, algo en lo cual dos aspectos merecen especial atención:

a) El espesor de la capa de material que envuelve el sensor y se interpone entre éste y la estructura.

b) Las propiedades mecánicas del material adhesivo utilizado.

- Tal y como queda demostrado, la fibra óptica es un sistema de monitorización óptimo para el conocimiento y/o el seguimiento de la salud de una estructura, mediante la incorporación de un "sistema



nervioso" a aquellos elementos que lo requieran y la transmisión a través de la fibra óptica de los daños relacionados con deformaciones, temperatura, vibraciones...

- Como sistema de monitorización continua es resistente al aguijón a la corrosión, y soslaya problemas de interferencias electromagnéticas y corrientes parásitas.
- Para controlar al "paciente" cuando hacemos operaciones de reparación o sustitución, o para controlar variables de elementos que se encuentran en laboratorios es también un utensilio adecuado.
- Para el diagnóstico de enfermedades estructurales , dando peso a cada una de las causas que pueden producir un daño, la fibra óptica convenientemente situada para captar las distintas acciones en sus puntos más sensibles, es una herramienta que permite validar los modelos estadísticos basados en la modelización, a partir de la instrumentación de las principales variables que definen.

En lo que respecta a los sensores de medida de la corrosión de las armaduras:

- La introducción de pequeños sensores en el interior o en la superficie del hormigón puede ser considerado como uno de los desarrollos más prometedores para la monitorización a largo plazo del comportamiento de las estructuras de hormigón.
- Incluso cuando los parámetros como el potencial de corrosión o la resistividad del hormigón son útiles para la determinación del estado de corrosión de la estructura, el proceso de corrosión sólo puede ser cuantificado por la medición de la velocidad de corrosión, I_{corr} .
- Debido a la variación que la velocidad de corrosión I_{corr} presenta en estructuras reales expuestas al medio ambiente, es necesario establecer una metodología para determinar el valor representativo de la velocidad de corrosión obtenida en una estructura.





7 . ANEXOS



7.1. Encuesta realizada para conocer el grado de conocimiento de la población sobre la temática abordada: **Tablas y gráficos con los resultados obtenidos**

7.1.1. PREGUNTAS PLANTEADAS EN LA ENCUESTA

Número total de personas encuestadas: 86

1. ¿Conoce lo que es la monitorización?

- a) Si (15)
- b) No (71)

2. En caso afirmativo, indique la razón por la que conoce sobre esta técnica.

- a) Ámbito académico (12)
- b) Ámbito laboral (0)
- c) Otros (3)

3. En caso negativo, ¿con qué disciplina asociaría dicha técnica?

- a) Ingeniería (11)
- b) Medicina (40)
- c) Ambas (20)

4. ¿Conoce algún ejemplo de monitorización?

- a) Si (8)
- b) No (78)

5. En caso afirmativo, ¿asociado a qué disciplina?

- a) Ingeniería (1)
- b) Medicina (4)
- c) Ambas (3)



6. ¿Sabría definir de forma rápida e intuitiva lo que es el patrimonio cultural?

a) Si (63)

b) No (23)

7. ¿Conoce las diferentes formas de patrimonio cultural existentes?

a) Si (4)

b) No (82)

8. ¿Considera que los esfuerzos por proteger el patrimonio son suficientes?

a) Si (19)

b) No (67)

9. En caso negativo, ¿cual cree que es la razón?

a) Legislación y aspectos económicos (29)

b) Falta de interés por parte de la sociedad (15)

c) Falta de información y concienciación en la sociedad (18)

d) Otros (5)

10. ¿Conoce algún ejemplo de patrimonio que se haya perdido como consecuencia de una falta de conservación?

a) Si (33)

b) No (53)

11. ¿Cree usted que existe algún tipo de relación entre la monitorización y la conservación del patrimonio cultural?

a) Si (17)

b) No (69)

12. En caso afirmativo, ¿considera que el desarrollo de la monitorización puede contribuir de manera efectiva a la conservación de patrimonio?



a) Si (14)

b) No (3)

13. ¿Qué precio estaría dispuesto a pagar para conservar el patrimonio que le rodea?

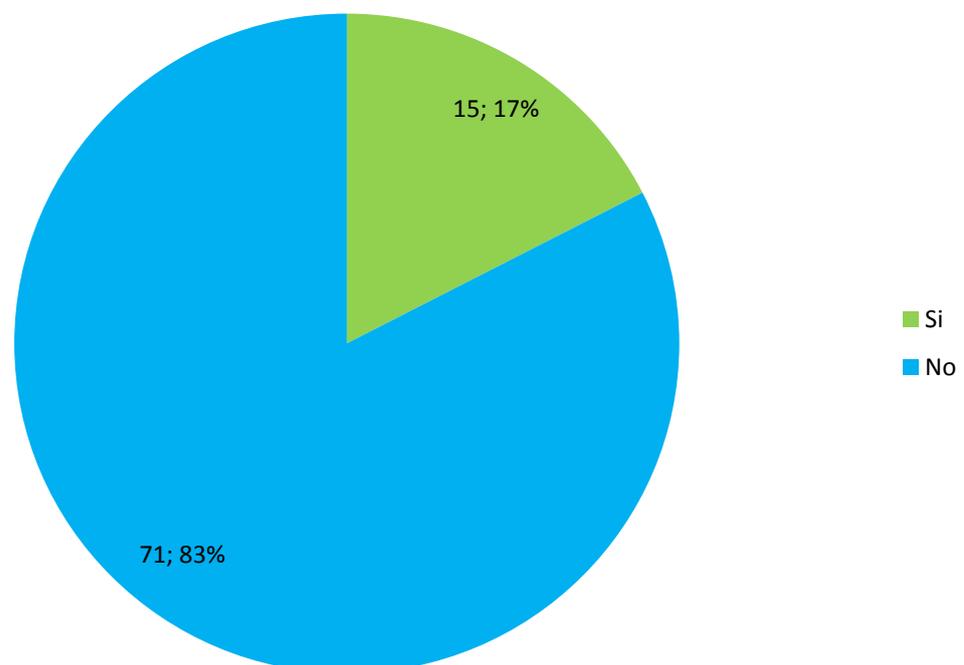
a) Alto (31)

b) Medio (52)

c) Ninguno (3)

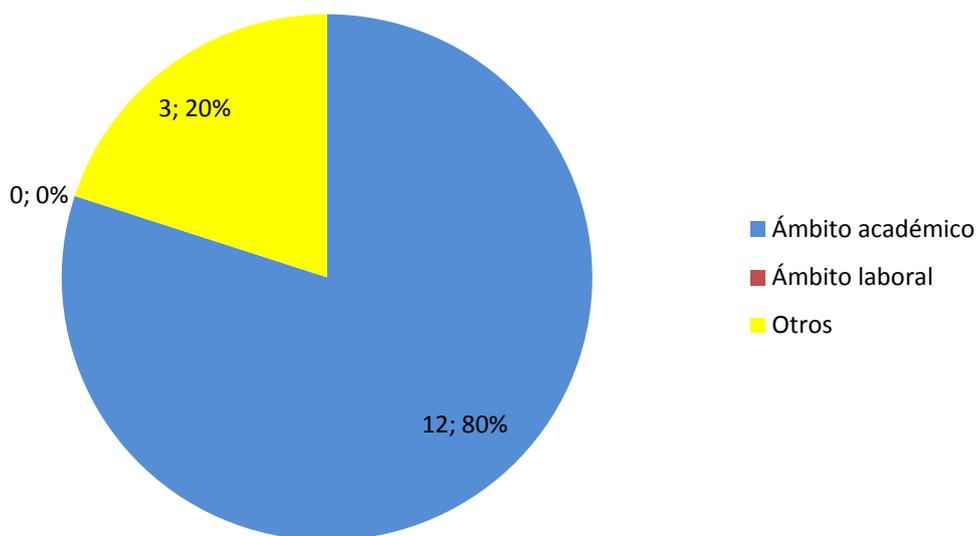
7.1.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA ENCUESTA: PRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS MISMOS

¿Conoce lo que es la monitorización?

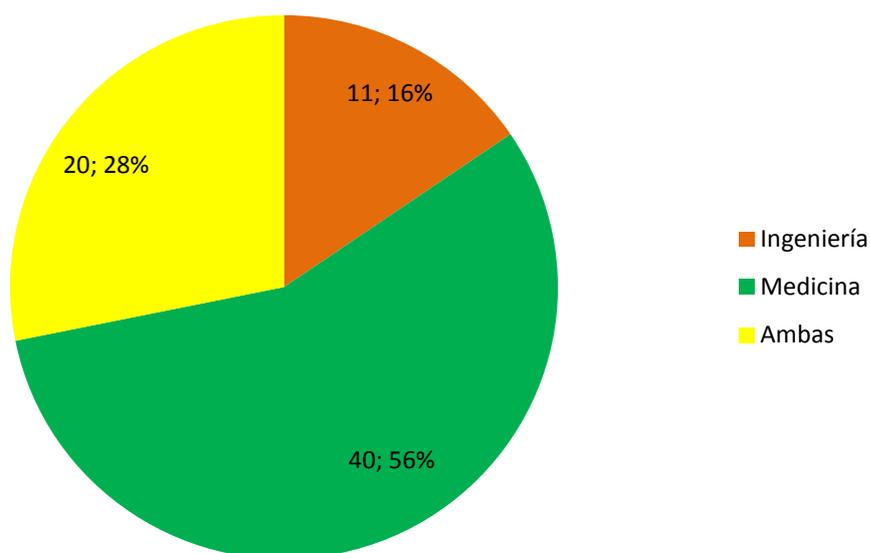




2. En caso afirmativo, indique la razón por la que conoce sobre esta técnica.

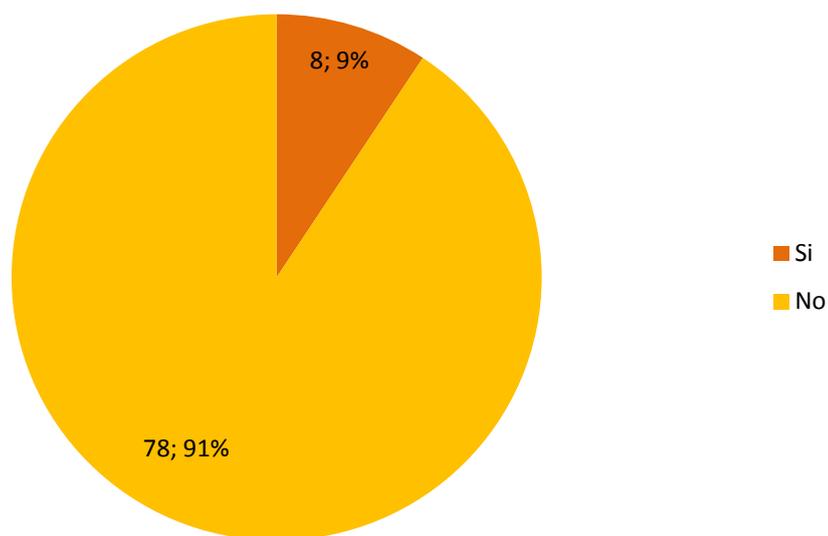


3. En caso negativo, ¿con qué disciplina asociaría dicha técnica?

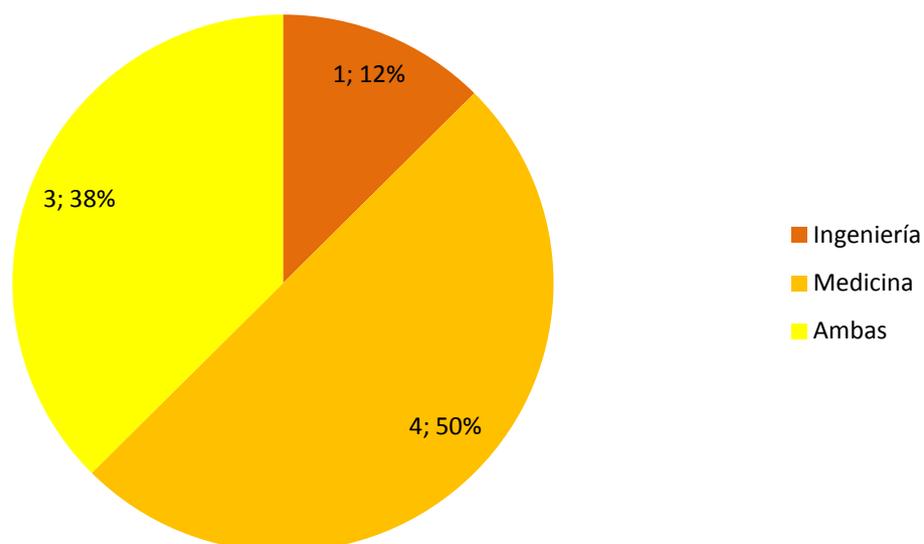




4. ¿Conoce algún ejemplo de monitorización?

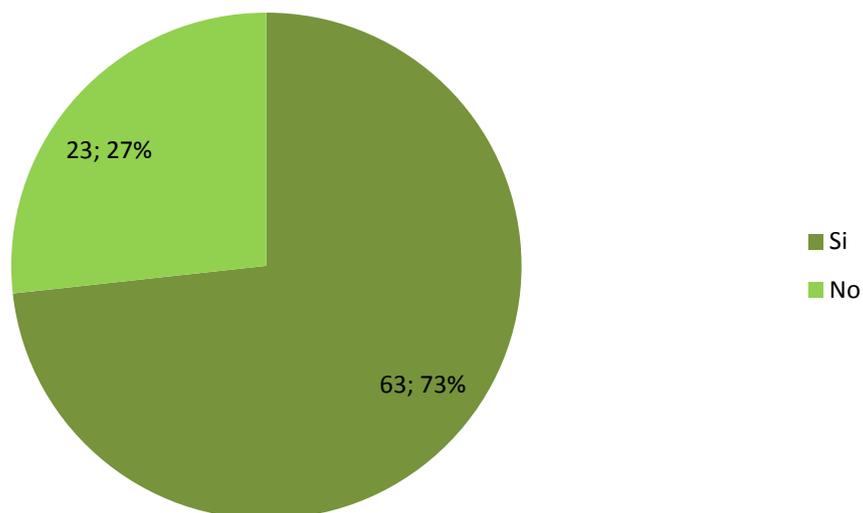


5. En caso afirmativo, ¿asociado a qué disciplina?

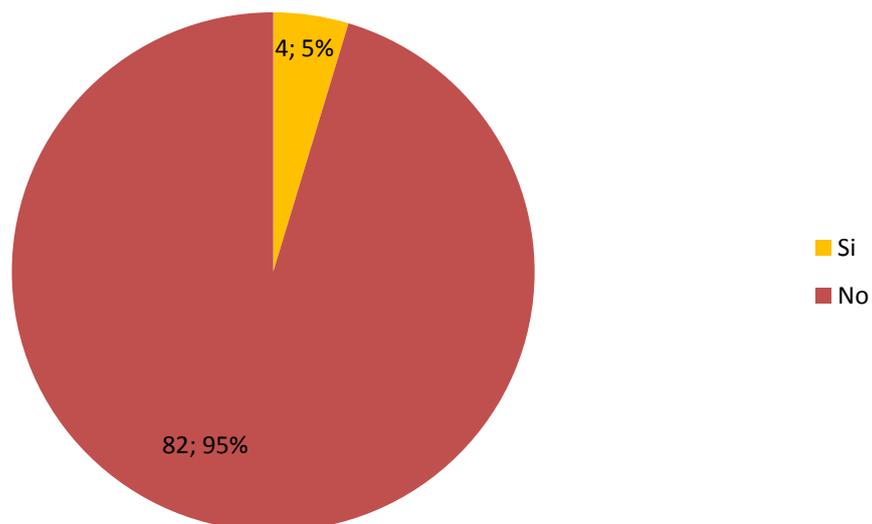




6. ¿Sabría definir de forma rápida e intuitiva lo que es el patrimonio cultural?

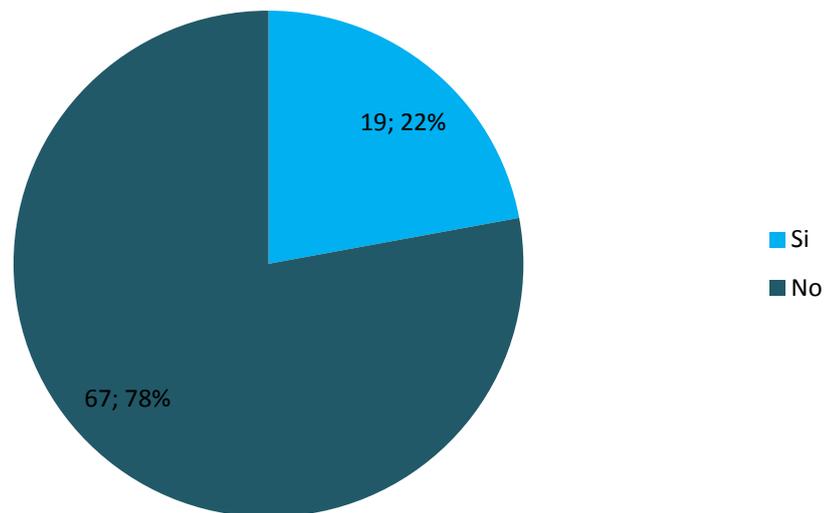


7. ¿Conoce las diferentes formas de patrimonio cultural existentes?

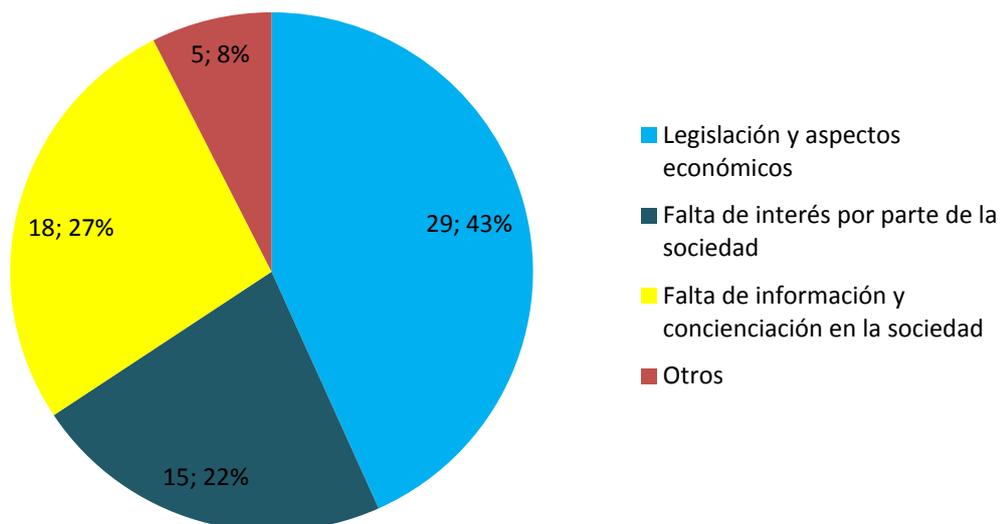




8. ¿Considera que los esfuerzos por proteger el patrimonio son suficientes?

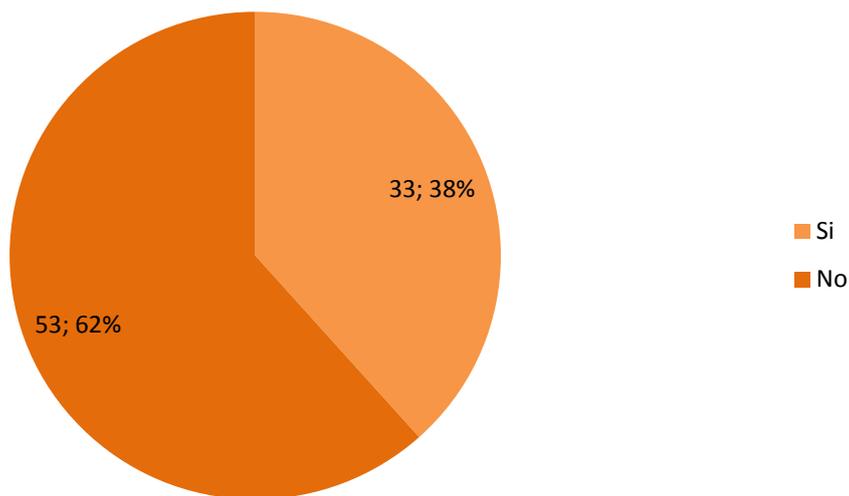


9. En caso negativo, ¿cual cree que es la razón?

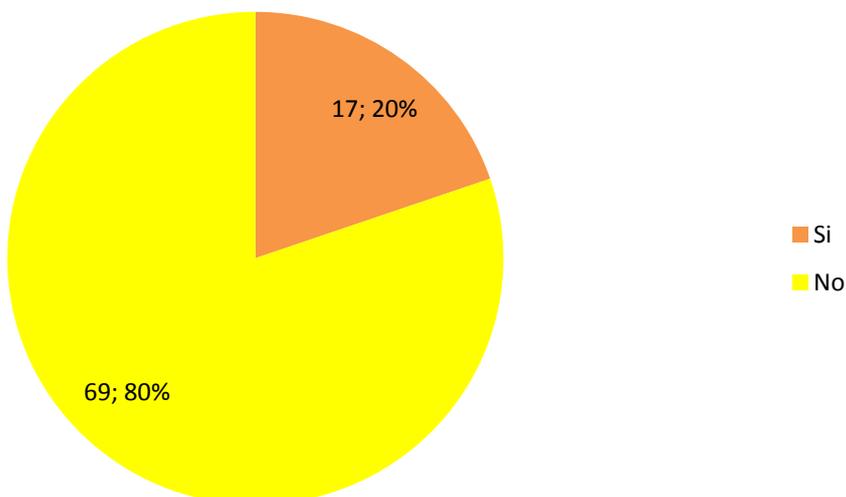




10. ¿Conoce algún ejemplo de patrimonio que se haya perdido como consecuencia de una falta de conservación?

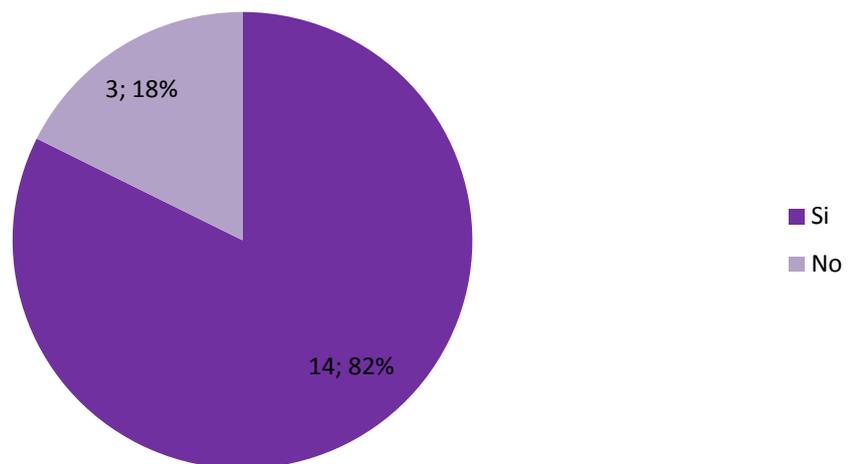


11. ¿Cree usted que existe algún tipo de relación entre la monitorización y la conservación del patrimonio cultural?

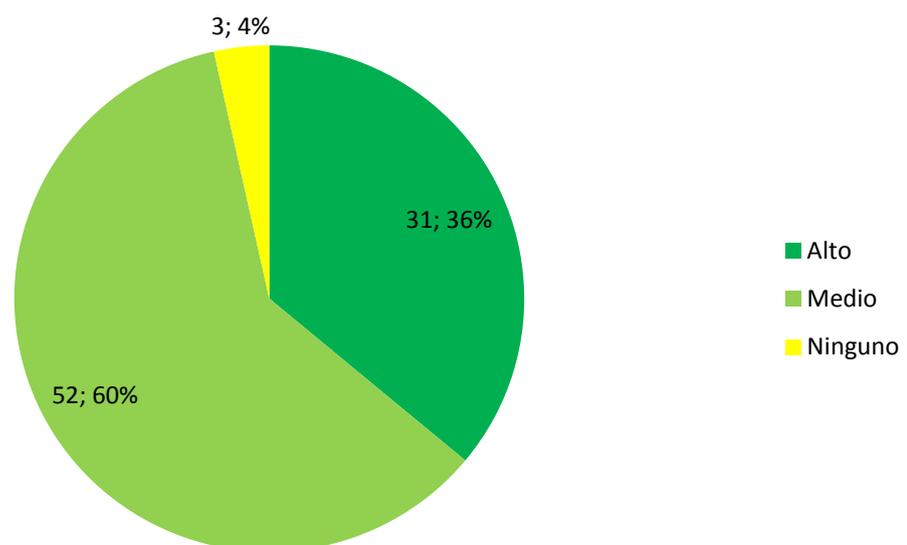




12. En caso afirmativo, ¿considera que el desarrollo de la monitorización puede contribuir de manera efectiva a la conservación de patrimonio?



13. ¿Qué precio estaría dispuesto a pagar para conservar el patrimonio que le rodea?





7.2. Encuesta para discernir la importancia de la ejecución de estudios previos a la fase de proyecto y obra, en relación con la intervención en construcciones existentes

Estimado amigo, con la intención de tratar de ser conscientes de la importancia de los estudios previos a la fase de proyecto y obra (geotécnicos, caracterización de materiales, evaluación de capacidad resistente, problemas de humedades, etc.), en términos de un mejor ajuste de la inversión económica y del tiempo empleado, en relación con la intervención en construcciones existentes, le hacemos llegar esta breve encuesta a cumplimentar por cada edificio / construcción en que se ha intervenido.

Los resultados, una vez analizados, serán empleados en un proyecto fin de grado y constituirán el punto de partida de una investigación más profunda a realizar entre la ANERR y la Universidad de Cantabria. Los resultados serán ANÓNIMOS.

DATOS DE LA EMPRESA:

NOMBRE DE EMPRESA	
WEB	
E-MAIL	
TELÉFONO	

DATOS DE LA CONSTRUCCIÓN INTERVENIDA:

EMPLAZAMIENTO (Población y provincia)				
TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA (Marcar con una X en la casilla correspondiente)				
Muros de carga de ladrillo y forjados de madera	Muros de carga de piedra y forjados de madera	Estructura de hormigón armado	Estructura metálica	Otra tipología (indicar cuál)
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (€)				
PLAZO BASE DE EJECUCIÓN (meses)				
EXISTENCIA DE ESTUDIOS PREVIOS (Marcar con una X en la casilla correspondiente)				
Inexistentes	Existentes, pero de poco calado orientados a aspectos muy concretos	Existencia de estudios previos detallados de todo el edificio/construcción		
PRESUPUESTO FINAL DE EJECUCIÓN (€), incluyendo modificados o proyectos asociados				
PLAZO FINAL DE EJECUCIÓN (meses)				

OPINIÓN ACERCA DE LA IMPORTANCIA DE LOS ESTUDIOS PREVIOS EN INTERVENCIONES DE REHABILITACIÓN DE CONSTRUCCIONES EXISTENTES:

--



7.3. Tablas y gráficos comparativos de sensores

7.3.1. GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

7.3.1.1. TABLA COMPARATIVA GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Número	Número de pieza del fabricante	Fabricante	Descripción	Precio unidad (Dólares)	Serie	Rango de deformaciones	Resistencia (Ohms)	Tolerancia de resistencia	Tipo de patrón	Longitud - activa (mm)	Longitud - patrón general (mm)	Longitud - total (mm)	Ancho - activo (mm)	Ancho - patrón general (mm)	Ancho - total (mm)	Temperatura de funcionamiento (°C)
1	CEA-06-125UN-350	Micro-Measurements (Division of Vishay Precision Group)	STRAIN GAUGE 350OHM LINEAR 1=5PS	51.73	CEA	±5%	350	±0.3%	Lineal	3.18	6.99	9.7	2.54	3.05	4.8	-75 ~ 175
2	CEA-06-250UW-350	Micro-Measurements (Division of Vishay Precision Group)	STRAIN GAUGE 350OHM LINEAR 1=5PC	63.42	CEA	±5%	350	±0.3%	Lineal	6.35	11.43	14.0	4.57	4.57	6.9	-75 ~ 175



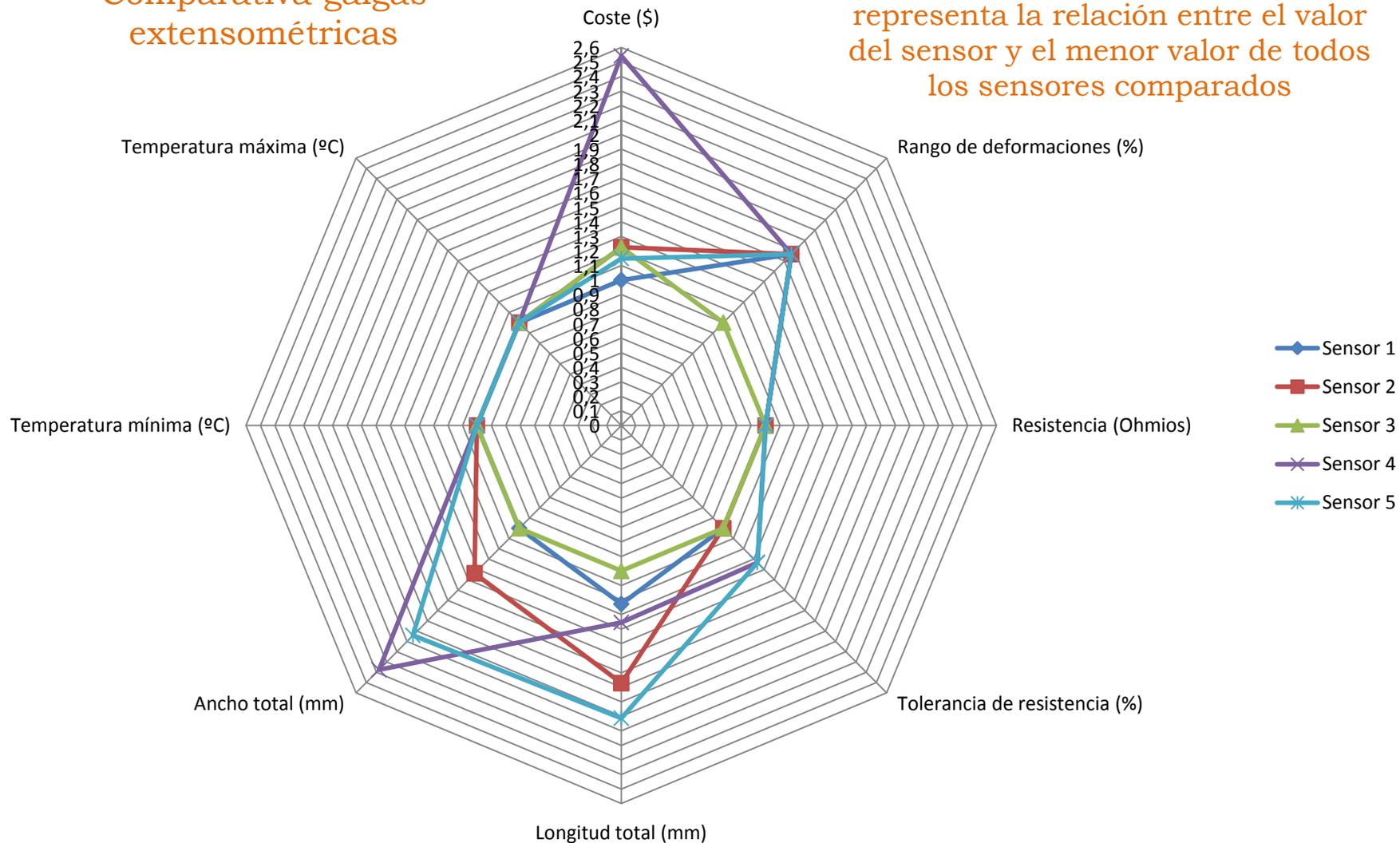
3	CEA-06-062UW-350	Micro-Measurements (Division of Vishay Precision Group)	STRAIN GAUGE 350OHM LINEAR 1=5PC	63.42	CEA	±3%	350	±0.3%	Lineal	1.57	5.59	7.9	3.05	3.05	4.8	-75 ~ 175
4	CEA-06-125UT-350	Micro-Measurements (Division of Vishay Precision Group)	STRAIN GAUGE 350 OHM TEE 1=5PC	131.46	CEA	±5%	350	±0.4%	Tee Rosette	3.18	8.26	10.7	4.19	9.27	11.4	-75 ~ 175
5	CEA-06-187UV-350	Micro-Measurements (Division of Vishay Precision Group)	STRAIN GAUGE 350 OHM SHEAR 1=5PC	59.42	CEA	±5%	350	±0.4%	Shear/Torque	4.75	14.22	15.9	3.81	8.13	9.8	-75 ~ 175



7.3.1.2. GRÁFICA COMPARATIVA GALGAS EXTENSOMÉTRICAS

Comparativa galgas extensométricas

Nota: Cada uno de los parámetros representa la relación entre el valor del sensor y el menor valor de todos los sensores comparados





8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



Antonacci, Gattulli, Martinelli, Vestroni, *“Analisi del comportamento dinamico della Basilica di Collemaggio per il progetto di un sistema di monitoraggio.”*

Alberto Bonetto *“Sviluppo e applicazione di algoritmi per l’identificazione dinamica e il rilevamento del danno delle strutture civili”*. Università degli studi di Padova, prof. Marco Modena

Adrian T.G. Radulescu, Gheorghe M.T. Radulescu, Romania and Vassilis Gikas, Greece, *“Structural Monitoring Handbook - stating the defining direction”*

Colombo, Marana, Galbusera, *“Monitoraggio di strutture con tecnologia GNSS”*

CheeKian Teng, *“Structural Health Monitoring of a Bridge Structure Using Wireless Sensor Network”*

Daniel Balageas, Claus-Peter Fritzen, Alfredo Güemes, *“Structural Health Monitoring”*, ISTE Ltd, 2006.

De Stefano, Ceravolo, Matta, *“Identificazione dinamica sperimentale di edifici strategici sotto sisma.”*

Fabbrocino, Rainieri, Manfredi, Cosenza *“Protezione sismica di edifici strategici e monitoraggio strutturale: applicazione all’Edificio centrale della Facoltà di Ingegneria di Napoli.”*

Fabbrocino, Rainieri, Verderame, Manfredi *“La valutazione della risposta dinamica nel progetto di rinforzo sismico della Torre delle Nazioni, Mostra d’Oltremare.”*

Fiore, Porco, *“Formulazione inversa per verifica strutturale mediante tecniche di acquisizione in campo dinamico.”*

Fabbrocino, Rainieri, Verderame, *“L’analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti”*

Fundación Iberdrola, <http://www.fundacioniberdrola.org/>

Gentile, Saisi, Xu, *“Dynamic monitoring and seismic assessment of a historic masonry tower”*

G.Anastasi, G. Lo Re, M. Ortolani, *“WSNs for structural health monitoring of historical buildings”*



Giuseppe Anastasi, Giuseppe Lo Re, and Marco Ortolani, “WSNs for Structural Health Monitoring of Historical Buildings”

Icomos, <http://www.icomos.org/>

J. Maeck, B. Peeters, G. De Roeck, “Damage identification on the Z24 bridge using vibration monitoring”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, June 2001.

Jacob Fraden, “*Handbook of modern sensors Physics, Designs, and Applications*”, Fourth Edition

Jingcheng Zhang, “A remote monitoring and control system for cultural heritage buildings utilizing wireless sensor networks”

Matteo Redaelli, “Analisi modale operativa per il monitoraggio di grandi strutture civili: il caso dello stadio Meazza di Milano”, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, AA 2004-2005.

Mannara, Ciancia, Barbati, “*L’indagine dinamica sul Campanile della Chiesa del Carmine (NA): metodi, finalità e sviluppi*”

Mannara, Cianci, Barbati, “*Sistema innovativo basato su sensori accelerometrici MEMS per l’individuazione e l’evoluzione di uno stato fessurativo su strutture in muratura*”

Matteo Redaelli, “Analisi modale operativa per il monitoraggio di grandi strutture civili: il caso dello stadio Meazza di Milano”, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, AA 2004-2005.

Mohst, <http://www.mohst.es/>

Nicoletta Zuccheri “*Monitoraggio sismico e identificazione con sensori MEMS di un edificio della protezione civile*” Tesi di laurea, Università di Bologna, prof. Marco Savoia

Ramòn, Pallàs, Areny, “*Sensores y acondicionadores de señal*” Cuarta edición

Roctest Group, <http://www.roctest-group.com/>

Spinelli “*Il controllo dinamico delle strutture: dalle esperienze di Padre Alfani sulla Torre di Palazzo Vecchio alle attuali tecniche di monitoraggio a distanza*”

Santa María la Real, <http://www.santamarialareal.org/>



Shm, <http://www.shmlive.com/>

Samco, <http://www.samco.org/>

Structurae, <http://structurae.info/>

Saurabh S. Bisht, *“Methods for structural health monitoring and damage detection of civil and mechanical systems”*

Unesco, <http://whc.unesco.org/>

Victor GIURGIUȚIU, *“Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors – predictive modeling and simulation”*