

MONOGRAFÍA **36**

M

**MONITORIZACIÓN
Y EVALUACIÓN
DE LA SEGURIDAD DE
ESTRUCTURAS EXISTENTES
DE HORMIGÓN ARMADO**

Grupo de Trabajo 4/6
Monitorización estructural
Comisión 4 “Uso y mantenimiento”

Aunque la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE) ha hecho un gran esfuerzo por asegurar que toda la información contenida en este documento es correcta y precisa, ACHE, sus miembros y sus trabajadores no aceptan responsabilidad alguna por daños y/o perjuicios de cualquier clase que pudiera originar el uso y aplicación del contenido de esta publicación. Las publicaciones de ACHE están redactadas para ser utilizadas por técnicos con capacidad para evaluar su contenido y por tanto cada lector asume la responsabilidad del uso de la información incluida en el presente documento. Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse o distribuirse de ninguna forma, ni por ningún medio sin la previa autorización por escrito de ACHE.

Edita: ACHE (Asociación Española de Ingeniería Estructural)

I.S.B.N. 978-84-89670-90-7

Trabajos editoriales: CINTER Divulgación Técnica

Prólogo

Es una gran satisfacción poder presentar esta Monografía, organizada conjuntamente por ACHE y AUSIGETI (Asociación Nacional de Auscultación y Sistemas de Gestión Técnica de Infraestructura), que recoge una traducción del Boletín nº 22 de la FIB “Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures”.

Este documento, aunque tiene ya algo más de quince años de edad, goza de plena actualidad tanto en muchos de sus contenidos como en su propia esencia, la monitorización de estructuras. Los avances en las técnicas de modelización del comportamiento estructural no se contraponen a la necesidad de una adecuada monitorización de las estructuras. Al contrario, las técnicas de auscultación abren nuevos campos y perspectivas, tanto para la validación de los modelos, como para permitir una gestión adecuada del patrimonio construido en el cual las estructuras son una parte clave.

Además, las técnicas de tratamiento de grandes cantidades de información (*big data*) actualmente en imparable desarrollo, conducirán en un futuro, quizás más próximo de lo que pensamos, a una reflexión crítica sobre aspectos como, por ejemplo, el comportamiento estructural, y las acciones directas (sobrecargas de uso, viento, etc.) e indirectas (retracción, temperatura, ...), que pueden hacer cambiar profundamente los criterios tanto de diseño como de reparación y mantenimiento.

El documento servirá además como elemento de referencia para el análisis de la evolución de las técnicas de auscultación a lo largo del presente siglo XXI.

Es de destacar la ingente labor del equipo de la FIB que realizó el documento, para sintetizar en un documento el estado del arte con algunas aportaciones en su tiempo novedosas, y para exponer ejemplos de aplicación de las técnicas de auscultación. Pero sin duda es igualmente destacable el esfuerzo del Grupo de Trabajo de ACHE, extraordinariamente coordinado por Ignacio Pulido, en una traducción ciertamente compleja en muchos de sus aspectos, y que sin la especialización y el esfuerzo de sus miembros no habría sido posible. No ha sido objeto de su trabajo, y es importante destacarlo, el valorar críticamente su contenido.

Por todo ello quiero aprovechar felicitar al Grupo de Trabajo y en particular a sus coordinadores, y agradecer la aportación de AUSIGETI, cuya colaboración recíproca con ACHE en la preparación del documento que ahora tiene en sus manos puede ser ejemplo para futuros Grupos de Trabajo.

Raúl Rodríguez Escribano

Presidente de la Comisión 4 “Uso y Mantenimiento” de ACHE

Monografía

Presentación

Los países desarrollados, en el momento actual, tienden a tener un patrimonio de infraestructuras, en general maduro y con pocas necesidades de grandes desarrollos, pasando a ser la actividad de la conservación, seguimiento y análisis de las mismas un aspecto fundamental para garantizar el nivel de desarrollo y de movilidad que tanto ha costado conseguir.

En este sentido, se quiere destacar la importancia que dentro de ese trabajo de conservación de las infraestructuras supone la monitorización y el seguimiento e interpretación de las estructuras, permitiendo conocer y determinar parámetros fundamentales para verificar el adecuado comportamiento de las mismas.

En general, casi todas las administraciones poseen un sistema de gestión de infraestructuras, en el que se planifica la realización de una serie de inspecciones periódicas, inspecciones principales, en las que técnicos cualificados realizan una inspección minuciosa de las estructuras y, en función del número, gravedad y alcance de los daños, se otorga una marca de condición. Este trabajo, si bien permite realizar un importante filtro de las estructuras con daños o patologías aparentes, entendemos que debería complementarse, especialmente en aquellas infraestructuras con daños o deterioros previamente detectados o en el caso de las grandes infraestructuras (presas, túneles, puentes, etc), mediante un sistema de instrumentación en continuo que permita realizar el seguimiento pormenorizado de dicha infraestructura en el tiempo.

Dicha instrumentación, junto con la adecuada interpretación de los resultados, permite conocer y determinar, con una muy alta precisión, tanto posibles fallos o anomalías en el comportamiento de la misma, al tiempo que, bien planteada, permite conocer con precisión el comportamiento de la misma en el tiempo y, con ello, ser capaces de detectar posibles evoluciones inesperadas y, con ello, adoptar las medidas correctoras necesarias.

Hoy en día, y gracias al gran avance tecnológico sufrido en los últimos 10-15 años, podemos hablar de sencillos sistemas de monitorización y diagnóstico en tiempo real, con una precisión y coste más que adecuados.

La traducción de la monografía de la FIB-22 "Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures" surgió dentro del seno de la Asociación Nacional de Auscultación y Sistemas de Gestión Técnica de Infraestructuras, en adelante Ausigeti, donde grandes profesionales comenzaron el trabajo que, por circunstancias ajenas, tuvieron que abandonar dicha asociación, continuándose la tarea en un grupo mixto entre la Asociación Española de Ingeniería Estructural, en adelante ACHE. Sin querer menospreciar a ninguno de los colaboradores que han trabajado en la monografía, especial atención merecen D. Justo Carretero Pérez y D. Jorge Ley Urzáiz, quienes de alguna forma, puedo decir que han sido los propulsores y alma del grupo de trabajo durante mucho tiempo, hasta

que yo, mismo, D. Ignacio Pulido Sánchez, ya dentro del seno de ACHE, cogí el relevo como Coordinador del grupo de trabajo. También he de reconocer el enorme esfuerzo realizado por D. Raúl Rodríguez Escribano, actual presidente de la comisión 4 de ACHE, “Uso y mantenimiento”, en la fase final del documento.

La traducción llevada a cabo, no tiene más objeto que el dar a conocer a todos los profesionales y administraciones ligadas al desarrollo y, especialmente, al mantenimiento de las infraestructuras, las grandes e importantes herramientas que brinda la monitorización y seguimiento de las estructuras en su importante tarea de conservación y mantenimiento.

Sin más, me gustaría agradecer a todo el grupo y colaboradores la posibilidad, a la vez que responsabilidad, de haber podido colaborar y llevar a buen puerto la presente monografía, al mismo tiempo que les agradezco su participación, dedicación y conocimiento.

D. Ignacio Pulido Sánchez

Coordinador principal del grupo de trabajo 4/6 de ACHE

Grupo de Trabajo

4/6 “Monitorización Estructural”

Coordinadores: Ignacio Pulido, *IDEAM*

AUSIGETI/ACHE Jorge Ley, *INTEMAC*

Justo Carretero, *INECO*

Miembros: Javier León González, *FHECOR*

Gregorio Torres, *OFITECO*

Jesús Sanz Jiménez, *EMPÍRICA*

Moisés Izquierdo, *TORROJA INGENIERÍA*

Andrés Vicente Zapata, *IIC*

Julio Casal, *GEOCISA*

Índice

1	INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE MONITORIZACIÓN Y A LA EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD DE ESTRUCTURAS EXISTENTES DE HORMIGÓN	11
1.1	DEFINICIONES	13
1.2	EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD	15
1.2.1	Método del índice de fiabilidad	18
1.2.2	Métodos de simulación	19
1.3	CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	19
1.3.1	Interacción coste-fiabilidad	21
1.4	CONCEPTOS TÉCNICOS Y DE PRESTACIÓN	23
1.4.1	Métodos de ensayo típicos para estructuras de hormigón	24
1.4.2	Niveles de prestación	25
1.5	REFERENCIAS	25
2	ESTRUCTURAS Y MATERIALES	27
2.1	SISTEMAS ESTRUCTURALES	27
2.1.1	EDIFICIOS	27
2.1.2	PUENTES	30
2.2	ACCIONES	35
2.2.1	Cargas	35
2.2.2	Calibración del modelo de la carga de tráfico	37
2.3	PRUEBAS DE CARGA ESTÁTICAS	38
2.3.1	Comprobación de la Prueba de Carga	39
2.4	PRUEBAS DE CARGA DINÁMICA	44
2.4.1	Pruebas de Vibración Ambiente	45
2.4.2	Pruebas de Vibración mediante excitación forzada	48
2.5	RESISTENCIA DEL MATERIAL	51
2.5.1	Hormigón	51
2.5.2	Armadura	53
2.5.3	Tendones	56
2.6	REFERENCIAS	60
3	INSPECCIÓN VISUAL Y ENSAYOS <i>IN SITU</i> CONVENCIONALES	63
3.1	INSPECCIÓN PRINCIPAL	65
3.1.1	Inspección de Elementos de Hormigón	65
3.1.2	Inspección de elementos metálicos	67
3.2	INSPECCIÓN ESPECIAL	68
3.2.1	Resistencia a compresión	68
3.2.2	Resistencia del acero	72
3.2.3	Profundidad del frente carbonatado	73
3.2.4	Determinación del contenido en cloruros	74
3.3	REFERENCIAS	74

4 TÉCNICAS DE INSPECCIÓN MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)_____75

4.1	INSPECCIÓN DEL HORMIGÓN	76
4.1.1	Ensayos mediante radiografías	76
4.1.2	Eco de impulsos ultrasónicos	76
4.1.3	Método de la medida de la velocidad del impulso ultrasónico	78
4.1.4	Método Impacto-eco	79
4.1.5	Sistemas de imagen por termografía de infrarrojos	81
4.1.6	Georádar (Ground Penetrating Radar, GPR)	82
4.1.7	Monitorización de emisiones acústicas	83
4.2	DETECCIÓN DE ARMADURAS	85
4.2.1	Métodos electromagnéticos	87
4.2.2	Radiografía	88
4.2.3	Método Radar	90
4.2.4	Conclusiones sobre los métodos para la detección de armaduras	90
4.3	INSPECCIÓN DEL ACERO	91
4.3.1	Test de Penetración	91
4.3.2	Test de Partículas Magnéticas	92
4.4	REFERENCIAS	92

5 MÉTODOS DE MEDIDA_____95

5.1	GEOMETRÍA Y DIMENSIONES	95
5.2	DEFORMACIONES	95
5.2.1	Sensores mecánicos	97
5.2.2	Sensores eléctricos	99
5.2.3	Sensores de Fibra Óptica	106
5.2.4	Sistemas Hidrostáticos de Nivelación (HLS)	118
5.2.5	Mediciones Geodésicas	120
5.3	MEDIDA DE DEFORMACIONES	128
5.3.1	Deformaciones a corto plazo	129
5.3.2	Deformaciones a largo plazo	129
5.3.3	Medición de la deformación	130
5.4	MEDICIONES DE FUERZAS	148
5.4.1	Células de Carga	148
5.4.2	Medición de fuerzas en tirantes	150
5.4.3	Peso en movimiento (WIM)	153
5.4.4	Medición directa de la tensión	162
5.5	PARÁMETROS DINÁMICOS	167
5.5.1	Sensores de aceleración	167
5.6	MEDIDAS AMBIENTALES	169
5.6.1	Temperatura	169
5.7	MONITORIZACIÓN DE LA DURABILIDAD	175
5.7.1	Corrosión	175
5.8	REFERENCIAS	186

6	PROBLEMAS DE IMPLEMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS	189
6.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS MEDIDAS Y DE LOS SENSORES	190
6.1.1	Medidas de las señales eléctricas	192
6.1.2	Acondicionamiento de la señal	192
6.1.3	Consideraciones sobre el cableado y los ruidos	193
6.2	CUESTIONES RELACIONADAS CON LA INSTRUMENTACIÓN	195
6.3	HARDWARE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS	195
6.4	ADQUISICIÓN DE DATOS Y ORGANIZACIÓN	198
6.5	REFERENCIAS	200
7	EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN ESTADÍSTICA DE DATOS	201
7.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	201
7.1.1	Modelización de incertidumbres	202
7.1.2	Estimación de la media y la desviación estándar	204
7.1.3	Determinación de valores característicos	204
7.2	MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN	205
7.2.1	Optimización por programación cuadrática secuencial (Sequential Quadratic Programming, nlpql)	205
7.2.2	Evolución estratégica y algoritmos genéticos	207
7.2.3	Algoritmos genéticos	207
7.2.4	El método de Montecarlo	211
7.3	BASES DE DATOS	214
7.4	EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS DE DEFORMACIONES RELATIVAS	217
7.5	EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE MEDIDAS DE VIBRACIONES	221
7.5.1	Introducción general	221
7.5.2	La Función de Transferencia Compleja	221
7.6	REFERENCIAS	226
8	ANÁLISIS DEL SISTEMA	229
8.1	MODELIZACIÓN DEL SISTEMA	229
8.1.1	Análisis lineal y no lineal	230
8.1.2	Identificación estructural	232
8.2	SOPORTE A LA HORA DE DECIDIR ENTRE MÚLTIPLES MODELOS MECÁNICOS	241
8.2.1	Combinación de modelos y observaciones para el apoyo de decisiones	242
8.3	ESTADOS DE FIABILIDAD	247
8.3.1	Instante de la primera rehabilitación	248
8.3.2	Instante de la primera rehabilitación tras no mantenimiento	248
8.4	ANÁLISIS DE LA FIABILIDAD ESTRUCTURAL	249
8.4.1	Variables básicas	250
8.4.2	Enfoque clásico para una limitada Calidad de los Datos	252
8.4.3	Métodos bayesianos que incluyen conocimiento previo	253
8.4.4	Creación de la función de densidad	254
8.4.5	Visión general de las fiabilidades objetivo para el proyecto en estado límite último	254
8.4.6	Métodos de Análisis de Fiabilidad	256
8.5	REFERENCIAS	257

9 CONCLUSIONES	261
10 REFERENCIAS	263
11 ANEXO. CASOS ESTUDIADOS	271
11.1 PUENTE DE CARRETERA TUCKHUDE	272
11.1.1 Tarea	272
11.1.2 Estructura del puente	272
11.1.3 Realización de experimentos	273
11.1.4 Interpretación de las series temporales	274
11.1.5 Optimización	275
11.1.6 Parámetro libre	275
11.1.7 Resultados	276
11.1.8 Agradecimientos	277
11.2 ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN PARA IDENTIFICAR BUENOS MODELOS MECÁNICOS	278
11.2.1 Descripción del puente	278
11.2.2 Modelos del puente Lutrive	279
11.2.3 Algoritmo para encontrar las mejores soluciones en los espacios de soluciones	283
11.2.4 Análisis de resultados	284
11.2.5 Referencias	286
11.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN EXISTENTES	287
11.3.1 Análisis estocástico no lineal de un puente de hormigón pretensado	287
11.3.2 Conclusiones	293
11.3.3 Referencias	293
11.4 MONITORIZACIÓN A LO LARGO DE TODA LA VIDA ÚTIL DEL PUENTE VERSOIX	295
11.4.1 Resumen	295
11.4.2 Introducción	295
11.4.3 Monitorización de puentes a lo largo de toda su vida	296
11.4.4 Ejemplo de monitorización de toda la vida útil: el puente de Verxois	298
11.4.5 Conclusioones	300
11.4.6 Referencias	301
11.5 MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL Y EVALUACIÓN DEL VIADUCTO COLLE ISARCO (A22, ITALIA)	303
11.5.1 Introducción	303
11.5.2 Instrumentación	303
11.5.3 Deformación y desplazamiento	304
11.5.4 Control de la durabilidad	308
11.5.5 Adquisición de datos	311
11.5.6 Interpretación de los datos y modelización del sistema	312
11.5.7 Observaciones finales	313
11.5.8 Referencias	314
11.6 EVALUACIÓN DE TENDONES POSTESADOS ANTIGUOS	315
11.6.1 Introducción	315
11.6.2 Puentes examinados	315
11.6.3 Pruebas realizadas y resultados destacados	316
11.6.4 Conclusiones y perspectivas	319
11.6.5 Referencias	319

11.7	CLASIFICACIÓN DE PUENTES EN BASE A LA MONITORIZACIÓN DE VIBRACIONES AMBIENTALES	321
11.7.1	Resumen	321
11.7.2	Introducción	318
11.7.3	General	322
11.7.4	Pruebas de referencia	322
11.7.5	Evaluación de daños	324
11.7.6	Tarjetas de tendencia	324
11.7.7	Grabadora BRIMOS	325
11.7.8	Esquema de clasificación	326
11.7.9	Conclusiones	327
11.7.10	Referencias	328
11.8	MEJORA DEL FUNCIONAMIENTO DE GRANDES PUENTES MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS AVANZADAS	329
11.8.1	Motivación	329
11.8.2	Demostración en el puente del Comodoro John Barry	330
11.8.3	Conclusiones y recomendaciones	341
11.9	EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS HISTÓRICAS DE HORMIGÓN	343
11.9.1	Monumento George Rogers Clark	343
11.10	EVALUACIÓN DEL ESTADO DE UN PUENTE DE HORMIGÓN ARMADO DE CINCUENTA AÑOS	345
11.10.1	Descripción estructural	345
11.10.2	Objetivos	346
11.10.3	Inspección Visual	346
11.10.4	Mapeo del potencial de corrosión	347
11.10.5	Ensayos de materiales	348
11.10.6	Nuevo cálculo estático	350
11.10.7	Planteamiento de la restauración	351
11.10.8	Referencias	352
11.11	MONITORIZACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN MEDIANTE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA DE REJILLA BRAGG	353
11.11.1	Resumen	353
11.11.2	Introducción	353
11.11.3	Estructuras monitorizadas por el Laboratorio Magnel	354
11.11.4	Monitorización dinámica	356
11.11.5	Conclusiones	361
11.11.6	Agradecimientos	361
11.11.7	Referencias	361