



CURSO/GUÍA PRÁCTICA PUENTES Y VIADUCTOS PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL



Índice

¿QUÉ APRENDERÁ?	28
Introducción.	30
PARTE PRIMERA.	33
FUNDAMENTOS Y ALCANCE DE LOS PUENTES Y VIADUCTOS EN EL CICLO DE VIDA ESTRUCTURAL	33
Capítulo 1: Rol de los puentes y viaductos en las infraestructuras y en la gestión de la vida útil	33
1. Marco general de los puentes y viaductos en el sistema de infraestructuras	33
a. Definición de puente, viaducto, paso superior e inferior	33
b. Funciones estructurales y de servicio en redes viarias y ferroviarias	34
c. Importancia estratégica para la movilidad, la logística y la economía	35
d. Enfoque de ciclo de vida aplicado a puentes y viaductos	36
2. Clasificación funcional y estructural de puentes y viaductos	37
a. Clasificación según uso (carretera, ferrocarril, peatonal, mixtos, servicios)	37
b. Clasificación según material (hormigón, metálicos, mixtos, madera, otros)	38
c. Clasificación según esquema resistente (vigas, losas, arcos, atirantados, colgantes)	39
d. Implicaciones de la tipología en proyecto, inspección y monitorización	40
3. Ciclo de vida, durabilidad y contexto ambiental	41
a. Fases del ciclo de vida concepción, proyecto, construcción, explotación, intervención y demolición	41
b. Mecanismos de deterioro a lo largo del ciclo de vida	42
c. Influencia del ambiente marino, urbano, industrial, montaña, zonas frías o cálidas	42
d. Estrategias de diseño orientadas a la durabilidad.....	43
4. Gestión del riesgo estructural y operacional en puentes y viaductos	44
a. Concepto de riesgo y componentes probabilidad, consecuencia	44
b. Riesgos estructurales, geotécnicos, hidráulicos y operacionales	44
c. Niveles de servicio, seguridad y funcionalidad	45
d. Integración del riesgo en la gestión de la red de puentes.....	46
5. Estructuras singulares, estratégicas y críticas	46
a. Puentes y viaductos como infraestructuras críticas	46
b. Puentes de gran luz, especiales y de valor patrimonial	47
c. Redundancia estructural y robustez frente a eventos extremos.....	48
d. Implicaciones para inspección, SHM e intervención	48
6. Enfoque internacional España–Latinoamérica en puentes y viaductos	49
a. Diferencias de contexto normativo y de gestión entre países	49
b. Condicionantes climáticos, geográficos y de intensidad de tráfico	50
c. Madurez de los sistemas de gestión de puentes en distintas administraciones	50
d. Oportunidades de armonización metodológica y transferencia de buenas prácticas	51
Capítulo 2: Normativa, criterios de diseño y seguridad estructural aplicados a puentes y viaductos	52
1. Principios de seguridad estructural en puentes	52
a. Estados límite últimos y de servicio.....	52
b. Concepto de fiabilidad y coeficientes parciales	53

c. Redundancia, ductilidad y comportamiento en rotura	54
d. Compatibilización entre seguridad, servicio y coste	55
2. Panorama de normas y recomendaciones técnicas	56
a. Normas internacionales de referencia en diseño de puentes	56
b. Reglas generales aplicables a España y Latinoamérica	56
c. Recomendaciones y guías técnicas específicas de puentes y viaductos	57
d. Papel de las normas en inspección, SHM y refuerzo estructural	58
3. Acciones y combinaciones de carga en puentes	59
a. Acciones permanentes peso propio, equipos, rellenos	59
b. Acciones variables de tráfico, térmicas y de viento	59
c. Acciones accidentales impacto, incendio, sismo, explosiones	60
d. Criterios de combinación de acciones y casos de carga relevantes	61
4. Conceptos de durabilidad y requisitos de proyecto	61
a. Vida útil de proyecto y vida útil remanente	61
b. Exigencias de recubrimientos, impermeabilización y detalles constructivos	62
c. Protección frente a corrosión y ataques químicos	63
d. Relación entre requisitos de durabilidad y programas de monitorización	63
5. Documentación de proyecto e información para la explotación	64
a. Contenidos mínimos de un proyecto de puente y viaducto	64
b. Memorias, planos, pliegos y mediciones específicas de estructuras	64
c. Entregables para el gestor de la infraestructura	65
d. Trazabilidad documental para futuras inspecciones e intervenciones	65
6. Marco de responsabilidades y coordinación entre agentes	66
a. Promotor, proyectista, constructor, dirección facultativa y gestor	66
b. Responsabilidad en el diseño estructural y en las modificaciones	67
c. Coordinación durante proyecto, construcción y puesta en servicio	67
d. Papel de la ingeniería independiente, auditorías y revisiones externas	68
PARTE SEGUNDA	69
BASES DE PROYECTO DE PUENTES Y VIADUCTOS: TIPOS ESTRUCTURALES, GEOMETRÍA Y ANÁLISIS	69
Capítulo 3: Tipologías estructurales de puentes y viaductos y su impacto en la monitorización y la intervención	69
1. Puentes de vigas y losas	69
a. Vigas simplemente apoyadas y continuas	69
b. Losas macizas y aligeradas	70
c. Aplicación típica en pasos superiores e inferiores	71
d. Ventajas e inconvenientes para SHM e intervenciones futuras	71
2. Puentes de hormigón armado y pretensado	72
a. Esquemas habituales en vigas prefabricadas y in situ	72
b. Sistemas de pretensado pretensado y postensado	72
c. Distribución de armaduras y detalles sensibles	73
d. Particularidades de diagnóstico y refuerzo	74
3. Puentes metálicos y mixtos acero–hormigón	74
a. Puentes de vigas metálicas y cajones	74
b. Tableros mixtos y colaboraciones acero–hormigón	75
c. Nudos, soldaduras y uniones atornilladas	76

d. Comportamiento frente a fatiga y corrosión	76
4. Arcos, atirantados y colgantes	77
a. Arcos de hormigón y metálicos: comportamiento y estabilidad	77
b. Puentes atirantados: disposición de cables y torres	77
c. Puentes colgantes: tablero, cables principales y péndolas	78
d. Necesidades específicas de monitorización y mantenimiento	79
5. Puentes especiales y soluciones innovadoras	79
a. Puentes en ambiente urbano y de integración paisajística	79
b. Puentes de tablero mixto, extradosados y estructuras híbridas	80
c. Soluciones modulares y puentes provisionales	80
d. Implicaciones para la gestión de la vida útil	81
6. Criterios para la selección de tipología estructural	81
a. Condicionantes geométricos, topográficos y geotécnicos	81
b. Tráfico, cargas especiales y requisitos funcionales	82
c. Coste de construcción frente a coste de ciclo de vida	83
d. Facilidad de inspección, monitorización y refuerzo futuro	83
Capítulo 4: Geometría, cargas y análisis estructural en el proyecto de puentes y viaductos	85
1. Geometría en planta y alzado	85
a. Trazado en planta y radios mínimos	85
b. Pendientes longitudinales y rasante	86
c. Peraltes, sobrecargas y transiciones	87
d. Gálibos, alineaciones y condicionantes de entorno	87
2. Modelización de cargas para el análisis	88
a. Representación de cargas de tráfico y trenes de carga	88
b. Modelos de temperatura y gradientes térmicos	89
c. Modelización de viento, sismo y acciones especiales	90
d. Cargas de construcción y fases transitorias	91
3. Modelos estructurales y métodos de análisis	91
a. Modelos de barras, pórticos y vigas continuas	91
b. Modelos de placa, cascarón y volumen	92
c. Análisis lineal elástico y no lineal	93
d. Verificación local de detalles y secciones críticas	93
4. Análisis dinámico y vibraciones en puentes	94
a. Propias frecuencias y modos de vibración	94
b. Efectos dinámicos del tráfico y del viento	95
c. Comportamiento frente a peatones y resonancias	95
d. Relación entre modelos de análisis y sistemas SHM	96
5. Deformaciones, rotaciones y estados de servicio	96
a. Flechas instantáneas y diferidas	96
b. Control de giros y rotaciones en apoyos	97
c. Control de fisuración y abertura de juntas	98
d. Confort del usuario y criterios de servicio	98
6. Resultado del análisis y retroalimentación al diseño	99
a. Ajustes de geometría y tipología según resultados	99
b. Optimización de secciones y detalles constructivos	100
c. Determinación de puntos singulares para futuras inspecciones	100
d. Bases de datos de cálculo como soporte al gemelo digital	101

PARTE TERCERA.....102

CONSTRUCCIÓN, CONTROL DE CALIDAD Y PUESTA EN SERVICIO DE PUENTES Y VIADUCTOS102

Capítulo 5: Métodos constructivos e implicaciones estructurales en puentes y viaductos 102

1. Cimbra apoyada y cimbra autolanzable	102
a. Diseño y comprobación de cimbras	102
b. Control de deformaciones durante el hormigonado.....	103
c. Secuencias de descimbrado y riesgos asociados	104
d. Registro de información relevante para la vida útil	104
2. Voladizos sucesivos y carros de avance	105
a. Secuencia de ejecución por dovelas.....	105
b. Control de alineaciones y cierres de vano.....	106
c. Influencia en los esfuerzos de servicio	106
d. Instrumentación temporal durante la construcción	107
3. Prefabricación, industrialización y métodos modulares	108
a. Vigas y elementos prefabricados de hormigón	108
b. Elementos metálicos prefabricados y montajes	108
c. Puentes modulares y soluciones repetitivas	109
d. Ventajas para la calidad y el mantenimiento futuro	110
4. Lanzamiento incremental, empuje y izado	110
a. Puentes lanzados: fases y control del proceso	110
b. Empuje con gatos, torres provisionales y apoyos temporales	111
c. Izado de tramos metálicos y cajones	111
d. Lecciones de obra para el diseño de intervenciones futuras	112
5. Condicionantes constructivos y de entorno.....	113
a. Obras sobre cauces, líneas férreas o tráfico intenso	113
b. Restricciones ambientales y de seguridad	113
c. Fases de desvío de tráfico y limitaciones de servicio.....	114
d. Coordinación entre método constructivo y gestor de la infraestructura	114
6. Documentación de construcción y transferencia al gestor	115
a. Plan de aseguramiento de la calidad	115
b. Registros de hormigonado, tensado y controles.....	116
c. Información de cambios respecto al proyecto	116
d. Entrega de documentación como base del “as built” y del gemelo digital	117

Capítulo 6: Control de calidad, pruebas de carga y condiciones iniciales para la monitorización

.....118

1. Control de materiales y procesos.....	118
a. Hormigones: resistencia, durabilidad y consistencia	118
b. Aceros y sistemas de pretensado	119
c. Impermeabilizaciones, juntas y apoyos	120
d. Ensayos de recepción y criterios de aceptación	121
2. Control geométrico y funcional	121
a. Verificación de geometría en planta y alzado	121
b. Comprobación de secciones, recubrimientos y detalles	122
c. Ensayos de rugosidad, drenaje y capas de rodadura.....	123
d. Verificación de gálibos y condicionantes de entorno.....	123

3. Pruebas de carga estáticas	124
a. Objetivos y alcance de la prueba de carga	124
b. Instrumentación y mediciones principales.....	125
c. Interpretación de resultados y criterios de aceptación	125
d. Documentación de resultados para la gestión futura	126
4. Pruebas de carga dinámicas y medición de vibraciones	127
a. Ensayos de frecuencia y amortiguamiento	127
b. Medición de respuesta a tráfico real o cargas móviles	127
c. Identificación modal experimental.....	128
d. Uso de resultados como base de un SHM a largo plazo.....	128
5. Recepción del puente y puesta en servicio	129
a. Actas de terminación de obra e informes finales	129
b. Condiciones para la apertura al tráfico	130
c. Limitaciones iniciales de uso y recomendaciones	130
d. Entrega formal al gestor de la infraestructura	131
6. Definición del estado “cero” para la gestión de la vida útil	131
a. Registro de parámetros estructurales y geométricos iniciales.....	131
b. Definición de puntos de referencia para futuras inspecciones	132
c. Vinculación con el inventario y el sistema de gestión de puentes	132
d. Integración en plataformas digitales y gemelo inicial	133
PARTE CUARTA.	134
INSPECCIÓN, AUSCULTACIÓN Y DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE PUENTES Y VIADUCTOS.....	134
Capítulo 7: Programas de inspección de puentes y viaductos	134
1. Tipos de inspección y niveles de detalle	134
a. Inspecciones básicas: objetivos y alcance	134
b. Inspecciones principales: metodología y contenidos.....	135
c. Inspecciones especiales: cuándo y cómo realizarlas	136
d. Inspecciones extraordinarias tras eventos anómalos	137
2. Planificación y periodicidad de las inspecciones	138
a. Criterios de periodicidad según tipología y riesgo	138
b. Adaptación del programa a la edad y al tráfico del puente	138
c. Priorización de inspecciones en una red amplia.....	139
d. Programación anual y plurianual de actividades.....	139
3. Metodología de inspección visual	140
a. Preparación previa: revisión de documentación y accesos.....	140
b. Recorridos, puntos críticos y orden de inspección.....	141
c. Técnicas de observación y uso de equipos auxiliares	141
d. Identificación preliminar de patologías frecuentes.....	142
4. Medios auxiliares y tecnologías de apoyo	142
a. Plataformas, vehículos de inspección y andamios	142
b. Drones, cámaras de alta resolución y termografía.....	143
c. Escáner 3D, fotogrametría y nubes de puntos	144
d. Criterios de seguridad y protección laboral	144
5. Registro de daños y codificación de anomalías.....	145
a. Sistemas de codificación de daños estructurales	145
b. Fichas de registro estándar y formatos digitales.....	145

c. Fotografías, croquis y geoposicionamiento	146
d. Evaluación preliminar de la severidad del daño	147

6. Evaluación global del estado en la inspección147

a. Escalas de valoración del estado estructural	147
b. Cálculo de índices de condición y riesgo	148
c. Recomendaciones de actuaciones y prioridades	148
d. Comunicación de resultados al gestor y archivo histórico	149

Capítulo 8: Ensayos no destructivos, auscultación avanzada y diagnóstico estructural150

1. Técnicas sobre hormigón en puentes y viaductos150

a. Esclerometría, ultrasonidos y extracción de testigos	150
b. Medición de potenciales de corrosión y resistividad	151
c. Profundidad de carbonatación y contenido de cloruros	152
d. Interpretación conjunta con la inspección visual	153

2. Técnicas sobre elementos metálicos y mixtos154

a. Medición de espesores y detección de pérdidas por corrosión	154
b. Ensayos de partículas magnéticas y líquidos penetrantes	155
c. Ultrasonidos para detección de fisuras y defectos internos.....	156
d. Control de uniones soldadas y atornilladas.....	156

3. Auscultación geotécnica e hidráulica157

a. Ensayos en cimentaciones superficiales y profundas.....	157
b. Control de asentamientos, giros y movimientos diferenciales	158
c. Medición y seguimiento de socavación	159
d. Instrumentación en laderas próximas y taludes	159

4. Medición de deformaciones, tensiones y vibraciones160

a. Extensometría, galgas y fibra óptica.....	160
b. Monitorización de flechas y rotaciones	161
c. Acelerómetros y sensores de vibración.....	161
d. Ensayos modales y correlación con modelos numéricos	162

5. Integración de resultados y diagnóstico estructural163

a. Contraste de datos de ensayo, inspección y cálculo	163
b. Identificación de mecanismos de daño dominantes	164
c. Estimación de la capacidad residual	164
d. Definición de escenarios de explotación y restricciones.....	165

6. Elaboración de informes de diagnóstico.....166

a. Estructura del informe técnico de diagnóstico.....	166
b. Presentación clara de resultados y conclusiones	166
c. Propuesta de actuaciones y prioridades.....	167
d. Archivo, trazabilidad y uso en la gestión de activos.....	167

PARTE QUINTA.169

MONITORIZACIÓN ESTRUCTURAL (SHM) Y DIGITALIZACIÓN DE PUENTES Y VIADUCTOS169

Capítulo 9: Conceptos, objetivos y arquitectura de sistemas SHM en puentes y viaductos169

1. Objetivos de la monitorización estructural.....169

a. Seguimiento de la respuesta bajo cargas habituales.....	169
b. Detección temprana de daños y cambios de comportamiento	170
c. Verificación de la seguridad en puentes críticos	171
d. Soporte a decisiones de mantenimiento y refuerzo	171

2. Tipologías de sistemas SHM	172
a. Monitorización continua y cuasi continua.....	172
b. Monitorización por campañas de auscultación periódica.....	173
c. Sistemas permanentes frente a temporales.....	173
d. Criterios de diseño según riesgo, tipología y presupuesto.....	174
3. Arquitectura de un sistema SHM	175
a. Sensores, cableado y redes de comunicaciones.....	175
b. Unidades de adquisición y almacenamiento de datos	175
c. Sincronización temporal y gestión de la energía	176
d. Integración con centros de control e infraestructuras TIC.....	177
4. Diseño de la instrumentación para puentes y viaductos	177
a. Selección de puntos de control estructural.....	177
b. Definición de magnitudes a medir (deformaciones, tensiones, aceleraciones, temperatura, etc.)	178
c. Distribución espacial de sensores y redundancias	179
d. Ensayos previos y calibraciones iniciales.....	179
5. Fases de implantación de un SHM	180
a. Estudio de viabilidad y análisis coste–beneficio	180
b. Diseño conceptual y especificaciones técnicas	180
c. Instalación, pruebas funcionales y validación inicial	181
d. Operación, mantenimiento y actualización del sistema	182
6. Estrategias de integración del SHM en la gestión de vida útil.....	182
a. Relación con el inventario y el sistema de gestión de puentes	182
b. Uso de indicadores derivados de SHM en matrices de riesgo	183
c. Ajuste de planes de inspección y mantenimiento	183
d. Incorporación de datos a modelos de vida útil y deterioro	184
Capítulo 10: Sensores, adquisición de datos y tratamiento de la información en SHM	185
1. Tipos de sensores utilizados en puentes y viaductos	185
a. Acelerómetros y sensores de vibración.....	185
b. Extensómetros, celdas de carga y fibra óptica	186
c. Sensores de desplazamiento, nivel y fisuración	187
d. Sensores ambientales (temperatura, humedad, viento, nivel de agua)	188
2. Sistemas de adquisición y comunicaciones	189
a. Equipos de adquisición centralizados y distribuidos	189
b. Protocolos de comunicación cableados e inalámbricos	189
c. Sincronización y muestreo	190
d. Tolerancia a fallos y estrategias de redundancia	191
3. Almacenamiento, calidad y gestión de datos	191
a. Bases de datos de tiempo real e históricas	191
b. Control de calidad de datos y detección de errores.....	192
c. Políticas de almacenamiento, respaldo y archivo.....	192
d. Seguridad de la información y ciberseguridad	193
4. Procesado de señales y extracción de características.....	194
a. Filtrado, eliminación de ruido y preprocesado.....	194
b. Transformadas, análisis en frecuencia y dominio tiempo–frecuencia	194
c. Cálculo de magnitudes derivadas y parámetros de estado	195
d. Identificación de cambios significativos en la respuesta estructural	196

5. Indicadores de estado y umbrales de alarma	196
a. Definición de indicadores de daño y de desempeño	196
b. Clasificación de niveles de alarma y eventos	197
c. Protocolos de reacción ante alarmas	198
d. Retroalimentación con la explotación y el mantenimiento	198
6. Explotación de datos para la toma de decisiones	199
a. Informes periódicos de comportamiento estructural	199
b. Ajuste de modelos numéricos con datos reales	199
c. Priorización de actuaciones basada en datos medidos	200
d. Lecciones aprendidas para el diseño de nuevos puentes	200
Capítulo 11: Gemelo digital, inteligencia artificial y gestión avanzada del ciclo de vida...202	
1. Concepto y componentes del gemelo digital de puentes y viaductos	202
a. Modelo geométrico y estructural	202
b. Integración con datos de SHM e inspecciones	203
c. Actualización dinámica del estado del activo	203
d. Interfaz con sistemas de gestión y explotación	204
2. Integración BIM, GIS y plataformas de gestión	205
a. Modelos BIM para puentes y viaductos	205
b. Relación con sistemas de información geográfica	205
c. Vinculación de documentos, ensayos y registros históricos	206
d. Flujo de información entre proyecto, obra y explotación	206
3. Modelos predictivos de deterioro y vida útil remanente	207
a. Modelos empíricos, semiempíricos y mecanicistas	207
b. Actualización de modelos con datos de SHM	208
c. Escenarios de evolución del deterioro	208
d. Estimación de vida útil remanente y ventana de intervención	209
4. Inteligencia artificial y machine learning aplicados a puentes	209
a. Detección automática de daño y anomalías	209
b. Clasificación de patrones de comportamiento estructural	210
c. Predicción de fallos y necesidades de mantenimiento	210
d. Soporte a la decisión mediante sistemas expertos	211
5. Evaluación de estrategias de gestión y optimización de inversiones	212
a. Simulación de escenarios de mantenimiento y refuerzo	212
b. Evaluación económica en términos de ciclo de vida	212
c. Análisis multicriterio (seguridad, servicio, coste)	213
d. Priorización de proyectos de intervención en redes extensas	213
6. Hoja de ruta para la digitalización de la gestión de puentes	214
a. Punto de partida: inventario y datos disponibles	214
b. Plan de implantación progresiva de herramientas digitales	214
c. Integración con contratos y modelos de negocio	215
d. Recomendaciones para administraciones y concesionarias	215
PARTE SEXTA.	217
PATOLOGÍAS, EVALUACIÓN DE CAPACIDAD Y GESTIÓN DE LA VIDA ÚTIL EN PUENTES Y VIADUCTOS	217
Capítulo 12: Patologías en puentes y viaductos de hormigón	217

1. Fisuración y problemas de servicio	217
a. Tipos de fisuras y su clasificación	217
b. Fisuración por retracción, temperatura y cargas	218
c. Criterios para evaluar la gravedad de la fisuración	218
d. Implicaciones en durabilidad y capacidad estructural	219
2. Corrosión de armaduras y cables de pretensado	219
a. Mecanismos de iniciación y propagación	219
b. Influencia de recubrimientos, carbonatación y cloruros	220
c. Detección y evaluación mediante ensayos	221
d. Efectos en la capacidad portante y en la seguridad	221
3. Degradación por acciones ambientales y químicas	222
a. Ataque por sulfatos y otros agentes agresivos	222
b. Congelación-deshielo y ciclos térmicos severos	222
c. Erosión, abrasión y cavitación	223
d. Medidas de prevención y protección	223
4. Defectos de construcción y errores de proyecto	224
a. Defectos en materiales y procesos de hormigonado	224
b. Errores geométricos y de armado	224
c. Incompatibilidades entre elementos y detalles	225
d. Impacto en el comportamiento global del puente	225
5. Daños por sobrecargas, impactos y eventos extremos	226
a. Sobrecargas de tráfico y cargas especiales no previstas	226
b. Impactos de vehículos, buques u objetos flotantes	227
c. Efectos de incendios y accidentes	227
d. Evaluación postevento y decisiones de cierre o refuerzo	228
6. Estrategias de intervención frente a patologías del hormigón	228
a. Reparación superficial y sellado de fisuras	228
b. Restauración de secciones y protección anticorrosiva	229
c. Medidas de refuerzo y recalce	229
d. Prioridades en función del riesgo y la vida útil	230
Capítulo 13: Patologías en puentes metálicos y mixtos	231
1. Corrosión en estructuras metálicas	231
a. Tipos de corrosión (uniforme, localizada, galvánica)	231
b. Factores que favorecen la corrosión en puentes metálicos	232
c. Técnicas de inspección y medida de pérdidas de sección	232
d. Evaluación de la capacidad residual	233
2. Fatiga y fisuración en detalles metálicos y mixtos	234
a. Conceptos básicos de fatiga en estructuras	234
b. Detalles sensibles a la fatiga en vigas y uniones	235
c. Ensayos y monitorización de fisuras por fatiga	235
d. Medidas preventivas y correctivas	236
3. Problemas de vibración y deformaciones excesivas	237
a. Vibraciones inducidas por tráfico y viento	237
b. Comportamiento dinámico en tableros ligeros	237
c. Problemas de confort y servicio	238
d. Técnicas de mitigación (amortiguadores, cambios de rigidez)	239

4. Daños por impacto, temperatura e incendio	239
a. Impactos localizados y deformaciones plásticas	239
b. Dilataciones térmicas y problemas en apoyos y juntas	240
c. Comportamiento en incendio y protección pasiva	240
d. Estrategias de evaluación postevento	241
5. Patologías en estructuras mixtas acero–hormigón	242
a. Despegues y problemas de colaboración	242
b. Degradación en conectores y uniones	242
c. Incompatibilidades de deformación y fisuración	243
d. Criterios de intervención y refuerzo mixto	243
6. Intervenciones típicas en puentes metálicos y mixtos	244
a. Limpieza, saneado y repintado	244
b. Refuerzo local y global de elementos metálicos	244
c. Sustitución de elementos deteriorados	245
d. Monitorización posterior para control de la eficacia	245
Capítulo 14: Interacción terreno–estructura, socavación y efectos ambientales en puentes y viaductos	247
1. Patologías en cimentaciones y estribos	247
a. Asentamientos diferenciales y giros	247
b. Deslizamientos y roturas globales	248
c. Degradación de pilotajes y cimentaciones profundas	248
d. Evaluación geotécnica mediante auscultación y ensayo	249
2. Socavación en pilas de cauce y protección de márgenes	250
a. Mecanismos de socavación local y general	250
b. Factores que la favorecen y condiciones críticas	250
c. Métodos de evaluación y monitorización	251
d. Medidas de protección y refuerzo	251
3. Movimientos de ladera y estabilidad global	252
a. Inestabilidades de taludes próximos al puente	252
b. Influencia en estribos y accesos	253
c. Auscultación de laderas y técnicas de estabilización	253
d. Integración del riesgo de ladera en la gestión del puente	254
4. Efectos de la temperatura y movimientos diferenciales	254
a. Dilataciones y contracciones térmicas	254
b. Bloqueo de apoyos y problemas de redistribución de esfuerzos	255
c. Movimientos en juntas y fisuración asociada	255
d. Estrategias de control y mantenimiento	256
5. Impacto del cambio climático en puentes y viaductos	256
a. Cambios en los regímenes de caudal y crecidas	256
b. Incremento de eventos extremos de viento y temperatura	257
c. Aceleración de procesos de deterioro	257
d. Necesidad de adaptación y reevaluación de riesgos	258
6. Evaluación global de seguridad geotécnica e hidráulica	258
a. Metodologías de evaluación integral terreno–estructura	258
b. Índices de riesgo asociados a fenómenos geotécnicos e hidráulicos	259
c. Priorización de actuaciones de recalce y protección	259
d. Monitorización continua en zonas críticas	260

PARTE SÉPTIMA.....	261
REFUERZO, REHABILITACIÓN Y ADAPTACIÓN DE PUENTES Y VIADUCTOS	261
Capítulo 15: Estrategias de intervención estructural y toma de decisiones	261
1. Jerarquía de actuaciones en puentes y viaductos	261
a. Conservación rutinaria y mantenimiento preventivo.....	261
b. Reparación, refuerzo y sustitución parcial	262
c. Demolición y sustitución total	262
d. Criterios para seleccionar la estrategia adecuada.....	263
2. Metodologías de evaluación para decidir intervenir o sustituir.....	263
a. Evaluación técnica de la estructura y la cimentación.....	263
b. Análisis de seguridad y servicio en el estado actual.....	264
c. Vida útil remanente y capacidad de adaptación	265
d. Comparativa técnica entre refuerzo y demolición-reconstrucción.....	265
3. Análisis económico en términos de ciclo de vida	266
a. Coste inicial de intervención frente a coste de sustitución	266
b. Costes de mantenimiento a lo largo del tiempo	266
c. Costes indirectos por afección al tráfico y a la operación	267
d. Herramientas de análisis coste-beneficio y VAN	267
4. Condicionantes de explotación y entorno	268
a. Restricciones de corte de tráfico y desvíos	268
b. Limitaciones ambientales y urbanísticas	268
c. Coordinación con otros proyectos de infraestructura.....	269
d. Gestión de riesgos durante las obras	269
5. Planificación y programación de las intervenciones.....	270
a. Fases de proyecto, licitación y ejecución	270
b. Planificación temporal y secuenciación de trabajos	271
c. Coordinación con inspección y SHM durante las obras.....	271
d. Planes de contingencia y gestión de imprevistos	272
6. Comunicación y gestión de interesados	272
a. Coordinación con autoridades y operadores de la infraestructura.....	272
b. Comunicación con usuarios y población afectada	273
c. Gestión de expectativas y percepción del riesgo.....	273
d. Transparencia en la toma de decisiones y documentación	274
Capítulo 16: Técnicas de refuerzo y ampliación de capacidad estructural	275
1. Refuerzo de elementos de hormigón	275
a. Recrecidos, encamisados y sobresecciones	275
b. Postensado adicional y cosidos estructurales	276
c. Reparación y refuerzo de apoyos y estribos.....	277
d. Compatibilidad de materiales y detalles constructivos.....	277
2. Refuerzo con materiales compuestos (FRP) y sistemas externos	278
a. Tipos de FRP y modos de aplicación	278
b. Refuerzo a flexión, cortante y confinamiento	279
c. Ventajas y limitaciones de los sistemas FRP	279
d. Criterios de diseño, ejecución y control	280
3. Refuerzo de estructuras metálicas y mixtas	281

a. Planchas de refuerzo y rigidizadores	281
b. Sustitución y duplicación de elementos	281
c. Mejora de uniones y detalles sensibles a la fatiga	282
d. Control de tensiones residuales y deformaciones	283
4. Ampliación de capacidad mediante ensanchamientos y duplicación	283
a. Ensanchamiento de tableros existentes	283
b. Construcción de tableros adosados o paralelos	284
c. Reconfiguración del tráfico y cargas por carril	285
d. Integración estructural y estética de las ampliaciones	285
5. Refuerzo y mejora de cimentaciones	286
a. Recalces con micropilotes y pilotes adicionales	286
b. Mejora del terreno bajo cimentaciones superficiales	286
c. Estructuras de protección frente a socavación	287
d. Monitorización de asentamientos y estabilidad	287
6. Control de calidad y monitorización durante el refuerzo	288
a. Ensayos de aceptación de materiales y sistemas de refuerzo	288
b. Control dimensional y de tensiones inducidas	288
c. Monitorización durante y después de la intervención	289
d. Definición de un nuevo estado de referencia post-refuerzo	289
Capítulo 17: Rehabilitación integral, adaptación sísmica y resiliencia climática	291
1. Rehabilitación integral de puentes envejecidos.....	291
a. Criterios para una intervención integral.....	291
b. Renovación de equipamientos: juntas, apoyos, drenaje y firmes.....	292
c. Mejora de barandillas, pretilas y elementos de seguridad vial	293
d. Cambio de imagen y puesta en valor de puentes urbanos	294
2. Adaptación sísmica de puentes y viaductos	294
a. Evaluación de vulnerabilidad sísmica	294
b. Aisladores, disipadores y dispositivos de control de energía.....	295
c. Refuerzo de pilas, estribos y cimentaciones.....	296
d. Integración de criterios sísmicos en intervenciones generales	296
3. Intervenciones frente a crecidas, inundaciones y eventos extremos	297
a. Revisiones de niveles de agua y períodos de retorno	297
b. Medidas de protección frente a socavación e inundaciones	298
c. Refuerzo de márgenes y encauzamientos	298
d. Integración de soluciones basadas en la naturaleza	299
4. Adaptación a nuevas exigencias de tráfico y carga	299
a. Incremento de cargas estándar y tráfico pesado	299
b. Modificación de limitaciones de uso y gálibos	300
c. Adecuación a nuevos modos (carril bici, transporte público, etc.).....	301
d. Compatibilización entre usos actuales y futuros.....	301
5. Criterios de sostenibilidad y economía circular	302
a. Minimización de residuos y reutilización de materiales.....	302
b. Evaluación ambiental de soluciones de refuerzo y sustitución	302
c. Reducción de emisiones asociadas a la intervención	303
d. Indicadores de sostenibilidad en proyectos de puentes	303
6. Puentes resilientes frente al cambio climático	304
a. Concepto de resiliencia aplicada a puentes y viaductos	304

b. Diseño de intervenciones con perspectiva de largo plazo	305
c. Flexibilidad y capacidad de adaptación futura	305
d. Integración de resiliencia en la gestión de redes de puentes	306
PARTE OCTAVA.	307
GESTIÓN DE ACTIVOS, MANTENIMIENTO Y CONTRATACIÓN EN PUENTES Y VIADUCTOS.....	307
Capítulo 18: Gestión de activos de puentes y viaductos	307
1. Inventario y clasificación de puentes	307
a. Contenidos mínimos del inventario.....	307
b. Codificación y etiquetado de estructuras.....	308
c. Integración con sistemas georreferenciados	309
d. Actualización continua del inventario	310
2. Sistemas de gestión de puentes (BMS).....	311
a. Arquitectura de un sistema de gestión de puentes.....	311
b. Módulos de inventario, inspección y mantenimiento	312
c. Flujo de información entre campo y oficina	312
d. Ejemplo de procesos típicos en un BMS.....	313
3. Modelos de deterioro y matrices de riesgo	314
a. Modelos de deterioro simple y avanzado	314
b. Definición de índices de condición estructural	314
c. Matrices de probabilidad–consecuencia	315
d. Representación y priorización a nivel de red	316
4. Programas de inspección y mantenimiento a nivel de red	316
a. Estrategias de inspección basadas en riesgo	316
b. Programación de actuaciones preventivas	317
c. Gestión de recursos humanos y económicos	317
d. Seguimiento y revisión periódica del programa.....	318
5. Indicadores de desempeño y niveles de servicio	319
a. Definición de niveles de servicio aplicables a puentes	319
b. Indicadores de disponibilidad y seguridad	319
c. Indicadores de confort y calidad de rodadura.....	320
d. Cuadros de mando y reporting a la dirección	320
6. Integración de la gestión de activos en la planificación de infraestructuras.....	321
a. Vinculación con planes de inversión y conservación.....	321
b. Coordinación con planificación de la red viaria y ferroviaria	321
c. Uso de escenarios de gestión a largo plazo	322
d. Comunicación de resultados a decisores políticos y financieros	323
Capítulo 19: Estrategias de mantenimiento y modelos contractuales.....	324
1. Tipos de mantenimiento en puentes y viaductos	324
a. Mantenimiento rutinario y conservación ordinaria	324
b. Mantenimiento preventivo y predictivo	325
c. Actuaciones correctivas y emergencias.....	325
d. Registro y trazabilidad de las actuaciones.....	326
2. Planificación y programación de trabajos de mantenimiento	326
a. Plan anual de conservación	326
b. Priorización de intervenciones en función de riesgo y presupuesto.....	327
c. Coordinación con la operación del tráfico	327

d. Control de la ejecución y cierre de órdenes de trabajo	328
3. Modelos contractuales en la gestión de puentes.....	329
a. Contratos tradicionales de obra y servicios.....	329
b. Contratos por niveles de servicio y desempeño.....	329
c. Modelos integrados (conservación integral, contratos mixtos)	330
d. Asignación de riesgos entre administración y contratista.....	331
4. Concesiones y alianzas público–privadas	331
a. Rol de los puentes en contratos de concesión	331
b. Esquemas de pagos por disponibilidad	332
c. Obligaciones de mantenimiento y estándares mínimos	332
d. Mecanismos de seguimiento y penalizaciones	333
5. Integración de SHM y digitalización en los contratos	334
a. Exigencias de monitorización estructural en pliegos	334
b. Entrega de datos y acceso de la administración	334
c. Uso de indicadores derivados de SHM como KPI contractuales	335
d. Beneficios y retos para ambas partes	335
6. Evaluación económica de la gestión de la vida útil	336
a. Costes directos e indirectos del mantenimiento.....	336
b. Evaluación de estrategias de conservación alternativas	337
c. Optimización del presupuesto a medio y largo plazo.....	337
d. Herramientas de análisis financiero y de riesgo.....	338
PARTE NOVENA.	339
HERRAMIENTAS DE PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL. CHECKLISTS Y FORMULARIOS.	339
Capítulo 20: Checklists y formularios para estudios previos, proyecto y construcción	339
FORMULARIO Nº 20.01 — Estudio previo y selección de alternativa de puente	339
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	340
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	340
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	341
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	341
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	342
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	342
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	343
Sección 8. Evidencias y referencias	343
FORMULARIO Nº 20.02 — Definición de cargas y combinaciones de cálculo en puentes y viaductos	343
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	343
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	344
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	344
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	344
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	345
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	345
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	345
Sección 8. Evidencias y referencias	345
CHECKLIST Nº 20.03 — Documentación de proyecto de puente y viaducto	346
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	346
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	346

Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	346
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	347
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	347
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	347
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	348
Sección 8. Evidencias y referencias	348

CHECKLIST Nº 20.04 — Coordinación proyecto—método constructivo de puentes y viaductos ..348

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	348
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	348
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	349
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	349
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	349
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	350
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	350
Sección 8. Evidencias y referencias	350

FORMULARIO Nº 20.05 — Control de calidad en obra de puente y viaducto350

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	350
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	351
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	351
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	351
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	352
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	352
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	352
Sección 8. Evidencias y referencias	352

FORMULARIO Nº 20.06 — Pruebas de carga y recepción estructural de puentes y viaductos ...353

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	353
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	353
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	353
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	354
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	354
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	354
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	354
Sección 8. Evidencias y referencias	355

Capítulo 21: Checklists y formularios para inspección y auscultación estructural356

FORMULARIO Nº 21.01 — Ficha de inspección básica y principal por elemento de puente.....356

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	356
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	357
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	357
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	357
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	358
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	358
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	358
Sección 8. Evidencias y referencias	358
Detalle específico (modelo de ficha por elemento: observación, daño y valoración)	359
Espacios para fotografías y croquis (documentados sin dejar campos vacíos)	359

FORMULARIO Nº 21.02 — Checklist para inspecciones especiales de puentes y viaductos360

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	360
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	360
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	360

Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	361
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	361
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	361
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	361
Sección 8. Evidencias y referencias	362

FORMULARIO Nº 21.03 — Campaña de ensayos no destructivos en puentes (plan, registro y síntesis)362

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	362
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	362
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	363
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	364
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	364
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	364
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	364
Sección 8. Evidencias y referencias	365

FORMULARIO Nº 21.04 — Plantilla de informe de diagnóstico estructural de puentes.....365

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	365
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	365
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	366
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	366
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	367
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	367
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	367
Sección 8. Evidencias y referencias	367

FORMULARIO Nº 21.05 — Evaluación de seguridad y restricciones de uso en puentes y viaductos368

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	368
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	368
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	368
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	369
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	369
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	369
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	369
Sección 8. Evidencias y referencias	370

CHECKLIST Nº 21.06 — Formatos de archivo y trazabilidad de inspecciones y auscultación370

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	370
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	370
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	370
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	371
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	371
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	371
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	372
Sección 8. Evidencias y referencias	372

Capítulo 22: Checklists y formularios para SHM, gemelo digital y gestión de vida útil373

FORMULARIO Nº 22.01 — Requisitos funcionales para sistema SHM en puente estratégico373

Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	373
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	374
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	374
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	375
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes.....	375

Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	376
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	376
Sección 8. Evidencias y referencias	376
CHECKLIST Nº 22.02 — Diseño de instrumentación y sensores para SHM	377
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	377
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	377
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	377
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	378
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes	378
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	378
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	379
Sección 8. Evidencias y referencias	379
FORMULARIO Nº 22.03 — Instalación, calibración y puesta en marcha de sistema SHM	379
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	379
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	379
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	380
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	380
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes	380
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	381
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	381
Sección 8. Evidencias y referencias	381
FORMULARIO Nº 22.04 — Seguimiento y explotación de datos de SHM	381
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	381
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	382
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	382
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	383
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes	383
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	384
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	384
Sección 8. Evidencias y referencias	384
FORMULARIO Nº 22.05 — Evaluación de vida útil y decisiones de intervención basadas en datos	384
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	384
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	385
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	385
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	386
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes	386
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	386
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	387
Sección 8. Evidencias y referencias	387
FORMULARIO Nº 22.06 — Ficha de activo y cuadro de mando para gestión de vida útil en red de puentes	387
Sección 1. Identificación y alcance del expediente/proyecto	387
Sección 2. Datos del activo/terreno/inmueble (y/o del contrato/licencia)	388
Sección 3. Requisitos y verificaciones técnicas/urbanísticas/financieras	388
Sección 4. Riesgos, seguridad y cumplimiento normativo	389
Sección 5. Plazos, hitos y condicionantes	389
Sección 6. Costes, importes y garantías (si aplica)	389
Sección 7. Aprobaciones y firmas (RACI)	389
Sección 8. Evidencias y referencias	390

PARTE DÉCIMA.391

PRÁCTICA DE PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL391

Capítulo 23: Casos prácticos de inspección, diagnóstico y refuerzo estructural391

1. Puente de hormigón postesado con corrosión de cables	391
a. Contexto y características del puente	391
b. Resultados de inspección y ensayos no destructivos	392
c. Diagnóstico estructural y evaluación de seguridad	393
d. Estrategia de refuerzo adoptada y resultados	393
2. Viaducto metálico con problemas de fatiga	394
a. Historial de servicio y características del viaducto	394
b. Detección de fisuras de fatiga y su evolución	395
c. Monitorización y análisis de tensiones	395
d. Intervenciones realizadas y lecciones aprendidas	396
3. Puente con socavación significativa en pilas de cauce	397
a. Condiciones hidráulicas y episodio de crecida	397
b. Evaluación de la socavación y estabilidad	397
c. Medidas de emergencia adoptadas	398
d. Solución definitiva de protección y monitorización	399
4. Puente urbano con ampliación de capacidad	399
a. Situación previa y necesidad de ampliación	399
b. Solución de ensanchamiento o duplicación de tablero	400
c. Gestión del tráfico durante las obras	400
d. Control de comportamiento estructural tras la intervención	401
5. Rehabilitación de puente histórico con criterios de compatibilidad	402
a. Valor patrimonial y restricciones de intervención	402
b. Técnicas de diagnóstico no invasivas	402
c. Soluciones de refuerzo discretas y reversibles	403
d. Integración de monitorización y seguimiento a largo plazo	404
6. Síntesis y lecciones aprendidas	404
a. Factores clave de éxito en las intervenciones analizadas	404
b. Errores frecuentes y cómo evitarlos	405
c. Transferibilidad de soluciones a España y Latinoamérica	405
d. Recomendaciones prácticas para futuros proyectos	406

Capítulo 24: Casos prácticos de SHM, gemelo digital y gestión avanzada de vida útil.....408

1. Sistema SHM en un puente atirantado de gran luz	408
a. Objetivos de la monitorización y alcance	408
b. Diseño de la instrumentación y datos recogidos	409
c. Resultados principales e influencia en la gestión	410
d. Lecciones para otros puentes singulares	411
2. Gemelo digital de viaducto urbano de tráfico intenso	411
a. Integración de modelos BIM, SHM e inspecciones	411
b. Uso del gemelo digital en la toma de decisiones	412
c. Escenarios simulados y planificación de intervenciones	414
d. Beneficios observados y retos de implementación	414

3. Monitorización de puentes ferroviarios y control de vibraciones	415
a. Particularidades de los puentes ferroviarios	415
b. Diseño del sistema de monitorización	415
c. Control de vibraciones y confort	416
d. Impacto en la explotación y el mantenimiento	416
4. Uso de IA para detección de daño y priorización de mantenimiento	417
a. Datos disponibles y modelos de inteligencia artificial empleados	417
b. Procesos de entrenamiento y validación	418
c. Resultados en la detección temprana de anomalías	418
d. Integración con matrices de riesgo y planes de conservación	419
5. Comparativa de estrategias de gestión en distintas administraciones	420
a. Casos de administración nacional, regional y concesionaria	420
b. Niveles de digitalización y uso de SHM	420
c. Diferencias en políticas de intervención y financiación	421
d. Buenas prácticas y oportunidades de mejora	421
6. Conclusiones operativas y líneas futuras de desarrollo	422
a. Tendencias en proyecto, monitorización e intervención estructural	422
b. Retos pendientes en España y Latinoamérica	423
c. Innovaciones tecnológicas con mayor potencial	423
d. Recomendaciones finales para promotores, gestores e ingenierías	424

Capítulo 25: Casos prácticos de de puentes y viaductos: proyecto, monitorización e intervención estructural.426

Caso práctico 1. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Implementación de un programa básico de inspección y auscultación en un puente de vigas de hormigón.....426

Causa del Problema	426
Soluciones Propuestas.....	428
1. Elaboración de ficha de inventario y normalización de la información	428
2. Implantación de una inspección principal sistemática con medios auxiliares	428
3. Campaña selectiva de ensayos no destructivos y toma de testigos	429
4. Evaluación estructural simplificada y análisis de riesgo operativo	430
5. Plan de mantenimiento y paquete de reparaciones prioritarias	431
Consecuencias Previstas.....	432
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	433
Lecciones Aprendidas	434

Caso práctico 2. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Control de vibraciones y fatiga en un viaducto metálico de autopista concesionada.437

Causa del Problema	437
Soluciones Propuestas.....	438
1. Instrumentación temporal y campaña de mediciones dinámicas	438
2. Reconstrucción y actualización de un modelo numérico avanzado	439
3. Refuerzo local de detalles sensibles a la fatiga	440
4. Incorporación de amortiguadores para control de vibraciones versus medidas operativas	441
5. Programa de monitorización periódica y actualización del plan de mantenimiento	442
Consecuencias Previstas.....	443
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	444
Lecciones Aprendidas	445

Caso práctico 3. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN

ESTRUCTURAL." Gestión integral de la socavación en pilas de un puente sobre cauce torrencial. 448

Causa del Problema	448
Soluciones Propuestas.....	449
1. Evaluación de emergencia post-crecida y medidas de protección provisional	449
2. Campaña de auscultación geotécnica e hidráulica detallada	450
3. Modelización hidráulica y análisis de riesgo de socavación.....	451
4. Diseño y ejecución de medidas de protección definitiva frente a socavación	452
5. Implantación de un programa de monitorización hidráulica y estructural y actualización del plan de mantenimiento	453
Consecuencias Previstas.....	454
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	455
Lecciones Aprendidas	456

Caso práctico 4. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN

ESTRUCTURAL." Ampliación de capacidad y rehabilitación de un puente urbano en servicio sobre corredor ferroviario.459

Causa del Problema	459
Soluciones Propuestas.....	460
1. Diagnóstico estructural avanzado y evaluación de capacidad frente a nuevas demandas	460
2. Análisis de alternativas: demolición y sustitución vs. ensanchamiento y refuerzo	461
3. Proyecto de ensanchamiento con tableros adosados y refuerzo del tablero existente	462
4. Implantación de un sistema de monitorización estructural (SHM) durante obra y primeros años de servicio	463
5. Actualización funcional y de seguridad vial: equipamientos y detalles	464
Consecuencias Previstas.....	464
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	465
Lecciones Aprendidas	466

Caso práctico 5. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN

ESTRUCTURAL." Implantación de un sistema permanente de monitorización estructural en un puente atirantado de gran luz.468

Causa del Problema	468
Soluciones Propuestas.....	469
1. Definición de objetivos funcionales y alcance del SHM	469
2. Diseño de la arquitectura del sistema y selección de sensores	470
3. Implantación física del SHM: instalación, calibración y pruebas de puesta en servicio	471
4. Desarrollo de algoritmos de procesamiento, indicadores de estado y umbrales de alarma	472
5. Integración con la gestión de activos, formación y explotación inicial.....	473
Consecuencias Previstas.....	473
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	474
Lecciones Aprendidas	476

Caso práctico 6. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN

ESTRUCTURAL." Implantación de un gemelo digital en un viaducto urbano de tráfico intenso. 478

Causa del Problema	478
Soluciones Propuestas.....	479
1. Recuperación, depuración y estructuración de la información existente	479
2. Modelado BIM del viaducto y generación de modelo geométrico-constructivo de referencia	480
3. Integración de modelo estructural, SHM y datos de inspecciones en una plataforma única.....	481
4. Definición de casos de uso prioritarios del gemelo digital y flujos de trabajo.....	482
5. Plan de explotación, mantenimiento y escalado del gemelo digital.....	483
Consecuencias Previstas.....	484

Lecciones Aprendidas	486
Caso práctico 7. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Implantación de un programa de inspección y gestión de puentes basado en riesgo a nivel de red.....	488
Causa del Problema	488
Soluciones Propuestas.....	489
1. Creación de un inventario unificado y clasificación preliminar de riesgo	489
2. Definición de tipologías de inspección y periodicidades basadas en riesgo	490
3. Desarrollo e implantación de un sistema de gestión de puentes (BMS) corporativo	491
4. Programa de formación, certificación de inspectores y cultura de riesgo.....	492
5. Programa piloto, ajuste del modelo de riesgo y despliegue completo.....	493
Consecuencias Previstas.....	494
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	495
Lecciones Aprendidas	496
Caso práctico 8. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Rehabilitación de un puente de hormigón postesado con corrosión interna de cables.....	499
Causa del Problema	499
Soluciones Propuestas.....	500
1. Inspección especial y auscultación específica del postesado interior	500
2. Evaluación estructural avanzada con escenarios de rotura y pérdidas de sección	501
3. Análisis de alternativas de intervención: refuerzo versus demolición y sustitución	502
4. Proyecto y ejecución de postesado externo complementario y rehabilitación de hormigón	503
5. Implantación de un programa de monitorización específica post-intervención	504
Consecuencias Previstas.....	505
Lecciones Aprendidas	508
Caso práctico 9. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Adaptación sísmica y mejora funcional de un viaducto urbano existente en zona de sismicidad moderada–alta.	510
Causa del Problema	510
Soluciones Propuestas.....	511
1. Evaluación sísmica detallada e identificación de mecanismos de fallo	511
2. Refuerzo de pilas y cimentaciones mediante encamisados y micropilotes	512
3. Implementación de aislamiento sísmico y disipación de energía en apoyos.....	513
4. Mejora funcional y de seguridad vial integrada en la intervención	514
5. Plan de fases constructivas, gestión de tráfico y monitorización durante la obra	515
Consecuencias Previstas.....	516
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	517
Lecciones Aprendidas	518
Caso práctico 10. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Gestión de problemas de fatiga y vibraciones en un viaducto metálico mixto ferroviario.	521
Causa del Problema	521
Soluciones Propuestas.....	522
1. Campaña específica de inspección y ensayos no destructivos orientada a fatiga	522
2. Caracterización dinámica y modelización avanzada de la respuesta bajo tráfico real	523
3. Medidas inmediatas de seguridad y mantenimiento correctivo local	524
4. Proyecto y ejecución de refuerzos globales y mejora de detalles sensibles a fatiga	525
5. Implantación de un sistema de monitorización específico para fatiga e integración en la gestión de activos	526

Consecuencias Previstas.....	527
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	528
Lecciones Aprendidas.....	529

Caso práctico 11. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Rehabilitación compatible de un puente histórico de fábrica de sillería en entorno urbano.532

Causa del Problema	532
Soluciones Propuestas.....	533
1. Diagnóstico estructural integrado y no invasivo del puente histórico.....	533
2. Definición de estrategia de uso y reparto de cargas: jerarquía de tráfico, peatonalización parcial y protección frente a sobrecargas	534
3. Intervención estructural compatible: cosidos, rellenos, refuerzos discretos y mejora de cimentaciones	535
4. Actualización funcional y de drenaje: impermeabilización oculta, firme ligero y detalles compatibles.....	537
5. Monitorización estructural discreta y plan de gestión a largo plazo	538
Consecuencias Previstas.....	539
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	540
Lecciones Aprendidas.....	541

Caso práctico 12. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Gestión integral de la socavación en un puente fluvial estratégico con adaptación al cambio climático.543

Causa del Problema	543
Soluciones Propuestas.....	544
1. Campaña de auscultación geotécnica e hidráulica y modelización morfológica del cauce	544
2. Evaluación estructural y geotécnica con interacción terreno-estructura bajo socavación	546
3. Diseño de medidas de protección frente a socavación y refuerzo de cimentaciones	547
4. Implantación de un sistema de monitorización hidráulica y estructural específico para socavación	548
5. Integración en el sistema de gestión de activos y plan de explotación bajo cambio climático	549
Consecuencias Previstas.....	550
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	551
Lecciones Aprendidas.....	552

Caso práctico 13. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Rehabilitación por corrosión avanzada y ampliación funcional de un puente metálico en entorno portuario.555

Causa del Problema	555
Soluciones Propuestas.....	557
1. Diagnóstico detallado de corrosión, capacidad residual y análisis de alternativas (refuerzo-ampliación vs. sustitución)	557
2. Estrategia anticorrosiva integral: saneado, descontaminación de plomo y nuevo sistema de protección	558
3. Refuerzo estructural selectivo de vigas, diafragmas, uniones y apoyos	559
4. Ampliación funcional mediante tablero adosado y reconfiguración del tráfico	560
5. Implantación de un sistema de monitorización estructural orientado a corrosión y fatiga y su integración en la gestión	561
Consecuencias Previstas.....	562
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	563
Lecciones Aprendidas.....	564

Caso práctico 14. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Estabilización de ladera y recalce de estribos en un viaducto de montaña con movimientos activos.567

Causa del Problema	567
Soluciones Propuestas	569
1. Campaña geotécnica avanzada e instrumentación inicial de la ladera y el estribo	569
2. Medidas provisionales de seguridad y gestión del tráfico	570
3. Proyecto de estabilización de ladera mediante drenaje profundo y obras de contención	571
4. Recalce profundo y refuerzo del estribo Este	572
5. Monitorización permanente y plan de gestión de riesgo post-intervención	573
Consecuencias Previstas	574
Resultados de las Medidas Adoptadas	575
Lecciones Aprendidas	576

Caso práctico 15. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Decisión estratégica de refuerzo o sustitución total de un viaducto de autovía en red concesional.579

Causa del Problema	579
Soluciones Propuestas	580
1. Evaluación integral de seguridad, durabilidad y vida útil remanente	580
2. Desarrollo y comparación de alternativas de intervención a nivel conceptual	581
3. Toma de decisión: combinación de refuerzo moderado y nuevo viaducto paralelo (Alternativa 2 optimizada)	583
4. Proyecto y ejecución del refuerzo y rehabilitación del viaducto existente	584
5. Proyecto del nuevo viaducto paralelo y estrategia de monitorización conjunta	585
Consecuencias Previstas	586
Resultados de las Medidas Adoptadas	587
Lecciones Aprendidas	588

Caso práctico 16. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Refuerzo integral y ampliación de capacidad estructural de un viaducto de hormigón postesado en servicio bajo tráfico intenso.590

Causa del Problema	590
Soluciones Propuestas	591
1. Refuerzo del tablero a flexión mediante postensado exterior y bandas de FRP	591
2. Refuerzo a cortante y mejora de detalles mediante encamisados locales de hormigón y FRP en almas	592
3. Refuerzo y recalce de pilas y cimentaciones mediante micropilotes y mejora del terreno	593
4. Ensanchamiento parcial del tablero para incorporación de carril adicional y reconfiguración funcional	594
5. Monitorización estructural durante el refuerzo y en explotación (SHM básico orientado a capacidad)	595
Consecuencias Previstas	596
Resultados de las Medidas Adoptadas	597
Lecciones Aprendidas	598

Caso práctico 17. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Adaptación sísmica integral de un viaducto urbano existente con refuerzo y aislamiento.601

Causa del Problema	601
Soluciones Propuestas	602
1. Evaluación sísmica detallada mediante modelos no lineales y campañas de inspección específica	602
2. Estrategia de adaptación sísmica basada en aislamiento parcial del tablero y disipación de energía	603
3. Refuerzo de pilas y estribos para mejorar ductilidad y capacidad	604
4. Sistemas de contención, ampliación de asientos y dispositivos de retenida	605
5. Sistema de monitorización sísmica y estructural y plan de actuación post-sismo	606
Consecuencias Previstas	607
Resultados de las Medidas Adoptadas	608
Lecciones Aprendidas	609

Caso práctico 18. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Implantación de un sistema SHM avanzado y gemelo digital en un puente

atirantado de gran luz en corredor costero estratégico.	612
Causa del Problema	612
Soluciones Propuestas.....	613
1. Definición de objetivos funcionales del SHM y alcance del gemelo digital	613
2. Diseño de la arquitectura de monitorización: sensores, adquisición, comunicaciones y ciberseguridad.....	615
3. Implementación del gemelo digital: integración BIM–modelo estructural–SHM–BMS	616
4. Desarrollo de algoritmos de procesamiento de datos e inteligencia artificial para detección de daño y apoyo a la decisión	617
5. Plan de explotación, mantenimiento y transferencia a otros puentes de la red	619
Consecuencias Previstas.....	620
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	621
Lecciones Aprendidas	623

Caso práctico 19. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Implantación de un contrato de conservación por niveles de servicio con

integración de SHM en una red internacional de puentes.	626
Causa del Problema	626
Soluciones Propuestas.....	628
1. Diagnóstico integral de la red y análisis de riesgos estructurales y operacionales.....	628
2. Definición de niveles de servicio estructurales y funcionales y de indicadores (KPI)	629
3. Diseño del modelo contractual de conservación por desempeño con incentivos y penalizaciones .	630
4. Implantación de un sistema de gestión de puentes (BMS) corporativo e integración de datos de inspección, SHM y actuaciones	632
5. Selección de puentes críticos e implantación de SHM como obligación contractual	633
6. Programa de transición, gobernanza y mejora continua	634
Consecuencias Previstas.....	635
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	636
Lecciones Aprendidas	638

Caso práctico 20. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Adaptación climática de una red de puentes sobre cauces con riesgo creciente de crecidas extremas.....

.....	641
Causa del Problema	641
Soluciones Propuestas.....	642
1. Reevaluación hidrológica e hidráulica con escenarios de cambio climático y mapa de riesgo por crecidas	642
2. Programa de intervenciones de protección frente a socavación y refuerzo de cimentaciones y márgenes	643
3. Sistema de monitorización hidrológica y geotécnica y protocolos de alerta temprana	644
4. Integración de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) en emplazamientos piloto	646
5. Plan de explotación, emergencia y coordinación institucional España–Latinoamérica	647
Consecuencias Previstas.....	648
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	649
Lecciones Aprendidas	651

Caso práctico 21. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Rehabilitación integral y monitorización de un viaducto ferroviario de alta

velocidad afectado por asentamientos diferenciales.....	653
Causa del Problema	653
Soluciones Propuestas.....	655
1. Diagnóstico integral terreno–estructura–vía con modelización avanzada	655

2. Recalce de cimentaciones y mejora del terreno en zonas de transición	656
3. Ajuste geométrico del tablero y de la vía mediante gatos, sustitución de apoyos y losas de transición.....	657
4. Implantación de un sistema SHM específico para deformaciones, asentamientos y vibraciones de alta velocidad	658
5. Gemelo digital e integración en la gestión internacional de corredores de alta velocidad	659
Consecuencias Previstas.....	660
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	661
Lecciones Aprendidas.....	662

Caso práctico 22. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN

ESTRUCTURAL." Rehabilitación estructural y puesta en valor de un puente histórico de fábrica en entorno urbano.

Causa del Problema	665
Soluciones Propuestas.....	667
1. Diagnóstico estructural y patrimonial integral	667
2. Refuerzo discreto de arcos y bóvedas, eliminación de la losa deteriorada y nueva capa colaborante ligera	668
3. Rediseño de la sección transversal: prioridad peatonal y ciclista, limitación de tráfico motorizado y mejora de drenaje.....	669
4. Mejora de barandillas, pretilas, iluminación y tratamiento superficial con criterios patrimoniales	670
5. Sistema de monitorización estructural y ambiental y plan de conservación específico.....	671
Consecuencias Previstas.....	672
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	673
Lecciones Aprendidas.....	675

Caso práctico 23. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN

ESTRUCTURAL." Rehabilitación sísmica y ampliación funcional de un viaducto urbano en corredor metropolitano latinoamericano.

Causa del Problema	677
Soluciones Propuestas.....	679
1. Evaluación integral y definición de estrategia combinada: adaptación sísmica + ampliación funcional.....	679
2. Solución sísmica: aislamiento sísmico parcial, disipación de energía y refuerzo de pilas y estribos	680
3. Ensanchamiento del tablero y reconfiguración de la sección transversal	681
4. Renovación de equipamientos, drenaje, juntas y sistema de seguridad vial	682
5. Sistema de monitorización estructural y de explotación (SHM + datos de tráfico) durante las obras y en servicio	683
Consecuencias Previstas.....	684
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	685
Lecciones Aprendidas.....	687

Caso práctico 24. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN

ESTRUCTURAL." Implantación de un gemelo digital con inteligencia artificial en un puente atirantado de gran luz para gestión avanzada de la vida útil.

Causa del Problema	690
Soluciones Propuestas.....	692
1. Rediseño del sistema de monitorización estructural (SHM) y normalización de datos históricos	692
2. Desarrollo y calibración de un gemelo digital estructural-operacional del puente	693
3. Implementación de analítica avanzada e inteligencia artificial para detección temprana de daño y anomalías.....	694
4. Integración del gemelo digital y la IA en la gestión de mantenimiento y en la toma de decisiones	696
5. Plan de intervenciones físicas dirigidas: tirantes, amortiguadores, protección anticorrosiva y detallado aerodinámico	697
6. Programa de explotación adaptativa, formación y transferencia de conocimiento a otros puentes de la red	698



Consecuencias Previstas.....	699
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	700
Lecciones Aprendidas.....	702

Caso práctico 25. "PUENTES Y VIADUCTOS: PROYECTO, MONITORIZACIÓN E INTERVENCIÓN ESTRUCTURAL." Transformación integral de la gestión de una red binacional de puentes mediante BMS, SHM y modelos de inversión en ciclo de vida.704

Causa del Problema	704
Soluciones Propuestas.....	706
1. Inventario único corporativo y normalización de la información de base.....	706
2. Implantación de un Sistema de Gestión de Puentes (BMS) corporativo con matrices de riesgo y modelos de deterioro	707
3. Estrategia SHM y auscultación avanzada basada en criticidad y riesgo	708
4. Integración con modelos económicos de ciclo de vida y planificación de inversiones.....	709
5. Ajuste de modelos contractuales y acuerdos con administraciones sobre niveles de servicio e indicadores	711
6. Programa de cambio organizativo, formación y cultura de gestión basada en datos	712
Consecuencias Previstas.....	713
Resultados de las Medidas Adoptadas.....	714
Lecciones Aprendidas.....	715

¿QUÉ APRENDERÁ?



- Comprender el rol estratégico de puentes y viaductos en las infraestructuras y su gestión a lo largo del ciclo de vida.
- Dominar los criterios normativos y de seguridad estructural aplicados al proyecto de puentes y viaductos.
- Identificar y seleccionar la tipología estructural óptima según condicionantes geométricos, geotécnicos, ambientales y de tráfico.
- Definir geometría, cargas y modelos de análisis estructural, incluido el comportamiento dinámico y las vibraciones.
- Planificar la construcción, el control de calidad y las pruebas de carga como base del estado "cero" del puente.
- Diseñar y ejecutar programas de inspección, auscultación y diagnóstico estructural, integrando ensayos no destructivos.
- Reconocer y clasificar las principales patologías en puentes de hormigón, metálicos y mixtos, así como en cimentaciones y cauces.
- Evaluar la capacidad estructural, la vida útil remanente y el riesgo mediante modelos de deterioro e índices de condición.
- Seleccionar y dimensionar estrategias de reparación, refuerzo, rehabilitación y adaptación sísmica y climática.
- Conceptualizar, diseñar e implantar sistemas de monitorización estructural (SHM) y gemelos digitales aplicados a puentes.
- Gestionar activos de puentes y viaductos a nivel de red mediante BMS, indicadores de desempeño, contratos y análisis de ciclo de vida.



-
- Aplicar checklists, formularios y casos prácticos para estructurar la toma de decisiones en proyecto, explotación e intervención estructural.

Introducción.



Puentes y viaductos en el siglo XXI: de la experiencia dispersa a la gestión profesional de la vida útil

En las últimas décadas, los puentes y viaductos han pasado de ser “obras singulares” puntuales a convertirse en una red de activos estratégicos sometidos a una presión creciente: más tráfico, mayores exigencias de seguridad, presupuestos ajustados, nuevas normativas, impacto del cambio climático y, cada vez más, la necesidad de justificar cada decisión ante gestores, auditores y ciudadanía. En España y Latinoamérica, miles de estructuras construidas entre los años 60 y 90 están entrando en una fase crítica de su vida útil, mientras que las nuevas infraestructuras incorporan tecnologías de monitorización y digitalización que exigen un perfil de profesional muy distinto al de hace tan solo una generación.

En este contexto, ya no basta con “saber calcular” o “haber visto muchas obras”. Las administraciones, concesionarias y consultoras necesitan equipos capaces de integrar proyecto, inspección, auscultación, monitorización estructural (SHM), refuerzo, gemelo digital y gestión de activos bajo un enfoque de ciclo de vida. Y, al mismo tiempo, necesitan comunicar y justificar sus decisiones con criterios técnicos, económicos y de riesgo claros, tanto ante los órganos de decisión como frente a la sociedad. La guía que tienes entre manos nace precisamente para responder a esa necesidad: ofrecer un marco práctico, estructurado y accionable que convierta el conocimiento disperso en una ventaja competitiva real para el profesional.

Esta Guía Práctica de Puentes y Viaductos: Proyecto, Monitorización e Intervención Estructural está concebida como una herramienta de trabajo para ingenieros, técnicos de conservación, gestores de activos, responsables de contratos y consultores que trabajan con puentes y viaductos a lo largo de todo su ciclo de vida. A partir de un hilo conductor claro —la gestión de la vida útil y del riesgo estructural—, la guía recorre desde los fundamentos de proyecto y normativa hasta las técnicas más recientes de SHM, gemelo digital, inteligencia artificial y modelos de ciclo de vida.



El contenido se organiza en bloques que responden a las cuestiones que un profesional se plantea en la práctica: cómo elegir la tipología estructural más adecuada, cómo trasladar los requisitos de seguridad y durabilidad al proyecto, cómo controlar la construcción y fijar el estado “cero” de referencia, cómo diseñar programas de inspección y auscultación que realmente diferencien lo urgente de lo importante, cómo interpretar patologías en hormigón y estructuras metálicas, cuándo reforzar y cuándo sustituir, cómo montar un sistema SHM que aporte valor y no solo datos, cómo gestionar una red completa de puentes con criterios de riesgo, coste de ciclo de vida y niveles de servicio, y cómo documentar todo ello con checklists y formularios listos para usar. La parte final de la guía se dedica a casos prácticos detallados que conectan estos conceptos con situaciones reales de proyecto, diagnóstico, refuerzo, monitorización y gestión a nivel de red en España y Latinoamérica.

Para el profesional del sector, el valor de esta guía va mucho más allá del repaso teórico. En un entorno en el que proliferan las herramientas, plataformas y “palabras de moda” (SHM, BIM, gemelo digital, contratos por niveles de servicio, etc.), lo que marca la diferencia es saber qué aplicar, cuándo, con qué profundidad y cómo explicarlo a quienes toman decisiones. Esta guía te ayuda a estructurar tu criterio, a ordenar tus argumentos y a convertir el conocimiento técnico en propuestas sólidas y defendibles: desde el informe de diagnóstico de un puente concreto hasta el programa de inversión plurianual de una red completa.

Los beneficios para tu práctica profesional son directos y tangibles. Podrás diseñar y justificar proyectos más robustos y optimizados en términos de vida útil, argumentar de forma convincente la necesidad de una inspección especial, una campaña de ensayos o un refuerzo determinado, plantear de manera clara alternativas entre refuerzo y sustitución basadas en coste de ciclo de vida, riesgo y niveles de servicio, y sacar partido real a los sistemas SHM y a los modelos digitales para priorizar actuaciones y reducir incertidumbre. La abundancia de checklists, formularios y ejemplos facilita la implantación de procedimientos internos, mejora la trazabilidad de las decisiones y aporta un lenguaje común dentro del equipo y con otros agentes (promotores, concesionarias, operadores, auditorías, etc.).

Al mismo tiempo, los beneficios intangibles no son menores: posicionarte como un profesional que entiende la infraestructura como un activo a gestionar, y no solo como una obra aislada; reforzar tu credibilidad ante clientes y superiores al apoyar tus recomendaciones en metodologías reconocidas; y diferenciarte en proyectos internacionales al manejar un enfoque compatible entre España y Latinoamérica. En un mercado cada vez más exigente, donde las licitaciones valoran la capacidad de aportar soluciones innovadoras pero bien justificadas, disponer de un marco sólido como el que ofrece esta guía puede marcar la diferencia entre una propuesta más y una referencia de calidad.

Esta guía no pretende sustituir a las normas ni a la experiencia de campo, sino ayudarte a integrar ambas cosas, a sistematizar la forma en que piensas y



documentas tus decisiones y a convertir cada proyecto o intervención en una oportunidad de aprender y mejorar. Por eso, te invitamos a no leerla solo “de corrido”, sino a utilizarla como manual de trabajo: ir a los capítulos que necesitas en cada momento, apoyarte en los formularios y checklists cuando prepares una inspección, un diagnóstico, un proyecto de refuerzo o un pliego de conservación, y volver a los casos prácticos cada vez que tengas que explicar a un interlocutor no especialista por qué una solución es más adecuada que otra.

Invertir tiempo y recursos en profundizar en estos contenidos es, en realidad, invertir en tu propia trayectoria profesional. Los puentes y viaductos seguirán siendo infraestructuras críticas durante décadas; la cuestión es quién estará preparado para diseñarlos, mantenerlos y gestionarlos con criterios que combinen seguridad, servicio, coste y sostenibilidad. Si aspiras a ser uno de esos profesionales, esta guía práctica está pensada para ayudarte a dar ese salto de calidad.

El siguiente paso está en tus manos: aprovechar esta herramienta para reforzar tu criterio, mejorar tus procesos y aportar más valor en cada proyecto, inspección, informe o decisión de gestión. El sector necesita profesionales que entiendan los puentes no solo como estructuras, sino como activos estratégicos que acompañar durante toda su vida útil. Esta guía quiere ser tu aliada en ese camino.