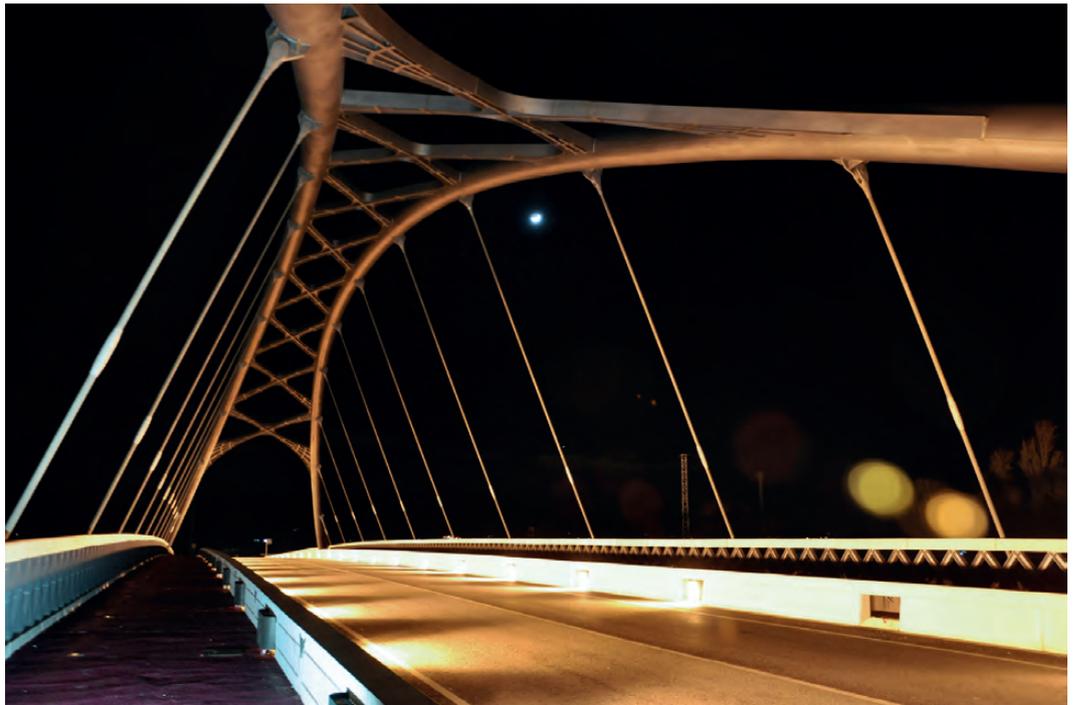


DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES

Salvador Monleón Cremades



Editorial Universitat Politècnica de València

**DISEÑO ESTRUCTURAL
DE PUENTES**

SALVADOR MONLEÓN CREMADES

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Colección *Manual de Referencia*

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados mediante el sistema *doblo ciego*, siguiendo el procedimiento que se recoge en: <http://www.upv.es/entidades/AEUPV/info/891747normalc.html>

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: MONLEÓN CREMADES, S. (2017). Diseño estructural de puentes. Valencia: Universitat Politècnica de València

Primera edición, 2017 (versión impresa)
Primera edición, 2017 (versión electrónica)

© Salvador Monleón Cremades

© Imagen de portada: Salvador Monleón Cremades: *Puente sobre el Júcar en el acceso sur de Cullera*

© 2017, Editorial Universitat Politècnica de València

distribución: Telf.: 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6361_01_01_01

ISBN: 978-84-9048-559-0 (versión impresa)
ISBN: 978-84-9048-560-6 (versión electrónica)

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

ÍNDICE

PRESENTACIÓN LISTA DE FIGURAS LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 1. Marco normativo: la IAP-11

- 1.1** Objeto y ámbito de aplicación
- 1.2** Principios generales de proyecto
 - 2.1** *Requisitos fundamentales*
 - 2.2** *Vida útil*
 - 2.3** *Criterios de comprobación*
 - 2.4** *Clasificación de las acciones*
- 1.3** Acciones permanentes
 - 3.1** *Acciones permanentes de valor constante (G)*
 - 3.2** *Acciones permanentes de valor no constante (G*)*
- 1.4** Acciones variables (Q)
 - 4.1** *Sobrecarga de uso*
 - 4.2** *Viento*
 - 4.3** *Acción térmica*
 - 4.4** *Nieve*
 - 4.5** *Otras acciones variables*
- 1.5** Acciones accidentales (A)
 - 5.1** *Impactos*
 - 5.2** *Acción sísmica (A_E)*
 - 5.3** *Otras acciones accidentales*
- 1.6** Bases para la combinación de acciones
 - 6.1** *Valores representativos de las acciones*
 - 6.2** *Valor de cálculo de las acciones*
 - 6.3** *Combinación de acciones*

ii DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES

1.7 Criterios para la comprobación de estados límite de servicio

7.1 *Criterios funcionales relativos a flechas*

7.2 *Criterios funcionales relativos a vibraciones*

1.8 Pruebas de carga

Bibliografía

CAPÍTULO 2. Puentes viga

2.1 Introducción

2.2 Morfología de puentes viga

2.2.1 *Introducción*

2.2.2 *Puentes viga de hormigón pretensado*

2.2.3 *Puentes viga metálicos y mixtos*

2.3 Diseño de puentes viga

2.3.1 *Introducción*

2.3.2 *Puentes viga de hormigón pretensado*

2.3.3 *Puentes viga metálicos y mixtos*

2.4 Consideraciones sobre las subestructuras

2.5 Modelado estructural de puentes viga

2.5.1 *Introducción: consideraciones generales sobre modelos globales y locales*

2.5.2 *Arrastre de cortante, torsión y distorsión de tableros de pared delgada*

2.5.3 *Secciones mixtas y paredes reticuladas*

2.5.4 *Modelos de elementos finitos: topología, parámetros mecánicos y matrices de rigidez*

2.5.5 *Puentes oblicuos y puentes curvos*

Bibliografía

CAPÍTULO 3. Puentes arco

3.1 Introducción

3.2 Morfología de puentes arco

3.2.1 *Introducción*

3.2.2 *Puentes arco metálicos*

3.2.3 *Puentes arco de hormigón*

3.2.4 *Conclusiones*

3.3 Diseño de puentes arco

3.3.1 *Introducción: aspectos generales del diseño*

3.3.2 *Sección transversal de los arcos*

3.3.3 *Tecnología de péndolas*

3.4 Modelado estructural de puentes arco

3.4.1 *Introducción: consideraciones generales sobre modelos globales y locales. Análisis lineal VS no lineal*

3.4.2 *Modelado de piezas curvas*

3.4.3 *La viga columna y la viga tirante*

3.4.4 *Análisis no lineal de puentes arco metálicos y mixtos en el marco de la EAE-11 y los Eurocódigos*

Bibliografía

CAPÍTULO 4. Puentes atirantados

- 4.1** **Introducción**
- 4.2** **Morfología de puentes atirantados**
 - 4.2.1 *Introducción*
 - 4.2.2 *Puentes con tirantes aislados y tablero metálico*
 - 4.2.3 *Puentes con atirantamiento múltiple y tablero metálico o mixto*
 - 4.2.4 *Puentes atirantados con tablero de hormigón*
 - 4.2.5 *Cuadro resumen*
- 4.3** **Diseño interactivo atirantamiento-torres-tablero**
 - 4.3.1 *Introducción: disposiciones generales*
 - 4.3.2 *Torres: formas y materiales*
 - 4.3.3 *Sección transversal del tablero*
 - 4.3.4 *Predimensionamiento de los tirantes*
 - 4.3.5 *Tecnología de tirantes y sistemas de anclaje*
- 4.4** **Modelado estructural de puentes atirantados**
 - 4.4.1 *Introducción: consideraciones generales sobre modelos globales y locales*
 - 4.4.2 *Modelado de los tirantes*
 - 4.4.3 *Análisis lineal VS no lineal de puentes atirantados*

Bibliografía**ANEXOS**

ANEXO A. Características estáticas de las secciones**ANEXO B. Rigidización de chapas de acero**

PRESENTACIÓN

El objetivo de estas primeras líneas es simplemente intentar justificar este trabajo. En definitiva ¿Por qué escribir este texto sobre puentes, situado a mitad de camino entre la tipología y el análisis? La pregunta podría resultar trivial si enfocamos su respuesta hacia el marco docente y más concretamente hacia el Master Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (MUICCP), pero se estaría cometiendo un error. Es cierto que dentro de la *Intensificación en Ingeniería Estructural* de esta titulación existe una asignatura denominada *Diseño Estructural de Puentes*, pero no he pretendido crear una herramienta de apoyo para impartir esta materia. El proceso ha sido muy diferente: con el nuevo plan de estudios apareció la oportunidad de impulsar la evolución de la asignatura de *Modelización y Análisis de Puentes* hacia contenidos más creativos, necesidad detectada a lo largo de los once años que impartí esta asignatura y justificada por la sólida formación en análisis estructural que proporciona el MUICCP (*Teoría Avanzada de Estructuras, Mecánica Computacional de Sólidos, Ingeniería Computacional de Estructuras*). Como consecuencia de ella se planteó un nuevo perfil formativo en cuyo desarrollo se evidenció la ausencia de bibliografía específica, directamente orientada a proporcionar al ingeniero criterios y herramientas simples para iniciar el proyecto estructural del puente más allá de su diseño conceptual inicial. Por ello, este libro va principalmente dirigido a ingenieros *junior*, arquitectos y alumnos de postgrado, aunque espero que por la selección temática y la originalidad de las ilustraciones, este también despierte el interés de profesionales ya formados en la materia.

Sin embargo, la tarea no resulta fácil. Es relativamente sencillo explicar los métodos de análisis de estructuras, como ocurría hace ya más de cuatro décadas con los métodos gráficos para estructuras articuladas (Cremona-Maxwell, Williot) o el método de Cross o de Kani para entramados reticulares, y a posteriori ha sucedido con el análisis matricial y el método de los elementos finitos, con sus aplicaciones al cálculo estático, al estudio de la estabilidad inicial o al análisis modal, en el ámbito del cálculo lineal. Lo complicado es esperar que, además de dominar los métodos de análisis, se esté adecuadamente preparado para avanzar en el campo de la creación estructural. Esta materia resulta bastante más difusa, mucho más compleja de introducir y desarrollar¹⁶. Apela a nuevas cualidades más allá del estudio y la práctica, más singulares todavía si encima se pretende conseguir resultados originales. Este texto no propone fórmulas o recetas para obtener éxito en este campo; no las hay. Lo que sí busca es proporcionar un entorno adecuado, crear sensibilidad para detectar las claves de todo diseño estructural y afrontarlo con probabilidades de éxito, que siempre se apoyarán en el conocimiento y estudio crítico de lo construido, complementado por la comprensión de los mecanismos resistentes que lo sustentan, junto con un buen conocimiento del estado de la tecnología.

A continuación se formulan tres preguntas directamente enfocadas al trinomio puente-estructura-estética, clave en nuestro planteamiento. Estas cuestiones no conectan de forma nítida con los objetivos prácticos de esta obra, pero sí tienen que ver con ese *entorno* o *sensibilidad* mencionados en el párrafo anterior. Es obvio que el éxito del diseño estructural se mide en términos de economía y las disposiciones consolidadas por la práctica tienen todo ese origen, pero el éxito global de la obra no puede reducirse a la reproducción de unas cuantas reglas, también requiere cultura e intuición.

- I. *¿Desde cuándo la estética preocupa al ingeniero civil contemporáneo?, ¿desde cuándo ésta condiciona su trabajo y por qué?*

Honestamente, creo que todos tenemos claro que este cambio de mentalidad se produce con la intrusión de los arquitectos estrella —*Arquistars*— en el ámbito de los puentes (Santiago Calatrava Valls, Marc Mimram, Sir Norman Foster, etc.). Estas obras siempre han ejercido una fuerte atracción sobre el colectivo de arquitectos, por su alta carga místico-simbólica (salvar el obstáculo *infranqueable*, enfrentarse al reto de las grandes luces...) y por sintetizar perfectamente el dominio de la técnica constructiva y de las formas resistentes, como lo hicieron Gaudí, Maillart, Torroja, Freyssinet o Nervi.

- II. *¿Es un puente una obra de arte?*

En mi opinión esto es un fenómeno de tipo causa-efecto. En todas las obras del siglo de oro de los puentes (1850-1950) primero está la obra de ingeniería y después el público (profano) o los críticos de arte (expertos) descubren en ella lo artístico, porque ha mejorado su vida, material y sobre todo intelectual, por el placer que les aporta contemplarla y porque algo de ella les pertenece. De ahí que en la actualidad, lo que demanda la sociedad, con lo laminador, aplanador o promediador que es el concepto de masa social, son obras que embellezcan su vida, demasiado gris. En Francia, históricamente a los puentes se les ha llamado *Ouvrages d'Art* (obras de arte, así se titulaba la correspondiente asignatura en la ENPC), por algo será...

- III. *¿Se hace arte con los puentes?*

Creo sinceramente que este nunca debe ser el objetivo buscado, pero siempre el resultado deseado. El Firth of Forth de Baker y Fowler (1890, próximo al aeropuerto de Edimburgo) es el más crudo ejemplo de que no se hace arte con los puentes, de que el ingeniero no actúa por motivación artística. Busca soluciones eficientes a problemas cotidianos, que en ocasiones adquieren dimensiones colosales, como en el caso en cuestión. Billington^{3,4,5,6,7}, el gran *Voyeur*, se equivoca en la apreciación de la obra de algunos ingenieros, tomando partido abiertamente por el suizo Robert Maillart, en detrimento de su contemporáneo, el francés Eugène Freyssinet, al consignar en el primero la esencia del arte estructural, cuando el segundo fue realmente un precursor, demostrando un dominio absoluto de las formas resistentes y de las técnicas constructivas en los hangares de Orly o en el puente de Plougastel. Este es el típico posicionamiento del crítico de arte, que nunca se ha enfrentado al hecho creativo y que centra su legado en la voluntad de acuñar un concepto (el arte estructural en este caso) y una norma (a nadie se le escapa el paralelismo voluntariamente deseado por David Billington entre su *EEE-eficiencia/economía/elegancia* y el *FFF-form/follows/function* de Sullivan o el *Less is More* de Mies van der Rohe). Jean Rodolphe Perronet, Thomas Telford, Isambard K. Brunel, John A. Roebling, Othmar H.

Ammann, Eugène Freyssinet, Ulrich Finsterwalder o Javier Manterola y también Robert Maillart fueron los grandes constructores de puentes, los artistas si se desea, pero en sus objetivos nunca figuró hacer arte.

Nace entonces una cuarta pregunta:

IV. *¿Está reñida la ética con la estética?*

Aquí nos enfrentamos a un problema esencialmente coyuntural. La crisis económica que azota a los países desarrollados en la segunda década del siglo XXI ha producido sin ninguna duda un replanteamiento de los proyectos estrella, y de la aproximación al diseño de los puentes en particular. La sociedad ha pasado a mirar más por sus intereses económicos, a reivindicar rendimiento por sus impuestos, a frivolarizar menos con las grandes obras públicas. La ética ha pasado, afortunadamente, a filtrar las decisiones en esta materia. Ética y estética deben conjugarse, nunca disociarse.

A continuación enunciaremos tres cuestiones conectadas con el diseño de puentes en general, aunque dentro de este nos interese en particular lo estructural:

A. *El factor escala.*

Del detalle a las proporciones, del micro al macro, del usuario (peatón-urbanita) al viajero (coche, tren, barco o avión), entre todos estos factores se produce una apreciación diferente de la obra, debido al *zoom* con el que esta se aprecia. Estos conceptos conectan perfectamente con el punto siguiente.

B. *El puente y el paisaje o el puente y la ciudad*

Para Javier Manterola^{10,11,12,13} el puente enriquece el paisaje, o al menos eso debe pretender. Sin embargo, esta loable voluntad no siempre tiene sentido. El viaducto de Sfalassa, de Silvano Zorzi, nunca enriqueció el paisaje, *no queda bien en las postales*, pero es eficiente (económico, funcional, etc.) y es todavía record del mundo en pódicos en pi. Sucede que en la mayoría de los casos, el usuario del puente no puede disfrutar de su vista, salvo que el trazado se diseñe para ello, como en el caso del viaducto de Millau, de planta serpenteante. ¿Tiene entonces sentido ir más allá de lo estrictamente funcional y económico?

El puente urbano tiene un papel diferente, se integra siempre en los itinerarios de los peatones, que sí están en el nivel micro. Por ello en estas obras la calidad de los materiales, los detalles y las formas adquieren preponderancia.

C. *La fotografía, el usuario y el espectador, la escenografía o el puente escenario del paisaje*

Resulta interesante contrastar la imagen de un puente, que por ejemplo podemos observar en un libro, con la percepción del mismo que pueden tener sus usuarios, sean estos peatones, automovilistas, etc., o un senderista, que disfruta del paisaje en general y de la vista de la estructura en particular. Claro que estos últimos son una minoría y, en algunas ocasiones, unos privilegiados. En contraposición con estas valoraciones, aparece el puente balcón/mirador, generalmente en los puentes urbanos. La obra proporciona

entonces la posibilidad de contemplar de forma diferente el entorno, la ciudad. Pienso en el puente de Clifton por ejemplo, o en todos los puentes de Manhattan.

Hablemos ahora del futuro, de los puentes del siglo XXI¹⁴. Sabido es que un puente es una construcción que permite salvar un obstáculo físico natural o artificial, ya sea un valle, un río o una vía férrea... Un puente no deja de ser un punto de sutura que cierra una *herida*, que permite unir algo que estaba o va a estar separado, inconexo. Tradicionalmente el ingeniero civil (en España los Ingenieros de Caminos) ha sido el encargado de afrontar la concepción formal y el análisis resistente de estas construcciones, algunas veces imponentes y en otras ocasiones más discretas, dependiendo de las características físicas de su ubicación. Y en general su formación, marcadamente cartesiana, ha condicionado la manera de aproximarse a este proceso.

En el momento en que uno se plantea abordar el diseño de un puente hay que tener en cuenta tanto su función futura como las características del emplazamiento escogido y nunca se debe olvidar su coste final. Del segundo aspecto deriva la gran variedad de soluciones que podemos encontrar pese a estar hablando del mismo problema. Sin embargo la ciudad plantea una situación singular y nos brinda, tomando por cercanía el caso de Valencia, ejemplos contemporáneos tan dispares como el Pont del Regne, con un planteamiento marcadamente historicista, el Puente de las Flores, convencional y urbano, o la Pasarela de la Exposición, de aspecto más sofisticado. Una situación similar se produce en la vecina villa de Cullera, donde sus dos nuevos puentes, el del acceso sur recientemente inaugurado, elegante y delicado pero de gran novedad constructiva, y el de la Vega, claro tributo a la prefabricación más radical, contrastan en todas sus dimensiones. Y así se podrían citar numerosos ejemplos, elevando el debate más allá de lo funcional e incorporando al mismo la arquitectura de la ciudad o el compromiso entre utilidad y patrimonio histórico.

Desde una perspectiva tecnológica, estamos viviendo una época de decadencia en lo que a ingeniería de puentes se refiere. Básicamente se sigue trabajando con los materiales del siglo pasado: el hormigón, armado y pretensado, o el acero. Por ello, tras varias décadas de práctica con estos materiales y con las actuales posibilidades de análisis, sus límites resistentes y el catálogo de tipologías competentes han quedado claramente establecidos, y hoy en día el problema estructural es un debate completamente superado en la mayoría de los proyectos que a diario se abordan. Esta nueva situación unida a la disponibilidad de recursos económicos para grandes proyectos ha conducido a un punto en el que el puente, objeto históricamente admirado por su alta carga o significado tensional, ha dejado de concebirse como una obra casi exclusivamente funcional y resistente, como un mero instrumento de conexión, cediendo el protagonismo a lo puramente formal. Lógicamente, el cambio sólo puede producirse en un marco diferente al actual, donde la magnitud del problema estructural o la economía en el sentido amplio requieran recurrir a nuevos materiales que a su vez exijan desarrollar formas o sistemas resistentes hasta ahora desconocidos, junto con los métodos de construcción que permitan materializarlos. Esta nueva situación volverá a requerir el esfuerzo de profesionales formados en estas materias, como lo son los ingenieros civiles, históricamente al frente de la evolución de las grandes infraestructuras en general y de los puentes en particular, liderando grupos de trabajo multidisciplinarios que asuman el diseño y la ejecución de las estructuras inteligentes del futuro, adaptables a las características evolutivas del tráfico o de las acciones naturales, como el viento, el agua o los sismos.

Volviendo al propio contenido del libro, el primer capítulo se dedica a comentar la normativa vigente en nuestro país sobre acciones en puentes de carretera, es decir la **IAP-11**. Consiste en un repaso ordenado de las partes más características de su contenido, que se detiene en los aspectos que requieren alguna ilustración práctica —como en el caso de los modelos de carga definidos para representar la acción del tráfico rodado—, o aclaración teórica —como en la evaluación de los efectos aeroelásticos—.

El segundo capítulo aborda el diseño de tableros viga. Comienza por una presentación morfológica de los puentes viga de hormigón, metálicos o mixtos, entrando seguidamente en su pre-diseño general y en algunas consideraciones sobre la concepción de las subestructuras, para continuar con material más *duro*, como es el modelado estructural. Para este último, tras unas consideraciones generales sobre modelos globales y locales, se exponen y cuantifican los fenómenos de arrastre de cortante, torsión y distorsión de tableros de pared delgada. El tema se completa con el tratamiento de las secciones mixtas, las paredes reticuladas, los modelos de elementos finitos y las peculiaridades del modelado de los puentes oblicuos o curvos. Este capítulo se complementa con los dos anexos, pero su sombra es alargada y alcanza las tipologías más sofisticadas tratadas posteriormente en lo relativo a diseño del tablero.

Los capítulos tres y cuatro presentan sistemas estructurales más complejos: los puentes arco y los puentes atirantados. Ambos tienen una organización y contenido muy similar, aunque también complementario. Se inician con la descripción morfológica de algunas obras características, cuidadosamente seleccionadas en base a su material constitutivo o su configuración estructural. Esta sección viene seguida de algunos elementos para el diseño, que incluyen información compartida sobre tableros y tecnología de péndolas y tirantes. Ambos capítulos se cierran con una sección dedicada al modelado estructural, en la que se hace particular incidencia en los aspectos singulares de estos sistemas, como la curvatura y el comportamiento no-lineal de los elementos esbeltos.

Valencia, septiembre de 2016

Salvador Monleón Cremades

Catedrático de Universidad

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Universitat Politècnica de València

BIBLIOGRAFÍA

1. Addis, W., *"The Art of the Structural Engineer"*, Artemis, London (1994)
2. Arnau Amo, J. y Songel González, J.M., *"La Estética en la Ingeniería: ¿materia pertinente o impertinente?"*, Revista de Obras Públicas N° 3.510, Mayo 2010
3. Billington, D.P., "Robert Maillart and the Salginatobel Bridge, Switzerland", *Structural Engineering International*, Vol. 1, N° 4 (1991)
4. Billington, D.P., *"Robert Maillart's bridges, the art of engineering"*, Princeton University Press (1979)
5. Billington, D.P., *"Robert Maillart and the art of reinforced concrete"*, Architectural History Foundation & Massachusetts Institute of Technology (1990)
6. Billington, D.P., *"The art of structural design: a swiss legacy"*, Princeton University Art Museum (2003)
7. Billington, D.P., *"La torre y el puente. El nuevo arte de la ingeniería estructural"*, Cinter Divulgación Técnica (2013)
8. Mainstone, R.J., *"The springs of invention revisited"*, *The Structural Engineer*, Vol. 73, N° 22/21 November 1995
9. Mainstone, R.J., *"Developments in Structural Form"*, The Architectural Press, Oxford (1998)
10. Manterola Armisén, J., *"Arquitectos-Ingenieros, el futuro de los puentes"*, Revista de Obras Públicas N° 3.366, Junio 1997
11. Manterola Armisén, J., *"He creado una relación interior con los puentes"* y *"El paisaje mejora con la geometría"*, El País (09/04/2003 y 28/06/2003)
12. Manterola Armisén, J., *"Javier Manterola Armisén: pensamiento y obra"*, Fundación Esteyco (2004)
13. Manterola Armisén, J., *"La obra de ingeniería como obra de arte"*, Ed. Laetoli (2010)
14. Monleón Cremades S., *"Puentes del Siglo XXI: los nuevos desafíos"*, Las Provincias (18/05/2008)
15. Sanz Balduz, L.J., *"El Grial Estructural"*, Revista de Obras Públicas N° 3.444, Mayo 2004
16. Schlaich, J., *"Can conceptual design be taught?"*, *The Structural Engineer*, Vol. 70, N° 9/5 May 1992
17. Torroja, E., *"Razón y ser de los tipos estructurales"*, C.S.I.C. 7ª Ed. (1991)
18. Virlogeux, M., *"Sobre la estructura y la arquitectura de los puentes"*, Revista de Obras Públicas N° 3.349, Diciembre 1995

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 4.1-a** Ejemplo genérico de distribución de carriles virtuales (*ilustración del autor según IAP-11*)
- Figura 4.1-b** Distribución de vehículos pesados y sobrecarga uniforme (*ilustración del autor según IAP-11*)
- Figura 4.1-c** Disposición de vehículos pesados para comprobaciones locales (*ilustración del autor según IAP-11*)
- Figura 4.1- α** Distribución longitudinal de cargas de tráfico para el cálculo global (*ilustración del autor*)
- Figura 4.1- β** Distribución transversal de cargas de tráfico para el cálculo global (*ilustración del autor*)
- Figura 4.1- γ** Distribución de cargas de tráfico para el cálculo transversal (*ilustración del autor*)
- Figura 4.1- δ** Distribución de cargas de tráfico para el cálculo transversal (*ilustración del autor*)
- Figura 4.1-d** Tren de cargas para la comprobación del estado límite de fatiga (*ilustración del autor según IAP-11*)
- Figura 4.2-a** Velocidad básica fundamental del viento (*ilustración de la IAP-11*)
- Figura 4.2-b** Coeficientes de fuerza (*ilustración del autor según la IAP-11*)
- Figura 4.3-a** Isotermas de la temperatura máxima anual del aire, T_{max} [°C] (*ilustración de la IAP-11*)
- Figura 4.3-b** Zonas climáticas de invierno (*ilustración de la IAP-11*)

Capítulo 2

- Figura 2.1** El puente de Bendorf (*imagen de Damian Morcinek, en Rhein-Zeitung, 21-08-2014*)
- Figura 2.2** El puente de Saint-Cloud (*imagen tomada de "Brücken-Bridges, aesthetics and design", p. 167. Leonhardt, F., The Architectural Press-1982; ilustración del autor*)
- Figura 2.3** El puente de Felsenau (*imagen de Nicolas Janberg, structurae.net, ID 146871; ilustración del autor*)
- Figura 2.4** El viaducto del lago Gruyère (*imagen tomada "Brücken-Bridges, aesthetics and design", p. 185. Leonhardt, F., The Architectural Press-1982; ilustración del autor*)

- Figura 2.5** El puente de Clichy (*imagen de karl-gotsch.de; ilustración del autor*)
- Figura 2.6** Los puentes de Gateway (*imágenes de couriermail.com.au, 24-05-2011, y structurae.net, ID 250560*)
- Figura 2.7** El puente de Kerplouz (*imágenes de structurae.net, ID 110536, y Noël Richet, en photos.planete-tp-plus.com; ilustración del autor*)
- Figura 2.8** El puente sobre el Truyère (*imágenes de Nicolas Janberg, structurae.info, ID 168836, 168839, 168842, y Demathieu et Bard, ID 1027*)
- Figura 2.9** El puente de Tanus (*imágenes de highestbridges.com; ilustración del autor*)
- Figura 2.10** El puente Kennedy (*imágenes tomadas de yelp.it y editde.grontmij.com, imagen de sanderz tomada de panoramio.com, ID 60209178, imágenes tomadas de staedte-fotos.de y bonnbeuel.de*)
- Figura 2.11** El puente de Schierstein (*imágenes tomadas de "Brücken-Bridges, aesthetics and design", p. 157. Leonhardt, F., The Architectural Press-1982, Blue Cap tomada de panoramio.com, ID 3560421, y de Fredrik von Erichsen tomada de fnp.de*)
- Figura 2.12** El puente de Nantenbach (*imágenes de Karl Gotsch y Heiko Dassow tomadas de structurae.net, ID 18902 y 54343, Heinz Nievelev tomada de panoramio.com, ID 75757704, y unterfranke.blogspot.com*)
- Figura 2.13** El viaducto de Martigues (*imágenes de Philip Bourret, Jacques Mossot y Nicolas Janberg tomadas de structurae.net, ID 31868, 41734 y 703, y de flickriver.com*)
- Figura 2.14** El puente del Milenario (*imágenes tomadas de "Puentes, Estructuras, Actitudes", pp. 54-55-56. Martínez Calzón, J., Turner-2006*)
- Figura 2.15** La pasarela de la Cartuja (*imagen tomada de mapio.net; ilustración del autor*)
- Figura 2.16** El puente del Zoo (*imágenes tomadas de commons.wikimedia.org y thecoastalpath.net*)
- Figura 2.17** Evolución de la sección transversal en puentes viga (*ilustración del autor*)
- Figura 2.18** Formas en un tablero con altura variable y almas inclinadas, el puente del Tanus (*imágenes skyscrapercity.com y Jacques Mossot tomada de structurae.net, ID 3842*)
- Figura 2.19** Secciones transversales más usuales en puentes mixtos (*ilustración del autor*)
- Figura 2.20** Ejemplos Franceses de puentes mixtos bi-jácena (*imágenes tomadas de "Ponts mixtes acier-béton: guide de conception durable", pp. 34-35. SETRA, M.E.E.D.M.-2010*)
- Figura 2.21** Sección tipo de un tablero mixto bi-jácena con riostras (*ilustración del autor*)
- Figura 2.22** Sección tipo de un tablero mixto bi-jácena con vigas de piso y cuchillos (*ilustración del autor*)
- Figura 2.23** Sección tipo de un tablero mixto bi-jácena con vigas de piso, sin cuchillos (*ilustración del autor*)
- Figura 2.24** Ejemplo de puente mixto bi-jácena en cajón con jabalcones: viaducto de Verrières (*imágenes de Adrien Mortini y Jacques Mossot tomadas de structurae.net, ID 58199 y 14725*)
- Figura 2.25** Sección tipo de un tablero mixto en cajón básico (*ilustración del autor*)
- Figura 2.26** Sección tipo de un tablero mixto en cajón con vigas de piso y cuchillos (*ilustración del autor*)
- Figura 2.27** Sección tipo de un tablero mixto en cajón con jabalcones (*ilustración del autor*)
- Figura 2.28** Detalles constructivos de las secciones mixtas tipo bi-jácena (*ilustración del autor*)
- Figura 2.29** Riostras sobre apoyos en bi-jácenas con riostras interiores (*ilustración del autor*)

- Figura 2.30** (a) Riostras sobre apoyos y (b) detalles del armazón metálico de los tableros bi-jácena con vigas de piso (*ilustraciones del autor; imágenes tomadas de "Ponts mixtes acier-béton: guide de conception durable", p. 69. SETRA, M.E.E.D.M.-2010*)
- Figura 2.31** Detalles constructivos de las secciones mixtas en cajón sin entrevigado y con vigas de piso (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.32** Detalles constructivos de las secciones mixtas en cajón con vigas de piso (*ilustración del autor*)
- Figura 2.33** Equipos móviles completos para tablero bi-jácena con riostras interiores (*ilustración del autor; imágenes tomadas de "Ponts mixtes acier-béton: guide de conception durable", pp. 136-137-138. SETRA, M.E.E.D.M.-2010*)
- Figura 2.34** Elementos prefabricados de ancho total (*imágenes tomadas de "Ponts mixtes acier-béton: guide de conception durable", p. 139. SETRA, M.E.E.D.M.-2010 ; ilustración del autor*)
- Figura 2.35** Juntas entre elementos prefabricados de ancho total mediante prolongación de la pieza en pico de flauta (*imágenes tomadas de "Ponts mixtes acier-béton: guide de conception durable", pp. 139-140. SETRA, M.E.E.D.M.-2010*)
- Figura 2.36** Elementos prefabricados parciales (*imágenes tomadas de "Ponts mixtes acier-béton: guide de conception durable", p. 140. SETRA, M.E.E.D.M.-2010 ; ilustración del autor*)
- Figura 2.37** Ejecución de la losa mediante prelosas de HA no-colaborantes (*ilustración del autor*)
- Figura 2.38** Ejecución de la losa mediante prelosas de hormigón colaborantes (*ilustración del autor*)
- Figura 2.39** Diferentes tipos de prelosas de hormigón (*imágenes tomadas de "Ponts mixtes acier-béton: guide de conception durable", p. 141. SETRA, M.E.E.D.M.-2010*)
- Figura 2.40** Ejemplos de encofrados mediante chapa grecada en puentes mixtos (*imágenes tomadas de "Ponts mixtes acier-béton: guide de conception durable", p. 140. SETRA, M.E.E.D.M.-2010 y del autor*)
- Figura 2.41** Remate de la arista en un puente de la RCE (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.42** Remate de la arista en un puente de la RCE con conducciones exteriores al tablero (*ilustración del autor*)
- Figura 2.43** Remate de la arista del puente sobre el río Turia, entre Manises y Paterna (*ilustración del autor*)
- Figura 2.44** Remate de la arista del viaducto de la línea T2 del Metro de Valencia (*ilustración del autor*)
- Figura 2.45** Ejemplo de piso ortótropo: la pasarela de La Barqueta en Sevilla (*ilustración del autor*)
- Figura 2.46** Rigidizadores cerrados propuestos en la RPM-95 (*ilustración del autor*)
- Figura 2.47** Segmento de losa ortótropa y geometría y cargas del vehículo pesado de la Instrucción (*ilustración del autor*)
- Figura 2.48** Sección longitudinal de la losa ortótropa y flexión de un rigidizador longitudinal debida a la acción del vehículo pesado de la Instrucción IAP-11 (*ilustración del autor*)
- Figura 2.49** Pilas de puentes de hormigón ejecutados in situ (*imágenes de highestbridges.com, datajembatan.com y Nicolas Janberg tomada de structurae.net, ID 146870*)

- Figura 2.50** Pilas de puentes de hormigón de dovelas prefabricadas y mixtos (*imágenes de mc2.es y Jacques Mossot, y Adrien Mortini tomadas de structurae.net, ID 3223 y 58199*)
- Figura 2.51** Pilas de puentes mixtos Franceses (*imágenes tomadas de "Ponts mixtes acier-béton: guide de conception durable", pp. 34-35. SETRA, M.E.E.D.M.-2010*)
- Figura 2.52** Secciones transversales más usuales en puentes susceptibles de ser modelizados como viga única (*ilustración de autor*)
- Figura 2.53** Descomposición de la acción de las cargas de tráfico (*ilustración del autor*)
- Figura 2.54** Modelo EF híbrido para el viaducto de la línea T2 del metro de Valencia (*ilustración del autor*)
- Figura 2.55** Forma típica de la sección transversal de las vigas en cajón unicelular (*ilustración del autor*)
- Figura 2.56** El modelo lámina plegada (2D) y sus coordenadas naturales (*ilustración del autor*)
- Figura 2.57** Solicitación simétrica: tensiones normales previstas por el estado membrana de la lámina plegada y por la teoría de vigas (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.58** Solicitación antisimétrica: tensiones normales previstas por el estado membrana de la lámina plegada y por la teoría de vigas (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.59** Geometría de la sección transversal de la viga monocelular objeto del estudio (*ilustración del autor*)
- Figura 2.60** Visualización de los momentos flectores en las almas para la sollicitación simétrica (*ilustración del autor*)
- Figura 2.61** Momentos flectores y esfuerzos de membrana longitudinales en la sección central de la pieza (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.62** Visualización de flectores y cortantes en las almas, sollicitación antisimétrica (*ilustración del autor*)
- Figura 2.63** Momentos torsores y esfuerzos de membrana longitudinales en la sección central de la pieza (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.64** Acción asimétrica que induce flexión y torsión simultáneamente (*ilustración del autor*)
- Figura 2.65** Esfuerzos de membrana longitudinales en la sección central de la pieza (*ilustración del autor*)
- Figura 2.66** Anchos eficaces en la losa superior de un tablero continuo con sección en cajón (*ilustración del autor*)
- Figura 2.67** Longitudes efectivas en vanos de tableros continuos (*imagen tomada de "Tierra sobre el agua", p. 70. Fernández Troyano, L., Colegio de I.C.C.P.-1999*)
- Figura 2.68** Alabeos como desplazamientos iniciales del estado membrana, que inducen flexión de cada pared en su plano (*ilustración de autor*)
- Figura 2.69** Desplazamientos en sección transversal como desplazamientos iniciales del marco que inducen la flexión transversal (*ilustración del autor*)
- Figura 2.70** Acción externa de distorsión originada por una densidad lineal de torsores (*ilustración del autor*)
- Figura 2.71** Geometría de la sección transversal de una viga en cajón unicelular de hormigón (*ilustración del autor*)
- Figura 2.72** Geometría de la sección transversal de una viga en cajón monocelular mixta (*ilustración de autor*)

- Figura 2.73** Forma de la distribución de tensiones normales sobre la sección transversal (*ilustración del autor*)
- Figura 2.74** Forma de las distribuciones del alabeo unitario de distorsión y de su derivada, sobre la fibra media de la sección transversal (*ilustración del autor*)
- Figura 2.75** Distorsión libre de flexiones transversales, geometría deformada de la celda (*ilustración del autor*)
- Figura 2.76** Resultante de las tensiones normales en losa superior (*ilustración del autor*)
- Figura 2.77** Esfuerzos de membrana N_{xs} en la losa superior y su resultante (*ilustración del autor*)
- Figura 2.78** Distribución de esfuerzos de membrana N_{xs} y sus resultantes en cada elemento de la sección transversal (*ilustración del autor*)
- Figura 2.79** Flexión transversal: deformada inicial efectiva de la celda (*ilustración del autor*)
- Figura 2.80** Diagrama de sólido libre para la evaluación de la interacción estática de las respuestas membrana y marco (*ilustración del autor*)
- Figura 2.81** Variación del factor de bicortante en función de la luz L para la sección estándar (*ilustración del autor*)
- Figura 2.82** Distorsión, intensidad de alabeo, bicortantes y bimomentos para momento torsor puntual en una pieza simplemente apoyada (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.83** Distorsión, intensidad de alabeo, bicortantes y bimomentos para momento torsor repartido en una pieza simplemente apoyada (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.84** Distorsión, intensidad de alabeo, bicortantes y bimomentos para momento torsor puntual en una pieza biempotrada (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.85** Distorsión, intensidad de alabeo, bicortantes y bimomentos para momento torsor repartido en una pieza biempotrada (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.86** Diafragma continuo en una viga mixta (*ilustración del autor*)
- Figura 2.87** Marco triangulado en una viga mixta (*ilustración del autor*)
- Figura 2.88** Marco tipo pórtico en una viga mixta (*ilustración del autor*)
- Figura 2.89** Variación del factor de rigidez relativa viga-diafragma en función de la luz para la sección metálica estándar (*ilustración del autor*)
- Figura 2.90** Distorsión y bimomentos de una viga monocelular con diafragmas a tercios de la luz (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.91** Distorsión para una viga monocelular con factores de bicortante $\alpha=0$ y 0.004 (*ilustración del autor*)
- Figura 2.92** Acciones consideradas en el estudio sobre control de la distorsión de vigas rectas con sección unicelular constante (*ilustración del autor*)
- Figura 2.93** Puntos de cálculo de tensiones longitudinales (*ilustración del autor*)
- Figura 2.94** Esbeltez de distorsión de un tablero de hormigón de sección estándar (*ilustración del autor*)
- Figura 2.95** Disipación de la distorsión en un tablero de hormigón de sección estándar simplemente apoyado (*ilustración del autor*)
- Figura 2.96** Disipación de la distorsión en un tablero de hormigón de sección estándar biempotrado (*ilustración del autor*)
- Figura 2.97** Cuantificador de la distorsión en un tablero de hormigón de sección estándar (*ilustración del autor*)
- Figura 2.98** Disipación de la distorsión en un tablero metálico o mixto de sección estándar simplemente apoyado (*ilustración del autor*)

xviii DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES

- Figura 2.99** Disipación de la distorsión en un tablero metálico o mixto de sección estándar biempotrado (*ilustración del autor*)
- Figura 2.100** Esbeltez de distorsión de un tablero metálico o mixto de sección estándar (*ilustración del autor*)
- Figura 2.101** Cuantificador de la distorsión en un tablero metálico o mixto de sección estándar (*ilustración del autor*)
- Figura 2.102** Bimomentos de distorsión en un tablero mixto simplemente apoyado con cuatro diafragmas interiores (*ilustración del autor*)
- Figura 2.103** Bimomentos de distorsión en un tablero mixto biempotrado con cuatro diafragmas interiores (*ilustración del autor*)
- Figura 2.104** Coordenadas de la sección transversal para la torsión (*ilustración del autor*)
- Figura 2.105** Rotación, intensidad de alabeo, bicortante y bimomento para momento torsor puntual en una pieza simplemente apoyada (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.106** Densidad de bicortante en una viga simplemente apoyada para distintos tipos de sollicitación y variación continua de la esbeltez torsional. Definición de los **dominios de la torsión** (*ilustración del autor*)
- Figura 2.107** Esbeltez de torsión de un tablero de hormigón y metálico o mixto, de sección estándar (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.108** Espesor equivalente para retícula en K y en cruz de San Andrés (*ilustraciones del autor*)
- Figura 2.109** Materialización del modelo Puente Viga (*ilustración del autor*)
- Figura 2.110** Vista lateral de un aparato de apoyo de neopreno zunchado (*ilustración del autor*)
- Figura 2.111** Algunas secciones de tableros susceptibles de ser modelizados como (*ilustración del autor*)
- Figura 2.112** Sección transversal de una losa aligerada de ala ancha múltiplemente conexas (*ilustración del autor*)
- Figura 2.113** Sección transversal de un tablero multicelular (*ilustración del autor*)
- Figura 2.114** Sección transversal de un tablero de sección abierta (*ilustración del autor*)
- Figura 2.115** Planta de un tablero oblicuo simplemente apoyado (*ilustración del autor*)
- Figura 2.116** Modelo de barras para tablero oblicuo simplemente apoyado (*ilustración del autor*)
- Figura 2.117** Desplazamientos y esfuerzos generalizados de la viga curva (*ilustración del autor*)
- Figura 2.118** Ejemplo de puente curvo: el *Pont de Saint-Cloud* en París (*imagen tomada de "Brücken-Bridges, aesthetics and design", p. 167. Leonhardt, F., The Architectural Press-1982*)
- Figura 2.119** Discretización de una pieza curva en elementos rectos y equilibrio nodal (*ilustración del autor*)

Capítulo 3

- Figura 3.1** El puente Rainbow, sobre el Niágara, entre Estados Unidos y Canadá (*imagen tomada de keyword-suggestions.com; ilustración del autor*)
- Figura 3.2** El puente Tjörn, sobre el Askeröfjord, en Stenungsund (*imagen tomada de geocaching.com; ilustración del autor*)

- Figura 3.3** El puente sobre el Fehmarnsund, en el mar Báltico entre Alemania y Dinamarca (*imágenes de S. Möller y H.E. Taubenheim, tomadas de structurae.net, ID 215087, 156021, 156027 y 156028*)
- Figura 3.4** El puente Kaiserlei, sobre el río Main, entre Frankfurt y Offenbach (*imagen de A. Bauer tomada de structurae.net, ID 45909; ilustración del autor*)
- Figura 3.5** El puente Port Mann, sobre el río Fraser, próximo a Vancouver (*imagen tomada de flickr.com; ilustración del autor*)
- Figura 3.6** El puente de La Barqueta, sobre el Guadalquivir en Sevilla (*imagen tomada de studyblue.com; ilustración del autor*)
- Figura 3.7** La pasarela Léopold Sédar Senghor en París (*imagen de commons.wikimedia.org, de Nicolas Janberg tomada de structurae.net, ID 44371, de mimram.com y de E. Garreta Torner tomada de panoramio.com, ID 72554205*)
- Figura 3.8** El puente Lupu, sobre el río Huangpu en Shanghai (*imágenes tomadas de flickr.com y commons.wikimedia.org*)
- Figura 3.9** El puente Albert Louppe en Plougastel, sobre la desembocadura del río Elorn, en Bretaña (*imágenes de Nicolas Janberg tomadas de structurae.net, ID 168454, 168461 y 168464*)
- Figura 3.10** El puente Canadá en Tréguier, sobre el río Jaudy, en Bretaña (*imágenes tomadas de fans-de-bretagne.com y de Jacques Mossot y Markus Widmer tomadas de structurae.net, ID 111192 y 39475*)
- Figura 3.11** El puente de la Arrabida en Oporto, sobre la desembocadura del Duero (*imágenes tomadas de pt.wikipedia.org y pinterest.com, y de Inge Kanakaris-Wirtl tomada de structurae.net, ID 142884*)
- Figura 3.12** El puente de Reichenau en Tamins, sobre el Rin (*imágenes de Markus Widmer, tomada de structurae.net, ID 58569, christian-menn.ch y ce.jhu.edu*)
- Figura 3.13** El puente de Gladesville en Sydney, sobre el Parramatta (*imágenes tomadas de abc.net.au, expressway.online y visitsydneyaustralia.com.au*)
- Figura 3.14** El puente de Bloukrans en Nature's Valley, sobre el Bloukrans (*imágenes tomadas de yoka.com, pinterest.com y safarinow.com*)
- Figura 3.15** El puente de Wanxian en Wanzhou, sobre el río Yangtze (*imágenes tomadas de structurae.net, ID 232623 y highestbridges.com*)
- Figura 3.16** El puente del Tercer Milenio en Zaragoza, sobre el Ebro (*imágenes tomadas de arenasing.com y de H.E. Taubenheim, tomadas de structurae.net, ID 183538 y 183533*)
- Figura 3.17** Péndolas rígidas del puente Pasarela de la Exposición en Valencia (*imagen del autor*)
- Figura 3.18** Componentes del sistema Macalloy y dimensiones estándar de una cartela (*ilustración del autor*)
- Figura 3.19** Péndolas de acero inoxidable del puente Lehendakari José Antonio Aguirre en San Sebastián (*imagen del autor*)
- Figura 3.20** Puente sobre el Turia en Cullera, Valencia. (a) vista general y modelo global de barras para el análisis, y (b) vista del arriostamiento entre arcos y modelo EF para el análisis local de la difusión de tensiones de membrana (*imágenes e ilustraciones del autor*)
- Figura 3.21** Acción arco y acción viga en una pieza curva de directriz plana (*ilustraciones del autor*)
- Figura 3.22** Discretización de un arco en elementos rectos y Equilibrio nodal de un arco poligonal (*ilustraciones del autor*)

xx DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES

- Figura 3.23** Desplazamientos transversales en la pieza comprimida para distintos valores de la esbeltez (*ilustración del autor*)
- Figura 3.24** Equilibrio de fuerzas en la pieza comprimida y cortante constitutivo para distintos valores de la esbeltez (*ilustraciones del autor*)
- Figura 3.25** Desplazamientos transversales en la pieza traccionada para distintos valores de la esbeltez (*ilustración del autor*)
- Figura 3.26** Equilibrio de fuerzas en la pieza traccionada y cortante constitutivo para distintos valores de la esbeltez (*ilustraciones del autor*)
- Figura 3.27** Funciones de estabilidad de la viga recta de sección constante sin deformación por cortante (*ilustración del autor*)

Capítulo 4

- Figura 4.1** El puente Severin, sobre el Rin, en Colonia (*imagen tomada de Wikimedia Commons, autor Simsala26; ilustración del autor*)
- Figura 4.2** El puente de Düsseldorf-Norte, sobre el Rin (*imagen tomada de grassl-ing.de; ilustración del autor*)
- Figura 4.3** El puente Knie, sobre el Rin, en Düsseldorf (*imagen de DJ Traktor tomada de panoramio.com, ID 3559797; ilustración del autor*)
- Figura 4.4** El puente Oberkassel, sobre el Rin, en Düsseldorf (*imagen de Wikimedia Commons, autor Островский Александр, Киев; ilustración del autor*)
- Figura 4.5** El puente Friedrich Ebert, sobre el Rin, en Bonn (*imagen de Stefan Knauf tomada de commons.wikimedia.org; ilustración del autor*)
- Figura 4.6** El puente Flehe, sobre el Rin, en Düsseldorf (*imágenes tomadas de mapio.net; ilustraciones del autor*)
- Figura 4.7** Pont de Normandie, en la desembocadura del Sena (*imagen tomada de seine-maritime-tourisme.com; ilustraciones del autor*)
- Figura 4.8** El puente Tatara, en Japón, entre las islas Honshu y Shikoku (*imagen tomada de solomo.xinmedia.com; ilustraciones del autor*)
- Figura 4.9** El puente de la isla Russky, en Vladivostok (*imágenes tomadas de architectureguru.ru y structuralia.com*)
- Figura 4.10** El puente sobre el lago Maracaibo (*imagen tomada de pt.wikipedia.org; ilustración del autor*)
- Figura 4.11** El puente de Hoechst, sobre el río Main (*imagen tomada de structurae.net, ID 183964; ilustraciones del autor*)
- Figura 4.12** El puente Brotonne, sobre el Sena (*imagen de studyblue.com; ilustración del autor*)
- Figura 4.13** El puente de Pasco-Kennewick (*imagen de fredmiranda.com; ilustraciones del autor*)
- Figura 4.14** El puente Sancho el Mayor, sobre el Ebro (*imagen de cfcsl.com; ilustración del autor*)
- Figura 4.15** El puente sobre el río Lézé, en Pontevedra (*imagen de Inés Montenegro y David Calvelo, tomada de grupopuentes.com; ilustración del autor*)
- Figura 4.16** El puente sobre el embalse de Barrios de Luna (*imagen tomada de compostimes.com; ilustración del autor*)
- Figura 4.17** Disposición longitudinal estándar en un puente atirantado simétrico de tres vanos (*ilustración del autor*)

- Figura 4.18** El viaducto de Millau, sobre el río Tarn (*imagen de Daniel Lavabre tomada de structurae.net, ID 67119*)
- Figura 4.19** Influencia del tamaño de la obra y de la altura del tablero sobre la configuración transversal de las torres para dos planos de tirantes (*ilustración del autor*)
- Figura 4.20** Influencia del tamaño de la obra y de la altura del tablero sobre la configuración transversal de las torres para un plano de tirantes (*ilustración del autor*)
- Figura 4.21** Secciones transversales de tableros metálicos con dos planos de tirantes (*ilustración del autor*)
- Figura 4.22** Secciones transversales de tableros de hormigón con dos planos de tirantes (*ilustración del autor*)
- Figura 4.23** Secciones transversales de tableros metálicos con un plano de tirantes (*ilustración del autor*)
- Figura 4.24** Secciones transversales de tableros de hormigón con un plano de tirantes (*ilustración del autor*)
- Figura 4.25** Esquema estático para la estimación de las secciones de los tirantes (*a*) en un puente simétrico y (*b*) asimétrico (*ilustración del autor*)
- Figura 4.26** Posición espacial del tirante aislado (*ilustración del autor*)
- Figura 4.27** Sección estándar de un cable de torones paralelos (*ilustración del autor*)
- Figura 4.28** Sección estándar del cable cerrado (*ilustración del autor*)
- Figura 4.29** Sección estándar de un cable de alambres paralelos y sistemas de cables y anclajes para tirantes de la firma DSI (*ilustraciones del autor y del catálogo DSI¹⁹*)
- Figura 4.30** Anclaje tipo BBR CONA Stay en tablero losa (*ilustración del autor*)
- Figura 4.31** Anclaje tipo BBR CONA Stay en tablero bijácena mixto (*ilustración del autor*)
- Figura 4.32** Anclaje tipo BBR CONA Stay en torre de hormigón (*ilustración del autor*)
- Figura 4.33** Puente sobre el río Papaloapan. Detalle de pieza especial para anclaje de tirantes en torres (*imagen de cfcsl.com; ilustración del autor*)
- Figura 4.34** Anclaje de tirante en prolongación del alma de un tablero bijácena de acero en celosía. Extraído del Estudio de Planeamiento de Nuevas Alternativas de Accesibilidad a la Localidad de Cortes de Pallás-Valencia (*ilustración del autor*)
- Figura 4.35** Puente sobre el río Turia de Manises a Paterna, Valencia. (*a*) vista general y modelo global de barras para el análisis, y (*b*) vista de los anclajes de los tirantes del vano principal, modelo EF para el análisis local y mapa de intensidad de tensión (*imágenes e ilustraciones del autor*)
- Figura 4.36** El cable elástico. (*a*) Geometría global y (*b*) equilibrio (*ilustración del autor*)
- Figura 4.37** El tirante elástico. (*a*) Geometría global y (*b*) equilibrio (*ilustración del autor*)

Anexo A

- Figura A.1** Sección transversal de un tablero bi-jácena metálico o mixto. Geometría y ejes para la flexión (*ilustraciones del autor*)
- Figura A.2** Sección transversal de un tablero bi-jácena. Ejes para la torsión (*ilustración del autor*)
- Figura A.3** Definición del alabeo unitario (*ilustración del autor*)

- Figura A.4** Sección transversal de un tablero en cajón unicelular de hormigón. Geometría y ejes para la flexión (*ilustración del autor*)
- Figura A.5** Sección transversal de un tablero en cajón. Ejes para la torsión (*ilustración del autor*)
- Figura A.6** Definición del alabeo unitario de torsión (*ilustración del autor*)
- Figura A.7** Definición del alabeo unitario de distorsión (*ilustración del autor*)
- Figura A.8** Secciones transversales de tableros metálicos y mixtos en cajón unicelular (*ilustraciones del autor*)

Anexo B

- Figura B.1** Disposición de rigidizadores longitudinales en sección transversal (*ilustración del autor*)
- Figura B.2** Coeficientes de abolladura en placas rectas comprimidas (*ilustración del autor*)
- Figura B.3** Coeficientes de abolladura en placas rectas sometidas a tensiones tangenciales en su contorno (*ilustración del autor*)
- Figura B.4** Sección transversal del puente de La Barqueta. Chapas de la envoltura (alas y almas) rigidizadores longitudinales y marcos transversales (*ilustración del autor*)
- Figura B.5** Rigidez mínima de los rigidizadores longitudinales en una losa ortótropa (*ilustración del autor*)
- Figura B.6** Definición de la constante adimensional κ_e en el caso de rigidizadores **a)** cerrados y **b)** abiertos (*ilustración del autor*)
- Figura B.7** Losa ortótropa: definición de un panel interior **a)** y de un panel en voladizo **b)** (*ilustración del autor*)
- Figura B.8** Interacción entre los dos comportamientos tipo de la losa ortótropa (*ilustración del autor*)
- Figura B.9** Secciones reducidas de un tablero metálico unicelular con piso ortótropo (*ilustración del autor*)
- Figura B.10** Elementos geométricos para el análisis de la acción del RLw (*ilustración del autor*)
- Figura B.11** Elementos para la definición del momento de inercia de la sección reducida (*ilustración del autor*)

LISTA DE TABLAS

Capítulo 1

- Tabla 3.1-a** Pesos específicos de diversos materiales [kN/m^2] (según IAP-11)
- Tabla 3.2-a** Factor α (según IAP-11)
- Tabla 4.1-a** Definición de los carriles virtuales (según IAP-11)
- Tabla 4.1-b** Valor característico de la sobrecarga de uso (según IAP-11)
- Tabla 4.1-c** Grupos de cargas de tráfico. Concomitancia de las diferentes componentes de la sobrecarga de uso (según IAP-11)
- Tabla 4.2-a** Períodos de retorno para situaciones transitorias (según IAP-11)
- Tabla 4.2-b** Coeficientes k_r , z_0 y z_{min} según el tipo de entorno (según IAP-11)
- Tabla 4.2-c** Coeficiente de ocultamiento η (según IAP-11)
- Tabla 4.2-d** Coeficiente α según el tipo de entorno (según IAP-11)
- Tabla 4.2-e** Empujes unitarios en puentes con altura de pila: $H_{max} \leq 10$ m (según IAP-11)
- Tabla 4.2-f** Empujes unitarios en puentes con altura de pila: $H_{max} = 20$ m (según IAP-11)
- Tabla 4.2-g** Valores orientativos del índice de amortiguamiento [%] (según IAP-11)
- Tabla 4.3-a** Temperatura mínima anual del aire, T_{min} [$^{\circ}\text{C}$] (según IAP-11)
- Tabla 4.3-b** Valores de $\Delta T_{e,min}$ y $\Delta T_{e,max}$ para el cálculo de la componente uniforme de temperatura (según IAP-11)
- Tabla 4.3-c** Valores del coeficiente de dilatación térmica lineal α_T [$\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$] (según IAP-11)
- Tabla 4.3-d** Componente lineal de la diferencia vertical de temperatura para tableros tipo 1 y 3 (según IAP-11)
- Tabla 4.3-e** Coeficiente de influencia k_{sur} del tipo y espesor de pavimento (según IAP-11)
- Tabla 4.3-f** Diferencia transversal de temperatura entre las dos caras externas del tablero (según IAP-11)
- Tabla 4.4-a** Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal, s_x [kN/m^2] (según IAP-11)
- Tabla 4.4-b** Sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal en capitales de provincia y ciudades autónomas (según IAP-11)
- Tabla 4.4-c** Peso específico medio de la nieve en función de la altitud (según IAP-11)
- Tabla 6.1-a** Factores de simultaneidad ψ (según IAP-11)
- Tabla 6.2-a** Coeficientes parciales para las acciones γ_F [para la comprobación del ELU de equilibrio] (según IAP-11)

- Tabla 6.2-b** Coeficientes parciales para las acciones γ_F [para la comprobaciones resistentes] (según IAP-11)
- Tabla 6.2-c** Coeficientes parciales para las acciones γ_F [ELS] (según IAP-11)
- Tabla 7.2-a** Valores de referencia de aceleraciones para el confort de los peatones (según IAP-11)

Capítulo 2

- Tabla II.1** Cuadro resumen de las características principales de las obras de la sección **2.2**
- Tabla II.2** Esbeltez de los tableros en puentes de carretera (*imagen tomada de "Tierra sobre el agua", p. 492. Fernández Troyano, L., Colegio de I.C.C.P.-1999*)
- Tabla II.3** Geometría del cajón unicelular de hormigón
- Tabla II.4** Geometría de la losa superior
- Tabla II.5** Parámetros geométricos de la sección transversal de un tablero mixto bi-jácena con riostras (*ilustración del autor*)
- Tabla II.6** Parámetros geométricos de la sección transversal de un tablero mixto bi-jácena con vigas de piso (*ilustración del autor*)
- Tabla II.7** Parámetros geométricos de la sección transversal de un tablero mixto en cajón (*ilustración del autor*)
- Tabla II.8** Características de los aceros: (a) grado mínimo según el espesor de chapa —anexo Francés de EN 1993-2—, (b) grado usualmente adoptados en puentes mixtos y metálicos, (c) límite elástico de las chapas en función de su espesor y de la designación del acero y (d) Límite elástico de las chapas en función de su espesor y de la designación para aceros patinables
- Tabla II.9** Tipo y grado del acero según elementos del sistema bi-jácena
- Tabla II.10** Tipo y grado del acero según elementos de la fase metálica del cajón mixto
- Tabla II.11** Arrastre de cortante en la viga estándar para distintas concentraciones de la acción y proporción ancho-luz variable
- Tabla II.12** Valores de los coeficientes ψ_i para *EL* de servicio y de fatiga ($\beta = b_0/L_{ef}$)
- Tabla II.13** Luz efectiva en una viga continua de tres vanos y sección constante
- Tabla II.14** Distribución de axiles y momentos flectores en el plano de las paredes de la viga cajón debidos a la distorsión
- Tabla II.15** Distribución de esfuerzos cortantes en el plano de las paredes de la viga cajón debidos a la distorsión
- Tabla II.16** Características mecánicas del marco
- Tabla II.17** Distribución de momentos flectores transversales en las paredes de la pieza debidos a la distorsión, $\zeta \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$
- Tabla II.18** Variables análogas entre distorsión y flexión de vigas
- Tabla II.19** Pieza biapoyada, torsor puntual. Componentes del vector estado
- Tabla II.20** Pieza biapoyada, torsor repartido. Componentes del vector estado
- Tabla II.21** Pieza biempotrada, torsor puntual. Componentes del vector estado
- Tabla II.22** Pieza biempotrada, torsor repartido. Componentes del vector estado
- Tabla II.23** Distorsión de la viga simplemente apoyada sometida a torsor puntual con marco perfectamente flexible

Tabla II.24	Disipación estática de la distorsión en un tablero (a) metálico y (b) mixto, simplemente apoyado de sección estándar, con número variable de diafragmas transversales
Tabla II.25	Disipación estática de la distorsión en un tablero (a) metálico y (b) mixto, biempotrado de sección estándar, con número variable de diafragmas transversales
Tabla II.26	Condiciones de diseño ultra rígido frente a distorsión
Tabla II.27	Analogía de primer nivel en problemas de vigas
Tabla II.28	Analogía de segundo nivel en problemas de vigas
Tabla II.29	Torsión en viga simplemente apoyada sometida a torsor puntual
Tabla II.30	Constantes estáticas en secciones mixtas (<i>ilustración del autor</i>)
Tabla II.31	Coefficientes K_i para el cálculo de las flexibilidades de un aparato de apoyo de neopreno
Tabla II.32	Parámetros de la flexión
Tabla II.33	Fuerzas de empotramiento perfecto f^0 de torsión para distintas condiciones de carga ($f=Ku+f^0$)

Capítulo 3

Tabla III.1	Cuadro resumen de las características principales de las obras comentadas en la sección 3.2
Tabla III.2	Cuadro resumen de la interacción arco-tablero
Tabla III.3	Parámetro de forma de los arcos de las obras comentadas en la sección 3.2
Tabla III.4	Propiedades mecánicas de las barras Macalloy
Tabla III.5	Solución de la viga columna para fuerza transversal puntual
Tabla III.6	Solución de la viga tirante para fuerza transversal puntual
Tabla III.7	Funciones de estabilidad de la viga recta de sección constante
Tabla III.8	Método general de comprobación
Tabla III.9	Imperfecciones iniciales en arcos

Capítulo 4

Tabla IV.1	Cuadro resumen de las características principales de las obras comentadas en la sección 4.2
Tabla IV.2	Cuadro resumen de la interacción atirantamiento-torres-tablero (opciones <i>ortodoxas</i>)
Tabla IV.3	Cuadro resumen de las morfologías estándar de los tableros de puentes atirantados, ilustradas por las Figuras 4.21 a 4.24
Tabla IV.4	Puentes atirantados con tablero mixto
Tabla IV.5	Peso de los tableros de puentes atirantados según Manterola y Walther
Tabla IV.6	Densidad lineal de la carga de uso en algunos puentes de carretera
Tabla IV.7	Sobrecarga de uso en puentes de carretera según Walther

xxvi DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES

Tabla IV.8 Factor de carga variable y tensión máxima admisible en tirantes debido a cargas permanentes

Tabla IV.9 Sistemas de tirantes actualmente en uso, según Svensson

Anexo A

Tabla A.1 Rigidizadores cerrados tipo 1 y 2 en acero S275. Reducción de la altura del alma por abolladura

Tabla A.2 Factor de ponderación del parámetro de forma de paneles de chapa rigidizados longitudinalmente

Anexo B

Tabla B.1 Condiciones de compacidad de una chapa de sección $b \times e$ para distintas condiciones de contorno y tipos de acero estructural

Tabla B.2 Factor de reducción tipo placa de un panel de losa ortótropa comprimido

**DISEÑO ESTRUCTURAL
DE PUENTES**

1. MARCO NORMATIVO: LA IAP-11

Este capítulo tiene por objeto introducir la **instrucción IAP-11**. En ningún caso puede sustituir su estudio y, de hecho, su contenido está mayoritariamente compuesto por largos extractos del propio articulado de la norma junto con algunos comentarios adicionales —como los relacionados con la aeroelasticidad (**artículo 4.2.9**)— orientados a exponer conceptos teóricos o aplicados más avanzados, propios de otras especialidades o de cursos de postgrado, como el MUICCP.

1.1 OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN

- Esta Instrucción tiene por **objeto** la determinación de las acciones, los coeficientes de ponderación y las combinaciones de acciones que deben tenerse en cuenta en el proyecto de puentes y otras estructuras de la red de carreteras del Estado (RCE). Además, se incluyen algunos criterios funcionales que deben cumplir los puentes, con independencia de los materiales que los constituyen.
- También será de aplicación esta Instrucción al proyecto de estructuras asimilables a los puentes (tales como falsos túneles, pontones o tajeas), a **pasarelas** para peatones, ciclistas o ciclomotores y a las **obras de acompañamiento**, como son las escaleras, rampas de acceso y muros.
- Asimismo, esta Instrucción podrá aplicarse en las comprobaciones correspondientes a la **evaluación, ampliación o refuerzo** de puentes existentes, con las especificaciones complementarias, o modificaciones de las prescripciones aquí recogidas, que la Dirección General de Carreteras (DGC) establezca específicamente para cada caso.
- Para el proyecto de **puentes de uso mixto**, que además de la carretera soporten por ejemplo tráfico ferroviario, se considerarán las acciones correspondientes a cada uso, de forma independiente o combinada, según resulte más desfavorable. En estos casos, se someterán siempre a la aprobación de la DGC, las acciones, coeficientes y combinaciones que el proyectista considere oportuno aplicar.
- El cumplimiento de esta Instrucción será condición necesaria para autorizar el paso de otras carreteras **sobre** las vías de la RCE.
- Esta Instrucción se aplicará de forma **complementaria** con el resto de la normativa vigente que tenga en su ámbito de aplicación los puentes y sus materiales constituyentes.

2 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES

1.2 PRINCIPIOS GENERALES DE PROYECTO

2.1 REQUISITOS FUNDAMENTALES

Esta Instrucción ha sido redactada teniendo en cuenta los *requisitos fundamentales* siguientes:

- Una estructura debe ser proyectada y construida para que, con una probabilidad razonable, sea capaz de soportar todas las acciones que puedan solicitarla durante su *construcción y uso*, en el período de vida previsto, y de cumplir la función para la que ha sido construida con unos costes de conservación aceptables.
- Una estructura debe también ser concebida de manera que las consecuencias de acciones excepcionales, como sismos o impactos, no produzcan daños desproporcionados con la causa que los ha originado (*requisito de robustez*).

Para alcanzar los niveles de seguridad adoptados en esta instrucción, además de las prescripciones en ella establecidas, deberán cumplirse los principios siguientes:

- Los puentes serán proyectados por *ingenieros* con capacidad y experiencia suficientes.
- La construcción será realizada por técnicos y operarios con los conocimientos y la experiencia necesarios.
- Los materiales y productos utilizados cumplirán las prescripciones establecidas en los correspondientes reglamentos técnicos o, en su defecto, normas.
- Existirán controles de calidad adecuados durante todo el proceso de proyecto y ejecución de la estructura.
- La estructura estará destinada al uso para el que haya sido proyectada y construida.
- La estructura será conservada adecuadamente.

2.2 VIDA ÚTIL

Se entiende por *vida útil* de una estructura el período de tiempo, a partir de la fecha en que finaliza su ejecución, durante el cual debe *cumplir la función para la que fue construida*, contando siempre con la conservación adecuada pero sin requerir operaciones significativas de rehabilitación. Para los puentes de carretera objeto de esta Instrucción, se establece una *vida útil de proyecto de cien (100) años*.

2.3 CRITERIOS DE COMPROBACIÓN

Las comprobaciones estructurales estarán basadas en la *teoría de los estados límite* y su verificación mediante el método de los coeficientes parciales de seguridad. En cada *situación de proyecto*, se comprobará que no se supera ninguno de los *estados límite* que proceda.

2.3.1 Situaciones de proyecto

Una *situación de proyecto* de una estructura es un conjunto de condiciones físicas que representan las circunstancias reales que pueden presentarse durante un cierto intervalo de tiempo para el cual en el proyecto se va a comprobar que no se superan los estados límite pertinentes. Se considera que, durante este intervalo de tiempo, los factores que afectan a la seguridad estructural no varían.

Cada una de las situaciones posibles, y entre ellas especialmente las que se producen durante la construcción de la obra proyectada, deben ser objeto de *comprobaciones independientes*.

Las situaciones de proyecto consideradas en esta Instrucción son:

- *Situaciones persistentes*, que corresponden a las *condiciones de uso normales* de la estructura durante su vida útil.
- *Situaciones transitorias*, que se producen cuando las condiciones de uso o estado de la estructura son *temporales* como, por ejemplo, durante su *construcción o reparación*, y para las que se considerará el correspondiente período de duración. A falta de estudios más detallados se podrá aceptar como tal un año.
- *Situaciones accidentales*, que corresponden a condiciones excepcionales aplicables a la estructura como, por ejemplo, las provocadas por un *impacto* o por el *fallo* de algún elemento. Se consideran instantáneas (*salvo que dicho fallo pueda permanecer sin ser detectado*).
- *Situaciones sísmicas*, que corresponden a condiciones excepcionales aplicables a la estructura durante un evento sísmico. La situación sísmica se distingue del resto de situaciones accidentales debido a que en ella se establecen *diferentes niveles* de la magnitud de la acción en función de los requisitos de seguridad o de servicio.

2.3.2 Estados límite

Se definen como *estados límite* aquellas condiciones para las que puede considerarse que, de ser superadas, la estructura no cumple alguno de los requisitos de proyecto.

2.3.2.1 Estados límite últimos (ELU)

Son aquellos que, si se sobrepasan, se produce el *agotamiento o colapso de la estructura* o de una parte de ella. A efectos de aplicación de esta Instrucción, en función del tipo de estructura, se deberán considerar los siguientes:

- *ELU de equilibrio (EQU)*, por pérdida de *estabilidad estática* de una parte o del conjunto de la estructura, considerada como sólido rígido (*resistencia de los materiales no determinada*).
- *ELU de rotura (STR)*, por agotamiento resistente o deformación plástica excesiva (*resistencia de los materiales determinada*).

4 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES

- **ELU de fatiga (FAT)**, relacionado con los daños que pueda sufrir una estructura o cualquiera de sus elementos como consecuencia de sollicitaciones variables repetidas.

Los estados límite últimos de tipo *geotécnico*, cuya ocurrencia está controlada principalmente por las características del terreno, tales como *socavación*, *inestabilidad global* o *hundimiento* por falta de capacidad portante del terreno, entre otros, *no* son objeto de esta Instrucción.

2.3.2.2 Estados límite de servicio (ELS)

Son aquellos tales que, si se sobrepasan, la estructura dejará de cumplir el cometido para el que fue proyectada por razones *funcionales*, de *durabilidad*, o de *aspecto*, sin que ello suponga el colapso de la misma. A efectos de aplicación de esta Instrucción, en función del tipo de estructura, se deberán considerar los siguientes:

- **ELS de fisuración** que afecte a la durabilidad o estética del puente.
- **ELS de deformación** que afecte a la apariencia o funcionalidad de la obra, o que cause daño a elementos no estructurales.
- **ELS de vibraciones** que no sean aceptables para los usuarios o que puedan afectar a su funcionalidad o provocar daños en elementos no estructurales.
- **ELS de plastificaciones** en zonas localizadas de la estructura que puedan provocar daños o deformaciones irreversibles.
- **ELS de deslizamiento** en uniones mediante tornillos de alta resistencia.

Los estados límite de servicio se pueden clasificar en *reversibles* o *irreversibles*. Los primeros son aquellos que dejan de ser superados cuando desaparece la acción que los provoca. Los estados límite de servicio irreversibles son aquellos que, una vez superados, se mantienen de forma permanente, incluso si se elimina la acción que los ha provocado.

2.3.3 Verificaciones

2.3.3.1 Verificaciones en ELU

Para verificar el **ELU de equilibrio**, se debe satisfacer la condición siguiente:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab}$$

siendo:

- $E_{d,dst}$ valor de cálculo del efecto de las **acciones desestabilizadoras**
- $E_{d,stab}$ valor de cálculo de las **acciones estabilizadoras**

Para verificar el resto de los **ELU**, salvo el de fatiga, se debe satisfacer la condición siguiente:

$$E_d \leq R_d$$

siendo:

- E_d valor de cálculo del *efecto* de las acciones
- R_d valor de cálculo de la *resistencia* correspondiente

La verificación del *ELU de fatiga* se efectuará de acuerdo con los criterios recogidos en la normativa específica de cada material estructural.

El valor de cálculo de las acciones se obtendrá de acuerdo con lo indicado en el **capítulo 6. Bases para la combinación de acciones.**

2.3.3.2 Verificaciones en ELS

Para verificar los *ELS*, se debe satisfacer la condición siguiente:

$$E_d \leq C_d$$

siendo:

- E_d valor de cálculo del *efecto* de las acciones obtenido de acuerdo con lo indicado en el **capítulo 6**
- C_d valor *límite del efecto de las acciones* para el ELS considerado

2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS ACCIONES

Las acciones pueden clasificarse atendiendo a su *naturaleza* (*directas o indirectas*), a su *variación espacial* (*fijas o libres*), a la naturaleza de la *respuesta estructural* que producen (*estáticas o casi estáticas o bien acciones dinámicas*) o a su *variación en el tiempo*. A efectos de aplicación de esta Instrucción, se adopta la clasificación de las acciones atendiendo a su *variación en el tiempo*:

- *Acciones permanentes de valor constante (G): actúan en todo momento* y son constantes en posición y magnitud (*peso propio y cargas muertas*).
- *Acciones permanentes de valor no constante (G*):* *actúan en todo momento* pero varían en magnitud (*reología, pretensado, asientos*).
- *Acciones variables (Q):* son acciones externas a la estructura y *pueden actuar o no*, y, si lo hacen, pueden tener diferentes valores (*sobrecargas de uso, acciones climáticas*).
- *Acciones accidentales (A):* son acciones de *corta duración* cuya probabilidad de actuación durante la vida útil de la estructura es pequeña, pero cuyos efectos pueden ser considerables (*impactos de vehículos, sismos, avenidas de período de retorno importante*).

De acuerdo con esta clasificación, en los **capítulos 3 a 5**, se establecen los valores de las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera, que se tomarán como **valores característicos**.

El *valor característico de una acción*, que es su principal valor representativo, puede venir determinado por un valor medio, un valor nominal o, en el caso en que se fije mediante criterios estadísticos, por el correspondiente a una determinada probabilidad de no ser superado durante un período de referencia teniendo en cuenta la vida útil de la estructura y la duración de la situación de proyecto.

1.3 ACCIONES PERMANENTES

3.1 ACCIONES PERMANENTES DE VALOR CONSTANTE (G)

Las cargas permanentes son producidas por el peso de los distintos elementos que forman parte del puente. A efectos de esta Instrucción se clasifican en *peso propio* y *cargas muertas*.

3.1.1 Peso propio

Esta acción corresponde al peso de los *elementos estructurales* y su *valor característico* podrá deducirse de la **Tabla 3.1-a**. Cuando el peso que resulte de las mediciones obtenidas a partir de los planos de proyecto sobrepase en más de un 5% el valor estimado en las bases de cálculo del proyecto, deberán adaptarse dichos cálculos al peso que se deduce de lo representado en planos.

3.1.2 Cargas muertas

Son las debidas a los *elementos no estructurales* que gravitan sobre los estructurales, tales como:

- pavimento de la calzada y aceras
- elementos de contención (*barreras y barandillas*)
- dotaciones viales y de la propia estructura
- conductos de servicios, etc.

Salvo justificación expresa, se tomarán para los materiales de construcción más usuales los siguientes pesos específicos [kN/m³]:

Fundición	72.5
Acero	78.5
Aluminio	27.0
Madera seca	6.0 a 9.0
Madera húmeda	10.5
Hormigón en masa	23.0 a 24.0
Hormigón armado y pretensado	25.0
Elementos de basalto, pórfidos y ofitas	31.0
Elementos de granito y caliza	30.0
Materiales granulares y rellenos (zahorras, gravas y arenas)	20.0
Pavimentos de mezcla bituminosa	23.0
Material elastomérico	15.0
Poliestireno expandido	0.3
Vidrio	25.0

Tabla 3.1-a

- **Pavimento de la calzada y aceras.** El *espesor máximo* del pavimento bituminoso *proyectado y construido* sobre tableros de puentes, incluida la preceptiva capa de impermeabilización y la eventual capa de regularización, no será en ningún caso superior a **10 cm**, salvo aprobación expresa de la DGC.

No obstante, a efectos de cálculo, para la acción debida al pavimento se deberán considerar dos valores extremos:

- (1) Valor inferior $\{G_{k,inf}\}$, determinado con los espesores teóricos definidos en el proyecto.
- (2) Valor superior $\{G_{k,sup}\}$, obtenido incrementando un **50%** los espesores teóricos definidos en el proyecto.

Este valor *no permite*, en modo alguno, *la rehabilitación del pavimento por extensión de nuevas capas*. Por tanto, el proyecto no sólo definirá con suficiente precisión la tipología de la impermeabilización y de los pavimentos, estudiando con detalle la funcionalidad de estos últimos compatible con la deformabilidad del tablero y su conservación a medio y largo plazo, sino que también, a efectos de la correcta explotación y conservación del puente, incluirá criterios sobre la rehabilitación de los pavimentos en lo referente a espesores, deformabilidad, características, y cualquier otro aspecto técnico que el proyectista considere importante para la seguridad o funcionalidad de la estructura.

El valor que se considere para el peso del pavimento, $G_{k,inf}$ o $G_{k,sup}$, *será el mismo para toda la estructura*.

- **Conductos de servicios.** Para el peso propio de tuberías y otros servicios soportados por el puente, se tomarán también dos valores extremos, $G_{k,inf}$ y $G_{k,sup}$, considerándose una desviación respecto a su valor medio de **±20%**.

El peso del agua contenida en una canalización soportada por un puente se tomará en principio como carga muerta y se considerarán los pesos de las canalizaciones tanto vacías como llenas.

- **Rellenos.** El peso de los rellenos sobre elementos estructurales (*losas, dinteles, zapatas, etc.*) se considerarán también como carga muerta. Este peso se determinará aplicando al volumen de terreno que gravite sobre la superficie del elemento horizontal, el peso específico del relleno vertido y compactado. Si no se dispusiera de datos reales de este peso específico, se podrán adoptar los definidos en la **Tabla 3.1-a** para materiales granulares y rellenos.

3.2 ACCIONES PERMANENTES DE VALOR NO CONSTANTE (G^*)

3.2.1 Presolicitaciones

En el término *presolicitaciones*, se considerarán incluidas todas las formas posibles de *introducir esfuerzos* en una estructura antes de su puesta en servicio, *con el fin de mejorar*

8 DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES

su respuesta frente al conjunto de solicitaciones a las que posteriormente se verá sometida.

3.2.1.1 Pretensado

A efectos de aplicación de esta Instrucción se considerarán dos tipos de acción del pretensado:

- a) **Tipo P_1** : es la inducida por elementos colocados dentro del contorno de la sección estructural de hormigón (*pretensado interior*), o fuera de la sección pero *dentro del canto de la estructura* (*pretensado exterior*). A todos los efectos se considerará y tratará de acuerdo con lo especificado en la vigente **Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)** o normativa que la sustituya.
- b) **Tipo P_2** : es la inducida a través de elementos diferenciados en el esquema estructural (tirantes, péndolas, pretensado exterior fuera del canto, etc.).

Las acciones del *tipo P_2* varían en función de la magnitud de las cargas permanentes de valor constante, por lo que deben ser consideradas ambas conjuntamente y no de forma independiente.

El *pretensado extradonado* es un tipo de presolicitación que se encuentra entre los pretensados *tipo P_1* y *P_2* aquí definidos. Su semejanza a uno de los dos depende de la rigidez de la estructura y de su esquema estructural. En función de estas características, el proyectista justificará en el proyecto el tratamiento adoptado para el pretensado extradonado.

3.2.1.2 Otras presolicitaciones

En este apartado se incluirán las *presolicitaciones* introducidas por medio de *gatos*, por bloqueo provisional de coacciones, por *desplazamientos impuestos en los apoyos* de la estructura, etc.

La *presolicitación* se aplicará con el valor definido en proyecto, en el instante previsto y sobre la estructura parcial o total correspondiente.

Al igual que las presolicitaciones debidas al *pretensado*, su valor varía con el tiempo, siendo su efecto especialmente sensible a deformaciones diferidas de la estructura producidas por fluencia y retracción. Por tanto, deberá determinarse su valor para cada situación de proyecto y deberá considerarse adecuadamente su reducción.

3.2.2 Acciones reológicas

El valor característico de las *acciones reológicas* se obtendrá a partir de las *deformaciones* provocadas por la *retracción* y la *fluencia*, determinadas en el instante t en que se evalúen, de acuerdo con lo que especifique sobre el particular en la vigente **Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)** o normativa que la sustituya.

3.2.3 Empuje del terreno

El empuje del terreno, natural o de relleno, sobre elementos de la estructura (*muros, aletas, etc.*) se determinará en función de las características del terreno y de otras consideraciones geotécnicas.

Cuando la actuación del empuje sea *desfavorable* para el elemento y efecto estudiado, su valor nunca será inferior al empuje hidrostático de un fluido de peso específico igual a 5 kN/m³.

Cuando existan *incertidumbres* sobre la actuación efectiva del empuje de tierras y su acción sea *favorable* para el elemento y efecto en estudio, **no se considerará su actuación.**

3.2.4 Asientos del terreno de cimentación

Los valores de los asientos se obtendrán a partir de los datos del *preceptivo estudio geotécnico*, de la tipología y geometría de la cimentación y de las cargas transmitidas por esta. Además, se determinará su *evolución en el tiempo*. Cuando la estructura pase por fases de construcción isostáticas de una duración significativa, se estimará qué parte del asiento total puede desarrollarse en esas fases.

3.2.5 Rozamiento de apoyos deslizantes

Cuando en un puente se dispongan *aparatos de apoyo deslizantes*, será necesario considerar la *fuerza de reacción* que el rozamiento del apoyo deslizante ejerce sobre ambas partes de la estructura.

A falta de estudios más precisos, los coeficientes de rozamiento μ_a y μ_r se considerarán según se indica a continuación:

$$\begin{aligned}\mu_a &= 0.5\mu_{max}(1+\alpha) \\ \mu_r &= 0.5\mu_{max}(1-\alpha)\end{aligned}$$

donde:

μ_a	coeficiente de rozamiento <i>adverso</i>
μ_r	coeficiente de rozamiento <i>favorable</i>
μ_{max}	<i>máximo</i> coeficiente de rozamiento del aparato de apoyo (según UNE-EN 1337-2). Para apoyos deslizantes con PTFE, se considerará un coeficiente de rozamiento máximo del 3%, independientemente de la presión a la que esté sometido el apoyo.
α	factor que depende del número parcial de apoyos (n) que ejercen bien una coacción favorable o bien una coacción desfavorable para el elemento en estudio. A falta de estudios más precisos, se puede determinar de acuerdo con la Tabla 3.2-a . Este factor adoptará generalmente valores distintos según se esté calculando μ_a o μ_r .

Para seguir leyendo haga click aquí