18

Sistemas estructurales:
Puentes

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 18

SISTEMAS ESTRUCTURALES: PUENTES

Lección 18.1: Elección Conceptual 1

1 PRELIMINAR 4
2 FORMAS FUNDAMENTALES DE PUENTES 5
2.1 Introducción 5
2.2 Puentes que soportan cargas principalmente a flexión 5
2.3 Puentes que soportan sus cargas principalmente como esfuerzos axiales 5
2.4 Puentes de Celosía 6
3 OBJETO Y FUNCIÓN DE UN PUENTE 7
3.1 Introducción 7
3.2 Requisitos de espacio libre 7
3.3. Cargas 7
3.4 La Topografía y Geología de la Obra 8
4 OTROS FACTORES QUE EJERCEN INFLUENCIA EN LA ELECCIÓN CONCEPTUAL 10
4.1 Introducción 10
4.2 Métodos de montaje 10
4.2.1 Montaje a pie de obra 10
4.2.2 Lanzamiento 10
4.2.3 Elevación 11
4.2.4 Montaje en voladizo 11
4.2.5 Deslizamiento 12
4.3 Técnicas y materiales de construcción locales 12
4.4 Inspección y mantenimiento futuros 12
4.5 Aspectos estéticos y ambientales 13

5 CONSIDERACIONES DETALLADAS-PUENTES DE VIGAS DE ALMA LLENA 15
5.1 Introducción 15
5.2 El Tablero 15
5.3 Disposiciones típicas de puentes de pequeña y mediana luz 16
5.4 Puentes de viga de alma llena de gran luz 19
5.5 ¿Coste mínimo o peso mínimo? 20
5.6 Proyecto de construcción 21
6 OBSERVACIONES FINALES 23
7 RESUMEN FINAL 24
8 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 24

Lección 18.2: Acciones en Puentes 25

1 INTRODUCCIÓN 28
2 HIPÓTESIS DE CARGAS DE CARRETERAS 30
2.1 Carga Permanente 30
2.2 Cargas debidas al tráfico 30
2.3 Fuerzas de arranque longitudinales 31
2.4 Fuerzas centrífugas 32
2.5 Aceras y Pretiles 32
3 HIPÓTESIS DE CARGA DE FERROCARRILES 34
3.1 Carga Permanente 34
3.2 Cargas debidas a los trenes 34
3.3 Efectos dinámicos (impacto) 34
3.4 Fuerzas de arranque logitudinales 35
3.5 Fuerzas centrífugas 35
3.6 Fuerzas transversales debidas a las cargas 35
4 OTRAS CARGAS EN LOS PUENTES 36
4.1 Cargas del viento 36
4.2 Efectos térmicos en las estructuras de los puentes 36
4.3 Retracción del hormigón 38
4.4 Asientos de la cimentación 38
4.5 Acciones sísmicas 38

4.6 Fuerzas debidas a las corrientes de agua o al hielo 40
4.7 Colisiones 40
4.8 Rozamiento en las estructuras de apoyo 40
4.9 Cargas de construcción y montaje 42
5 CASOS DE CARGA CRÍTICA PARA EL CÁLCULO 43
5.1 Combinaciones de cargas 43
5.2 Concepción del proceso de construcción 43
5.3 Acciones variables en la estructura finalizada 43
6 RESUMEN FINAL 45
7 BIBLIOGRAFÍA 45

Lección 18.3: Tableros de Puentes 47

1 INTRODUCCIÓN 50
2 DESARROLLO HISTÓRICO 52
2.1 De la separación a la integración de funciones 52
2.2 Una mayor sencillez 53
2.3 Evolución del larguero en los tableros de acero 53
3 TABLEROS ACTUALES PARA PUENTES DE CARRETERAS 56
3.1 Losas de Hormigón Armado para Puentes Mixtos 56
3.1.1 Tramos y cantos 56
3.1.2 Métodos de construcción 56
3.1.3 Métodos de análisis y diseño 56
3.2 Tableros de acero ortotrópicos 59
3.2.1 Introducción 59
3.2.2 Comportamiento estructural de los tableros de acero ortotrópicos 59
3.2.3 El tablero ortotrópico “europeo” y los métodos de construcción 60
3.2.4 Métodos de cálculo y verificación del diseño 60
4 TABLEROS ACTUALES PARA PUENTES DE FERROCARRILES 64
4.1 Renovación de estructuras 64
4.2 Nuevos trazados 64
5 RESUMEN FINAL 66
6 BIBLIOGRAFÍA 66
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 66

Lección 18.4: Puentes de Vigas Armadas y Laminadas 67

1 INTRODUCCIÓN 70
1.1 Generalidades 70
1.2 Tipos de aplicaciones 71
1.3 Campo de aplicación 71
1.4 Tipos de puentes de vigas de tablero interior 72
2 DISPOSICIONES DE LOS TRAMOS 73
2.1 Tramos contínuos o simples 73
2.2 Proporción de las vigas principales 73
3 DISEÑO INICIAL DE PUENTES DE VIGAS DE ALMA LLENA MIXTAS 75
3.1 Separación de jácenas y espesor de la losa del tablero 75
3.2 Predimensionado de las dimensiones del ala y del alma 76
3.3 Consideraciones económicas y prácticas 76
3.3.1 Consideraciones generales 76
3.3.2 Consideraciones sobre la construcción 77
4 DISEÑO INICIAL DE PUENTES DE VIGAS ARMADAS NO MIXTAS 79
4.1 Sección transversal del puente 79
4.2 Vigas principales 80
4.3 Tablero 80
4.4 Predimensinado de la viga principal 81
5 ESTABILIDAD Y ARRIOSTRAMIENTO DE LAS JÁCENAS 82
5.1 Introducción 82
5.2 Puentes de vigas armadas mixtas 82
5.3 Vigas armadas no mixtas 84
6 DISEÑO DE DETALLE 85
6.1 Análisis global 85
6.2 Acciones y combinaciones 85
6.3 Diseño de elementos y uniones 86
6.4 Efectos característicos de las configuraciones de tablero abierto de emparrillado de acero 86
6.4.1 Flexión de los largueros 87
6.4.2 Flexión alrededor del eje menor del travesaño de borde 87
7 RESUMEN FINAL 89

8 BIBLIOGRAFÍA 89
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 89

Lección 18.5: Puentes de Celosías 91

1 INTRODUCCIÓN 94
2 DIFERENTES TIPOS DE VIGAS DE CELOSÍA 96
2.1 Antecedentes históricos 96
2.2 Puentes de celosía para carreteras 96
2.3 Elección de configuración de viga de celosía para puentes de ferrocarril 97
2.4 Aplicaciones particulares 98
3 PRINCIPIOS GENERALES DEL DISEÑO 99
3.1 Intervalo de tramos 99
3.2 Relación entre tramo y canto 99
3.3 Geometría 99
3.4 Calidad del acero 99
3.5 Elementos de los cordones comprimidos 99
3.6 Elementos de cordón a tracción 101
3.7 Elementos verticales y diagonales 101
3.8 Conservación 103
4 ARRIOSTRAMIENTO LATERAL 104
5 ANÁLISIS 106
5.1 Efectos de las cargas globales 106
5.2 Efectos de las cargas locales 106
6 UNIONES 107
6.1 Generalidades 107
6.2 Uniones de vigas de celosía 107
6.3 Uniones de los travesaños 109
6.4 Uniones de arriostramiento lateral 109
7 RESUMEN FINAL 111
8 BIBLIOGRAFÍA 111
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 111

Lección 18.6: Puentes de Vigas Cajón 113

1 HISTORIA 116
2 PRINCIPIOS GENERALES DE DISEÑO 119
2.1 Tramo 119
2.2 Relación entre luz y canto 119
2.3 Sección transversal 119
2.4 Calidad del acero 120
3 DETALLES ESTRUCTURALES 121
3.1 Rigidizadores longitudinales 121
3.2 Diafragmas de las pilas y pórticos transversales intermedios 121
3.3 Elementos transversales intermedios entre cajones 121
3.4 Estructuras de apoyo 121
3.5 Protección frente a la corrosión 122
4 ANÁLISIS 123
4.1 Generalidades 123
4.2 Torsión 123
4.3 Pórticos transversales intermedios arriostrados o no arriostrados ... 123
5 MÉTODOS DE MONTAJE 124
6 APRENDER DE LOS ERRORES 125
7 RESUMEN FINAL 128
8 BIBLIOGRAFÍA 128

Lección 18.7: Puentes arco 129

1 INTRODUCCIÓN 132
1.1 Generalidades 132
1.2 Desarrollo histórico 132
1.3 Tipos de aplicaciones 132
1.4 Campo de aplicación 132
2 TIPOS DE PUENTES EN ARCO 133
2.1 Disposición de arcos 133
2.2 Disposición estructural 134

3 ELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS 135
3.1 El Arco 135
3.2 La viga de rigidez 136
3.3 Las péndolas 137
3.4 Los pórticos de los extremos 137
4 ASPECTOS ESPECIALES DE COMPORTAMIENTO Y ANÁLISIS 139
4.1 Efectos primarios 139
4.1.1 Carga máxima 139
4.1.2 Carga máxima en la mitad de la longitud del puente 139
4.1.3 Carga máxima un lado del puente 140
4.1.4 Carga máxima alterna en la mitad de la longitud del puente .. 140
4.2 Efectos secundarios 141
4.2.1 Flexión de las péndolas 141
4.2.2 Efectos locales en el tablero 142
4.2.3 Vibraciones de las péndolas 142
5 COMPARACIÓN ENTRE LOS TIPOS DE PUENTES EN ARCO 143
6 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE CONSTRUCCIÓN 144
7 RESUMEN FINAL 147
8 BIBLIOGRAFÍA 147
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 147
APÉNDICE A: FORMAS PRÁCTICAS DE GARANTIZAR QUE LAS VIBRACIONES DE LAS PÉNDOLAS SE REDUCEN AL MÍNIMO 149

Lección 18.8: Puentes Atirantados 151

1 INTRODUCCIÓN 154
2 TIPOS 155
2.1 Disposición del cableado 155
2.2 Condiciones de apoyo de la jácena 156
2.3 Posición de los planos de los cables y tipos de jácena 157
3 ELECCIÓN DE LOS ELEMNTOS 158
3.1 Cableado 158
3.2 Jácena 158
3.3 Torre 160
4 ASPECTOS ESPECIALES DE COMPORTAMIENTO Y ANÁLISIS 162

5 UNIONES 165
6 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE CONSTRUCCIÓN 167
7 RESUMEN FINAL 169
8 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 169

Lección 18.9: Puentes Colgantes 171

1 INTRODUCCIÓN 174
2 TIPOS 176
3 ELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS 177
3.1 Los cables principales 177
3.2 Torres 178
3.3 Viga de rigidez 179
3.4 Anclajes 180
4 EFECTOS ESPECIALES DE COMPORTAMIENTO Y ANÁLISIS 182
4.1 Temperatura 182
4.2 Acciones aerodinámicas 182
4.3 Análisis 184
5 UNIONES 186
5.1 Péndolas y flejes de cables 186
6 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE CONSTRUCCIÓN 188
7 RESUMEN FINAL 189
8 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 189

Lección 18.10: Equipamiento del Puente (Apoyos, Pretiles, etc.) 191

1 SISTEMAS DE APOYOS 194
1.1 Función 194
1.2 Plan de conjunto 194
1.3 Tipos de apoyos 194
1.3.1 Apoyos de acero 195
1.3.2 Apoyos elastoméricos 197
1.3.3 Apoyos de caja 198
1.3.4 Apoyos de rótula (esféricos) 199
1.4 Condiciones de instalación de los sistemas de apoyo 199

2 ACABADOS 201
2.1 Capa de impermeabilización 201
2.1.1 En una losa de hormigón 201
2.1.2 En una losa ortotrópica 201
2.2 Capa de desgaste 201
2.2.1 En una losa de hormigón 202
2.2.2 En una losa ortotrópica 202
3 JUNTAS DE DILATACIÓN 203
3.1 Cracteríticas de las juntas de dilatación 203
3.1.1 Campo de movimiento 203
3.1.2 Características del diseño 203
3.2 Tipos de juntas de dilatación 203
3.2.1 Juntas con revestimiento contínuo (Junta de obturador asfáltico) 203
3.2.2 Juntas dentadas 204
3.2.3 Juntas elastoméricas 204
3.2.4 Juntas de postigo de rodillo 204
3.2.5 Juntas de acero múltiples o juntas de fuelle 204
4 PRETILES 206
4.1 Pretiles para peatones 206
4.2 Barreras de choque 206
4.3 Barreras de seguridad 207
5 PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN 208
6 DRENAJE DEL AGUA DE LLUVIA 209
7 IMPOSTAS 210
8 INSTALACIONES DE INSPECCIÓN 211
8.1 Instalaciones fijas 211
8.2 Instalaciones móviles 211
8.3 Equipo especial 211
9 INTEGRACIÓN DEL EQUIPAMIENTO EN AL DISEÑO GENERAL 212
10 RESUMEN FINAL 213
11 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 213

Lección 18.11: Cubrejuntas y otras uniones en Puentes 215

1 INTRODUCCIÓN 218
2 TIPOS DE EMPALMES 219
2.1 Empalmes soldados 219
2.2 Empalmes atornillados 220
2.3 Empalmes híbridos 220
3 DISEÑO 222
4 TIPOS DE BARRA 223
4.1 Vigas laminadas y armadas 223
4.2 Vigas de celosía 223
4.3 Barras secundarias 223
4.4 Tableros ortotrópicos 225
5 FATIGA 226
6 FABRICACIÓN Y MONTAJE 227
7 INSPECCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD 228
8 RESUMEN FINAL 229
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 229

Lección 18.12: Introducción a la Construcción de Puentes 231

1 INTRODUCCIÓN 234
2 PROGRAMACIÓN INICIAL 236
2.1 Promoción 236
2.2 Programación 236
2.3 Formalización del contrato 236
2.4 El supervisor independiente 236
3 PROCEDIMIENTOS DE LICITACIÓN 237
4 VALORACIÓN DEL COSTE DE UN PUENTE DE ACERO 238
5 CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE UN LICITADOR COMO FABRICANTE DE ESTRUCTURAS DE ACERO 239
5.1 Capacidad técnica 239
5.2 Programa 239
5.3 Costes 239

6 EJECUCIÓN-GENERALIDADES 240
7 MATERIALES 241
7.1 Especificaciones del acero 241
7.2 Clase de acero y el fabricante de taller 241
7.3 Soldabilidad y procedimientos de soldadura 241
8 PLAN DE CONJUNTO E INSTALACIONES DEL TALLER 243
8.1 Generalidades 243
8.2 Objetivos 243
8.3 Taller de fabricación 243
8.4 Estandarización 244
9 LA FABRICACIÓN EN LA PRÁCTICA 246
9.1 Introducción 246
9.2 La información para fabricación 246
9.3 Tamaño de las piezas fabricadas 246
9.4 Procedimiento de un puente mixto típico 248
9.5 Vigas armadas 250
9.6 Puentes de celosías o de vigas de celosías 250
9.7 Puentes de vigas en cajón 253
10 TRANSPORTE 255
11 ENSAMBLAJE Y MONTAJE EN LA OBRA 256
11.1 Introducción 256
11.2 Métodos de montaje 256
11.2.1 Generalidades 256
11.2.2 Montaje a pie de obra 256
11.2.3 Lanzamiento 256
11.2.4 Izado 257
11.2.5 Montaje en voladizo 257
11.2.6 Deslizamiento 257
11.2.7 Elección del método 257
11.3 Control de tolerancias dimensionales 258
11.4 Efectos del viento 258
11.5 Uniones en la obra 258
12 ORGANIZACIÓN EN LA OBRA 260
12.1 Generalidades 260

12.2 El representante en la obra 260
12.3 Personal subalterno en la obra 260
12.4 Información facilitada 260
12.5 Personal del promotor en la obra 260
13 RESUMEN FINAL 261
14 BIBLIOGRAFÍA 261

ESDEP TOMO 18
SISTEMAS ESTRUCTURALES: PUENTES

Lección 18.1: Elección Conceptual

OBJETIVOS/CONTENIDO

Introducir al proyectista en los principales sistemas conceptuales que se tienen que aplicar para el cálculo de puentes de acero y mixtos de forma económica y satisfactoria.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Ninguno

LECCIONES AFINES

Lección 2.6.1: Introducción al Proyecto de Puentes de Acero y Mixtos Parte 1.

Lección 2.6.2: Introducción al Proyecto de Puentes de Acero y Mixtos Parte 2.

RESUMEN

Esta lección subraya la importancia del diseño conceptual correcto de puentes. Después de una breve introducción acerca de los diferentes tipos de puentes, destaca las influencias que la función de los puentes y otros factores que pueden ejercer en la selección de la forma estructural correcta.

1. PRELIMINAR

"Si comprende bien el concepto, el proyecto estará bien". Una afirmación trivial, pero que contiene un elemento considerable de verdad (siempre que, por supuesto, el desarrollo del concepto se lleve a cabo de forma correcta). Si el concepto es erróneo, conducirá en el mejor de los casos a un proyecto poco óptimo, o en el peor de los casos a un trabajo muy ineficaz o a un proyecto bastante poco apropiado a su ubicación. El proyecto conceptual no implica cálculos pormenorizados; en efecto, en la mayoría de las circunstancias, un proyectista experimentado probablemente sería capaz de realizar un proyecto seguro y económico a partir de la experiencia anterior y sólo utilizaría cálculos minuciosos como una verificación final o para "un ajuste".

El objetivo de esta lección es ofrecer a un proyectista inexperto una orientación sobre las elecciones conceptuales que se deben realizar. Se expresa deliberadamente en términos generales y no hace uso específico de normas nacionales o internacionales en particular para el diseño de puentes. Además, muchos de los conceptos descritos podrían diseñarse tanto en acero como en hormigón; en dichos casos, se hace hincapié en la construcción de acero.

2. FORMAS FUNDAMENTALES DE PUENTES

2.1 Introducción

Antes de intentar describir cómo aborda su trabajo un proyectista, resulta útil hacer una distinción en términos muy amplios entre los diversos tipos de puentes. (En la lección 2.6.1 se ofrece un catálogo más detallado de los tipos de puentes: Introducción al Diseño de Puentes de Acero y Mixtos Parte 1. En las lecciones 18 restantes se habla sobre diseño).

2.2 Puentes que soportan cargas principalmente a flexión

La gran mayoría de los puentes son de este tipo. Las cargas se transfieren a las estructuras de apoyo y pilas, mediante losas o vigas que actúan a flexión, es decir, los puentes obtienen su resistencia sustentadora a partir de la capacidad de las losas y vigas para resistir los momentos de flexión y los esfuerzos de cizallamiento o cortantes. Sólo en los tramos más cortos es posible adoptar una losa sin forma de viga. Así, generalmente se aludirá a este tipo de puente como puente de vigas de alma llena. Como puede verse en la lección 2.6.1, es posible una amplia variedad de formas estructurales. La figura 1 muestra un alzado típico de un puente de vigas de alma llena en el que se definen diversos términos.

2.3 Puentes que soportan sus cargas principalmente como esfuerzos axiales

Este tipo puede subdividirse a su vez entre aquellos puentes en los que los esfuerzos axiales son de compresión (arcos) y aquéllos en los que estas fuerzas son de tracción (puentes colgantes y puentes atirantados). A dichas fuerzas normalmente tienen que ofrecerles resistencia elementos que soportan fuerzas de sentido contrario. Las figuras 2a a 2d muestran los sistemas estructurales básicos de algunos disposiciones típicas.

No se debe pensar que la flexión no tiene importancia en estructuras de este tipo. Es cierto que en la mayoría de los puentes colgantes, la flexión de la viga de rigidez (véase la figura 2c) no es una carga principal para la que es poco probable que la sobretensión provoque un fallo global; sin embargo, en puentes de cables inclinados (especialmente si los tirantes están muy separados), la flexión de la jácena constituye una carga principal. De forma similar, en los puentes de arco, cargas no uniformes del nervio puede producir momentos de flexión principal que se desarrollarán en el mismo y pueden perfectamente determinar el diseño del arco.

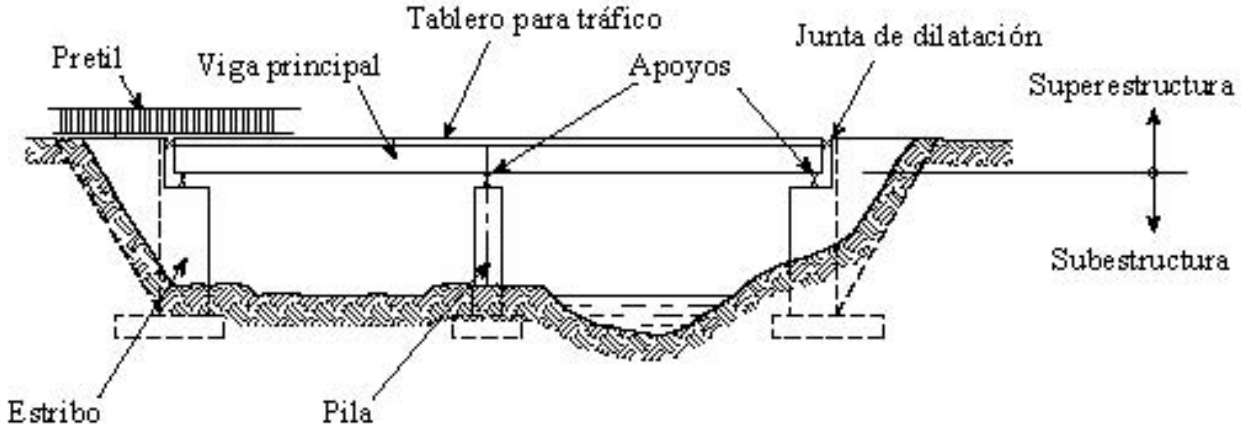


Figura 1 Alzado de un puente de vigas de alma llena

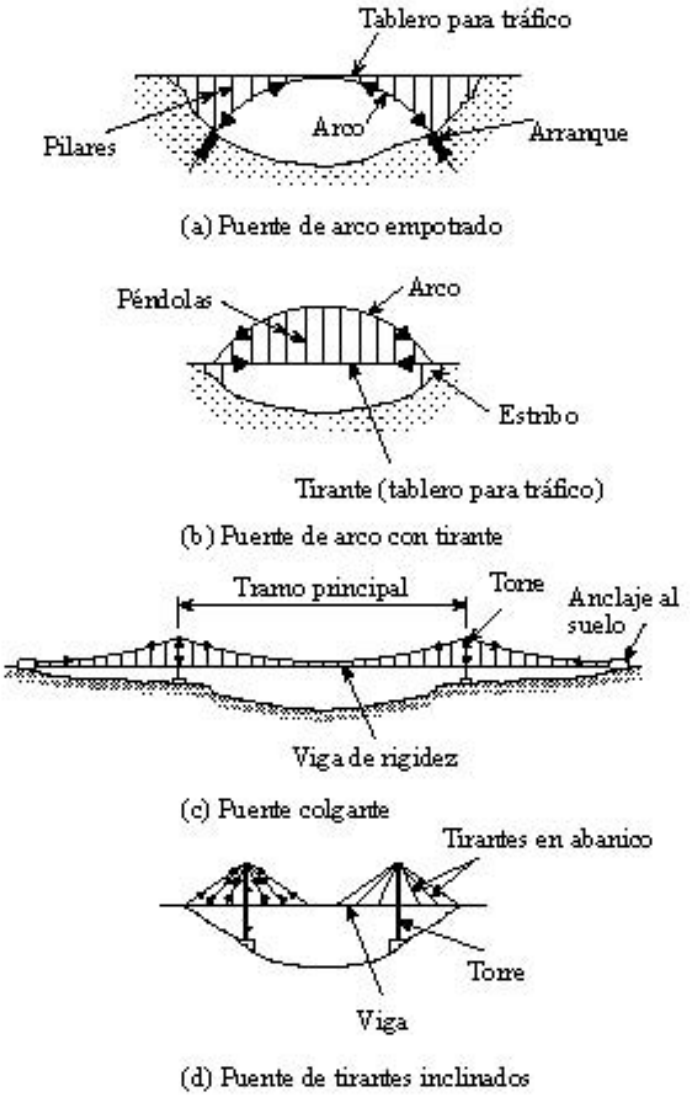


Figura 2 Tipos de puente que soportan las cargas mediante esfuerzos axiales

2.4 Puentes de Celosía

Los puentes de celosía no son en sí mismos formas específicas de puentes; más bien, se utilizan vigas de celosía para realizar las funciones de los elementos específicos en uno de los tipos anteriores. Por ejemplo, una jácena a flexión o un arco a compresión axial puede diseñarse como una celosía en lugar de como una jácena de alma llena de chapa. Una viga de celosía utilizada como una jácena bajo flexión soporta sus momentos de flexión mediante el desarrollo de cargas axiales en sus cordones y sus esfuerzos cortantes mediante el desarrollo de cargas axiales en sus elementos de alma. Las definiciones pueden llegar a ser algo imprecisas, p. ej., un arco con cuelgues (véase la figura 2b) en algunos casos se puede considerar que actúa como una jácena de celosía, especialmente si las péndolas están inclinadas para conformar un sistema triangulado.

3. OBJETIVO Y FUNCIÓN DE UN PUENTE

3.1 Introducción

Un puente debe proporcionar un servicio (que puede ser el tráfico de una carretera o vía férrea, un paso peatonal, servicios públicos, etc.) sobre un obstáculo (que puede ser otra carretera o línea férrea, un río, un valle, etc.) y transferir las cargas del servicio a los cimientos a nivel del suelo. Las consideraciones funcionales que ejercen una mayor influencia en la elección conceptual son:

- Los requisitos de espacio libre (tanto vertical como horizontalmente) y la necesidad de evitar impactos
- El tipo y magnitud de la carga que se va a soportar
- La topografía y geología de la obra

No es posible colocar estas consideraciones en un orden de importancia en particular; es probable que la importancia relativa varíe de un proyecto a otro y cada uno debe considerarse según su influencia.

3.2 Requisitos de espacio libre

Todos los puentes deben diseñarse para garantizar, en la medida de lo posible, que no reciban el impacto de los vehículos, buques o trenes que puedan pasar por debajo. Este requisito se cumple normalmente especificando unos espacios libres mínimos. Es necesario recordar que los valores diseñados deben tener en cuenta las flechas que se producen debido a cualquier carga que pueda ocurrir en la estructura del puente. Los requisitos de espacio libre pueden así determinar el tramo de un puente y además están relacionados de forma significativa con el canto de construcción. Aunque los requisitos normalmente no determinarán con precisión el tipo de puente, quizás eliminen algunas posibilidades.

Generalmente y a modo de ejemplo, sería de esperar que un puente sobre una carretera importante tuviera un espacio libre vertical mínimo de aproximadamente 5,3 metros; incluso con esto podría no evitarse un impacto accidental (p. ej., se han dado casos de brazos de grúas que se desplazan sobre vehículos oruga, que se han soltado y desplazado). Además, las posiciones de las pilas deben ser tales que se reduzca al mínimo la probabilidad de un impacto de vehículos errantes, tanto para proteger a la pila como al propio vehículo. Este requisito se consigue generalmente alejando la pila a una distancia razonable del borde de la calzada.

Las autoridades ferroviarias establecen normas estrictas para el espacio libre vertical y lateral sobre los ferrocarriles, normas que deben cumplirse.

Las autoridades de navegación especifican espacios libres sobre los ríos, para tener en cuenta no sólo la altura de los mástiles y la anchura de los barcos que pasan bajo el puente, sino también los requisitos particulares de las pilas en la vía fluvial (o en una planicie de inundación) para evitar una excesiva velocidad de caudal y la socavación de las orillas del río.

Al considerar el espacio libre vertical, un proyectista debe tener en cuenta los problemas de su consecución. La pendiente del acceso del puente de carretera normalmente no debe sobrepasar un 4% aproximadamente y un puente de ferrocarril mucho menos.

3.3 Cargas

El tipo y la magnitud de la carga están relacionados de forma significativa con la forma de un puente. Debido a su naturaleza es imposible determinar exactamente la carga de una autovía, ya sea en su disposición o en su magnitud. Por razones obvias, un puente de autovía requiere un tablero sobre el que pueda circular el tráfico y (a menos que el tramo sea tan corto que una simple losa sea suficiente para extenderse entre los estribos) el tablero debe ser lo bastante fuerte como para distribuir la carga a las vigas principales. Tradicionalmente, los puentes de ferrocarril se han proyectado sin tableros com-

pletos, ya que la posición de la carga era decisiva y el puente podía construirse con vías de raíles que discurrían directamente sobre las jácenas. No obstante, los modernos puentes de ferrocarril, especialmente en ciertos entornos, poseen tableros para soportar el balasto. Esto último es necesario para proporcionar una reducción del ruido satisfactoria. Un puente de servicios, p. ej., un oleoducto, puede prescindir de forma similar de un tablero.

Cada país posee su propio reglamento relativo a la magnitud de la carga en puentes de ferrocarril y carretera. Con el tiempo, en la Comunidad Europea este reglamento será sustituido por un reglamento europeo de carga estándar, pero hasta entonces se seguirán usando los reglamentos nacionales. Para puentes de carretera, la mayoría de los reglamentos nacionales tienen en común una carga uniforme, junto con una carga lineal (o series de cargas puntuales), que representan ejes pesados aislados. En muchos reglamentos, la carga uniforme tiene una intensidad decreciente a medida que aumenta la longitud del puente, para tener en cuenta la probabilidad reducida de una concentración de camiones pesados. Además, existen reglas para cargas de carriles múltiples, que con frecuencia dan por sentado que no más de dos carriles están cargados totalmente al mismo tiempo, basándose de nuevo en un enfoque probabilístico. Muchas autoridades también especifican verificaciones para un único vehículo anormal muy pesado. En muchos reglamentos, el efecto del impacto (amplificación dinámica) de las cargas de las carreteras se tiene en cuenta implícitamente en el reglamento de la carga estática.

Las cargas de las vías férreas son más deterministas, puesto que las cargas de los trenes más pesados se conocen razonablemente bien. No obstante, muchos reglamentos sobre cargas de vías férreas requieren un cálculo explícito del efecto del impacto.

Además, las fuerzas que surgen del frenado o la aceleración de los vehículos, los efectos centrífugos sobre los puentes curvos, los efectos de la temperatura y el viento deben tenerse en cuenta cuando sean relevantes.

Mientras que los detalles de cargas aplicadas son apropiados para el proyecto detallado más que para el proyecto conceptual de un puente, ciertos aspectos entran dentro del concepto. Por ejemplo, siempre que se especifican vehículos anormalmente pesados, el puente requerirá una buena repartición de la carga transversal. Este requisito puede eliminar ciertas formas de construcción. Los efectos de la temperatura son importantes para el plan de conjunto del aparato de apoyo y la articulación estructural y la carga debida al viento desempeña un papel predominante en el proyecto conceptual de los tramos muy largos, aun cuando puede resultar insignificante para tramos cortos (excepto, posiblemente, para los cimientos).

La lección 18.2 ofrece una introducción pormenorizada a la carga de los puentes.

3.4 La Topografía y Geología de la Obra

Algunas veces, este aspecto determina por sí solo la forma estructural. Por ejemplo:

- La topografía general de la obra determinará probablemente el trazado de la carretera o vía férrea. Con alguna frecuencia esto puede significar que los puentes tendrán que cruzar sobre otras carreteras, vías férreas o ríos en un ángulo considerable, lo que da lugar a tramos oblicuos (figura 3). La carretera puede estar en curva; mientras que es posible curvar un puente para seguir el curso de la carretera, con frecuencia es

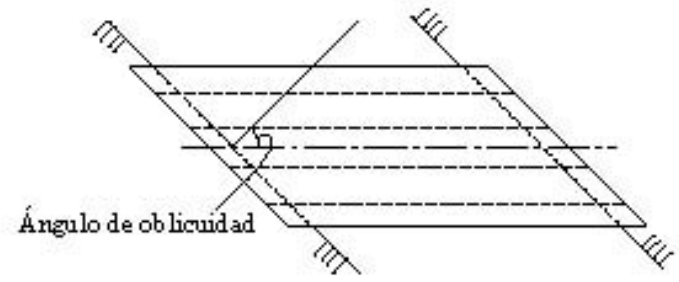


Figura 3 Típica planta de un puente esviado

caro y estructuralmente ineficaz, ya que generalmente impone el uso de jácenas de gran resistencia a la torsión, incluso para tramos cortos. Si la curva es ligera, quizás sea preferible construir el puente como una serie de tramos rectos.

- Unas deficientes condiciones del terreno darán lugar a menos cimientos y, por lo tanto, a unos tramos más largos. En la figura 4 se ofrece una representación esquemática de los costes de un puente. Se debe encontrar un equilibrio entre el coste de los cimientos y la superestructura, para reducir al mínimo el coste total.
- Algunas veces la topografía por sí sola indicará una solución en particular; el caso clásico es un cañón profundo y de lados rocosos, que es perfectamente apropiado para un puente en arco fijo (figura 2a).

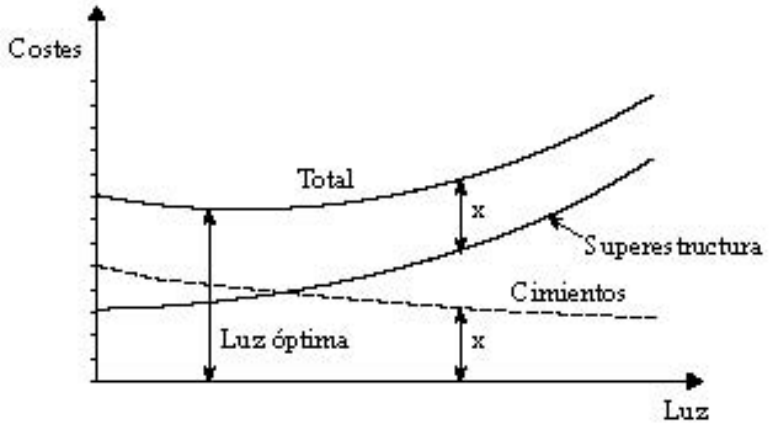


Figura 4 Costes de un puente (en diagrama)

Generalmente, la obra del puente viene determinada por la geometría del obstáculo y el terreno local.

- Sin embargo, siempre que sea posible, está bien considerar minuciosamente el emplazamiento. A menudo existe la posibilidad de reducir la magnitud del tramo, de evitar situar el puente en una curva, de reducir el ángulo de sesgo o de mejorar la magnitud de construcción.

4. OTROS FACTORES QUE EJERCEN INFLUENCIA EN LA ELECCIÓN CONCEPTUAL

4.1 Introducción

Además de las consideraciones sobre el objetivo y la función del puente, existen otros factores importantes que pueden ejercer una influencia significativa en el diseño conceptual de un puente.

4.2 Métodos de montaje

Desde hace tiempo se ha comprendido que un proyectista debe tener en cuenta en el diseño el método con el que se montará un puente. De hecho no es infrecuente el caso en el que dicha consideración debe realizarse incluso en el momento de la elección conceptual, ya que puede ocurrir que el proyecto más atractivo a primera vista sea imposible de construir en una ubicación en particular. Por ejemplo, un proyecto que se basa en su construcción en grandes piezas (tales como una gran viga en cajón) puede descartarse debido a la imposibilidad de transportar dichas piezas a una obra remota con carreteras de acceso inadecuadas.

Con frecuencia, especialmente en grandes estructuras, es posible ajustar la distribución del momento y de las fuerzas en una estructura mediante la elección de una secuencia de montaje particular. Esta posibilidad puede afectar a la elección conceptual, p. ej., el proyectista de un gran cruce estuarial de tres tramos con un tramo central de 200 m puede considerar que la mejor elección conceptual es una viga en cajón de acero reforzada en las pilas intermedias, que soportaría así grandes momentos negativos en estas pilas y momentos positivos comparativamente bajos en el centro del vano. No obstante, el método de montaje más apropiado para esta obra puede ser poner a flote y levantar la mayor parte del tramo central en una pieza, provocando así grandes momentos positivos de carga permanente en el centro del vano. Construyendo altos los apoyos extremos y bajando los extremos del puente después de que se realiza la unión del tramo principal, se puede provocar un momento negativo global para contrarrestar el momento positivo no deseado. Ciertamente esta solución requiere un análisis muy minucioso y un cálculo del trabajo de taller y las dimensiones de contraflecha para obtener el perfil de calzada correcto, ¡pero al menos el concepto estará bien!

Existen muchos métodos de montaje de puentes de acero; los cinco típicos son:

- Montaje a pie de obra
- Lanzamiento
- Elevación
- Montaje en voladizo
- Deslizamiento

Son posibles las combinaciones de estos métodos.

4.2.1 Montaje a pie de obra

Este método implica el montaje del puente a partir de sus componentes o subconjuntos individuales en su posición final, generalmente sobre cimbras o alguna otra forma de apoyo temporal, haciendo las juntas en la obra y retirando las cimbras. Debe proporcionarse un adecuado servicio de grúas que abarque toda la superficie del tablero. La presencia de cimbras puede bloquear temporalmente una carretera, vía férrea o río sobre el que se construye un puente. Debido a que normalmente no se utilizan grandes piezas individuales, es un método que puede ser factible cuando el acceso a la obra es difícil. El montaje a pie de obra puede usarse conjuntamente con otros métodos de montaje.

4.2.2 Lanzamiento

Este método supone el montaje de un puente sobre rodillos o patines en su alineación final pero al lado del obstáculo que se ha de cruzar. Cuando se ha finalizado, se empuja o se tira hacia adelante para cruzar el obstáculo y se hace descansar sobre aparatos de apoyo en la orilla contraria (figura 5).

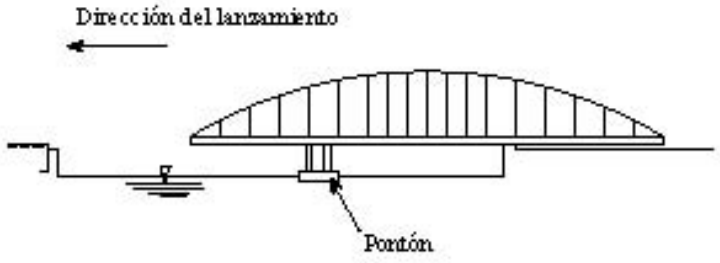


Figura 5 Sistema de lanzamiento con pontón

Aunque su principio es sencillo, el lanzamiento requiere una obra donde se puedan construir las grandes piezas del puente en línea conforme a la posición final, pero en la orilla. La operación también requiere un control muy minucioso y un análisis detallado, ya que, en las diversas etapas, las secciones del puente pueden estar sometidas a cargas que difieran en gran medida de aquéllas que se dan en estado de servicio.

4.2.3 Elevación

Este método implica levantar una parte independiente o la totalidad de un puente a o cerca de su posición final (Figura 6). Entre las piezas levantadas se puede encontrar desde una pequeña pasarela de unas pocas toneladas, hasta una gran sección de un gran cruce cuyo peso sea de 1000 toneladas. La elevación puede ser una operación completa en sí misma o parte de un esquema de montaje en voladizo.

El equipo de elevación varía desde pequeñas grúas para puentes pequeños hasta grúas flotantes muy grandes para piezas importantes de puentes de estuarios; pueden utilizarse cabrestantes o gatos en la parte del puente que ya esté montada. Por lo tanto, la posición y la topografía de la obra tendrán un efecto significativo en la elección conceptual.

4.2.4 Montaje en voladizo

Este método implica construir un puente, normalmente continuo sobre varios tramos, progresivamente a partir de uno o ambos estribos, uniendo secciones al extremo de las partes ya montadas (Figura 7). Un tramo de anclaje se iza o se monta in situ y, a continuación, se montan en voladizo las secciones a partir de aquí, o bien elevándolas desde el nivel del suelo o bien deslizándolas a lo largo del tablero y haciéndolas descender desde el extremo. La situación de la obra y el acceso a la misma determinarán el tamaño de las piezas montadas y esto a su vez tendrá que ver con la

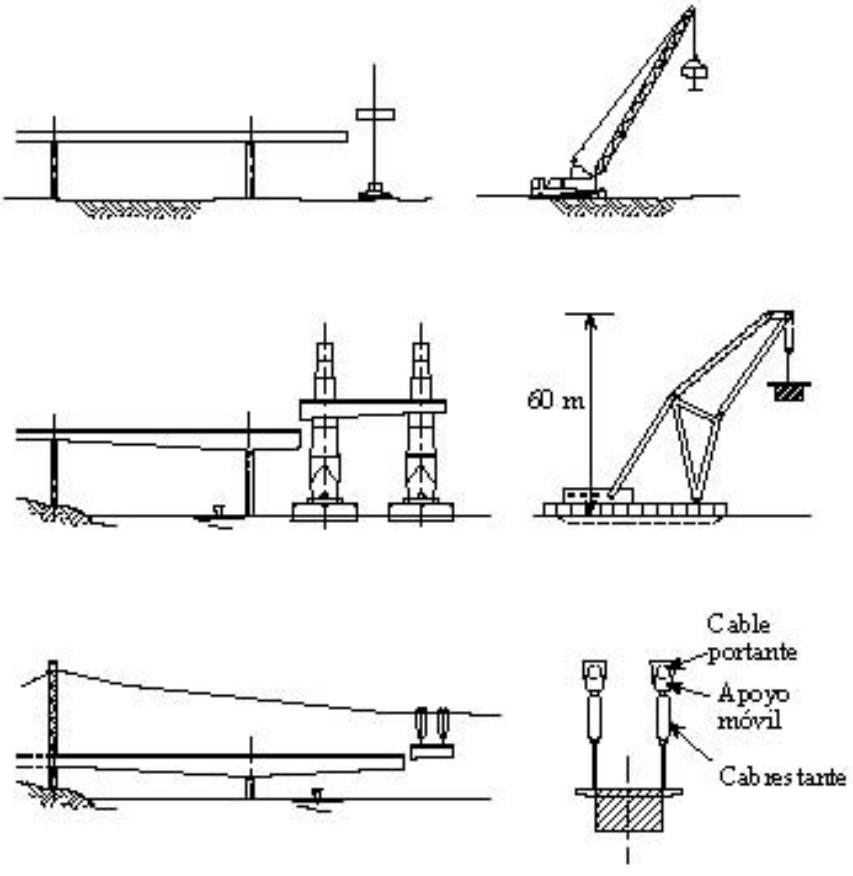


Figura 6 Métodos de elevación de secciones de puente

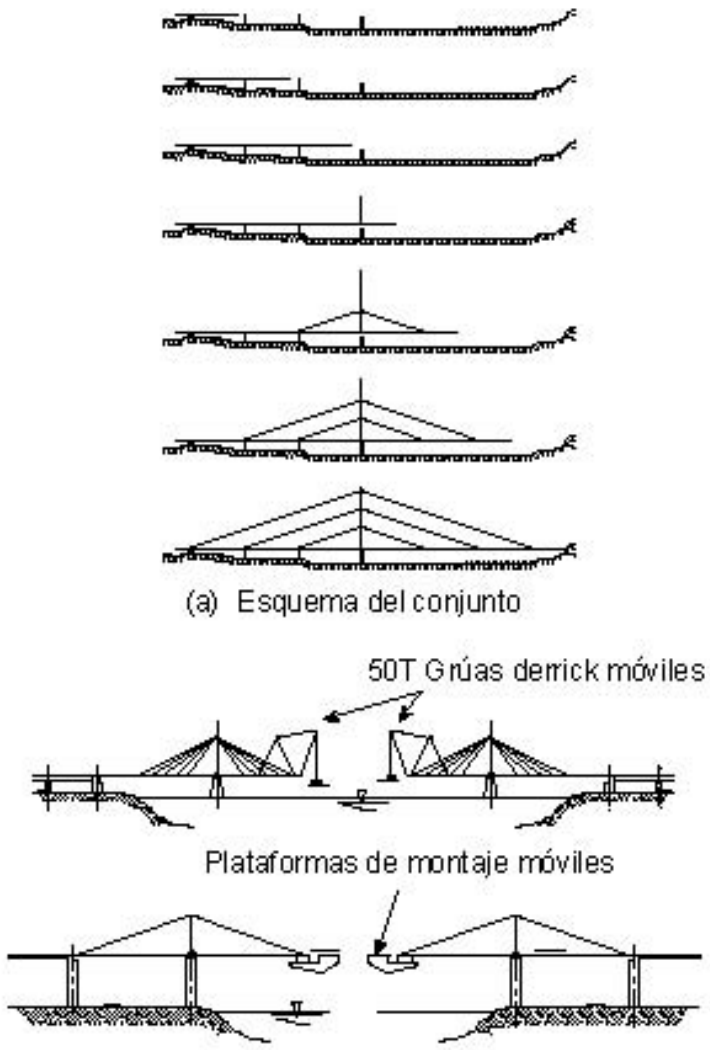


Figura 7 Montaje en voladizo de un puente de tirantes

elección original del concepto estructural. El montaje en voladizo es un método ideal para la construcción de puentes atirantados, usando los vientos como apoyos para el voladizo a medida que avanzan las obras.

4.2.5 Deslizamiento

Este método supone la construcción del puente desplazado lateralmente de la ubicación final y, a continuación, levantándolo lateralmente hasta su posición final. Por lo general se utiliza para sustituir un puente existente que no puede retirarse del servicio durante un período prolongado. Por razones evidentes sólo es posible utilizarlo para ubicaciones muy estrictamente limitadas.

4.3 Técnicas y materiales de construcción locales

Ni que decir tiene que un puente debe adaptarse a la tecnología local. No es razonable especificar un proyecto sofisticado en acero soldado de alta resistencia si se tiene que importar todo el material y la mano de obra. Esta consideración se aplica no sólo a los puentes pequeños: el nuevo puente Hooghly de un tramo de 460 m en Calcuta, en construcción en 1992, se diseñó como un puente de cables atirantados remachados; las técnicas del remachado todavía estaban disponibles en India y los aceros locales podrían haber dado problemas con la soldadura en obra; el proyecto resultó una solución económica, mientras que en Europa probablemente ya no existen remachadores y el acero soldado es lo normal.

4.4 Inspección y mantenimiento futuros

No se debe poner mucho énfasis en la importancia de la inspección y el mantenimiento futuros, en las etapas tanto del proyecto conceptual como del detallado. Es indudable que se le ha prestado poca atención en el pasado y, como consecuencia, muchos puentes, de otra manera satisfactorios, se han deteriorado debido a la dificultad de su inspección y mantenimiento. Es especialmente importante señalar que en ubicaciones donde el acceso resulta difícil (ya sea físicamente o porque pudiera provocar una interrupción de los servicios) deben evitarse en lo posible los detalles que pudieran provocar deterioro. Esto se estudiará más detenidamente en varios sentidos, por ejemplo, si un puente debe

ser una serie de tramos simples o si debe ser continuo.

En la etapa conceptual del proyecto, un proyectista debe tener en cuenta si sería apropiado utilizar un material tal como un acero resistente a los agentes climatológicos o quizás si la estructura debería estar totalmente construida con un material libre de mantenimiento para protegerlo y proporcionarle acceso para su inspección. Cualquiera de estos recursos podría dar lugar, por ejemplo, a una necesidad de un mayor espacio libre del puente sobre el obstáculo que se está cruzando. Quizás tendrían que considerarse simultáneamente con el plan de conjunto del proyecto global. Por ejemplo, la topografía podría indicar que un pequeño cambio en la alineación podría dar cabida a un mayor espacio libre con poco o ningún gasto adicional.

4.5 Aspectos estéticos y ambientales

El aspecto de los puentes se ha convertido en los últimos años en una cuestión de gran importancia. Con frecuencia, un proyecto hace que una carretera o una línea de ferrocarril pasen a través de una zona de gran belleza natural y es importante que cualquier estructura guarde armonía con el entorno y no le afecte adversamente. Muchas autoridades piensan que algunos puentes realmente contribuyen al entorno, proporcionando un interesante centro de atención en un paisaje que de otra forma estaría vacío; el puente Severn constituye un ejemplo típico. No obstante, lamentablemente existen muchos puentes para los que lo contrario es cierto. No pocas veces el problema se podría haber evitado siguiendo unas reglas sencillas.

Por ejemplo, generalmente se acepta que un puente es más agradable desde el punto de vista estético con un número impar de tramos que con un número par. Además, cierto grado de profundidad en las pilas le puede añadir atractivo. La Figura 8 muestra una ubicación típica de un paso superior de carretera, con varias soluciones posibles, de las que cualquiera normalmente es viable estructuralmente. Es indudable que las estructuras de 3 tramos son más atractivas que las de 2 tramos. Por lo tanto, a menos

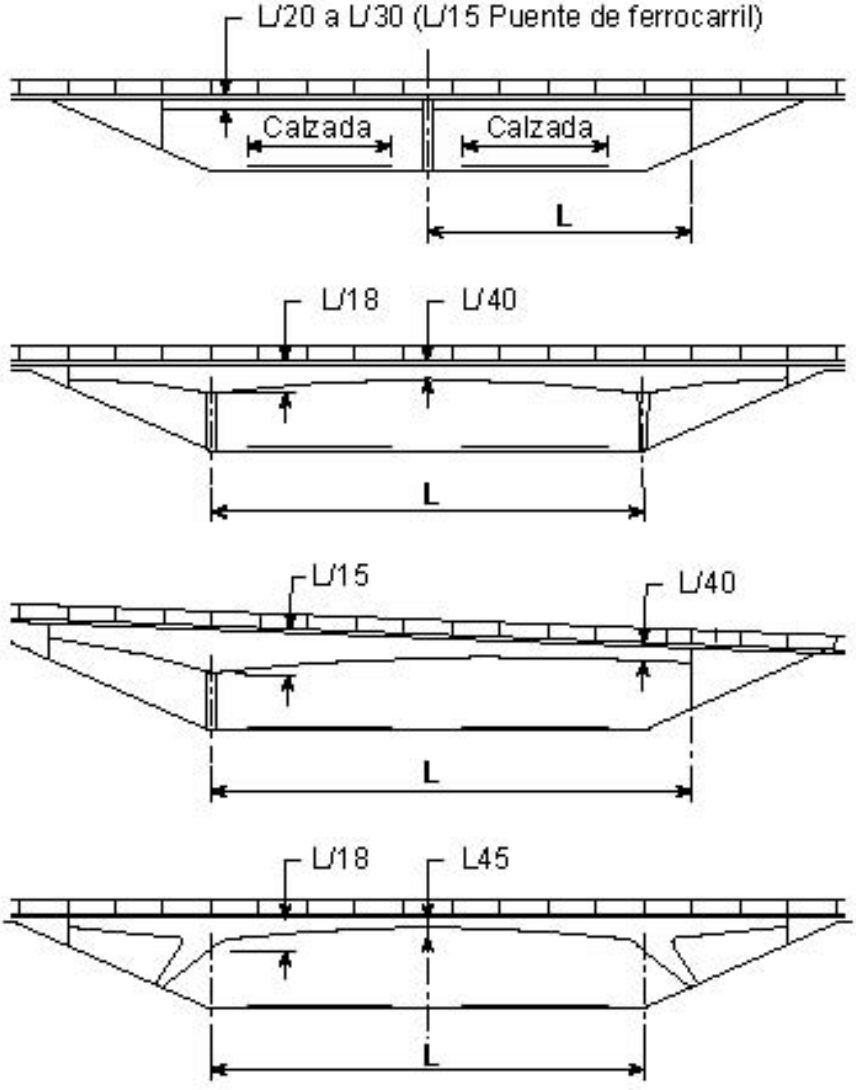


Figura 8 Alzados habituales de puentes sobre carreteras

que existan otras contraindicaciones, la elección conceptual debería tender hacia una solución de 3 tramos.

En la sección 3.3 se indicó que en un puente de ferrocarril es posible montar los raíles directamente sobre las vigas principales. Desgraciadamente, esta disposición da lugar a un gran nivel de emisión de ruido y eso no sería aceptable normalmente, sobre todo en una zona urbana. El suministro de una losa de hormigón de tablero, junto con el uso de balasto y posiblemente montajes de raíles sobre apoyos elastoméricos pueden producir una mejora espectacular y muestra cuándo una elección "obvia" puede ser modificada por consideraciones ambientales.

5. CONSIDERACIONES DETALLADAS - PUENTES DE VIGAS DE ALMA LLENA

5.1 Introducción

En las Secciones 3 y 4 se han estudiado diversos aspectos generales que un proyectista debe tener en cuenta al hacer una elección conceptual. En la sección actual, la atención se centrará en algunas cuestiones más detalladas, como introducción a las formas particulares de construcción que se contemplan en otras lecciones. Como la gran mayoría de puentes son del tipo de jácena simple, nuestra atención se centrará en éstos.

5.2 El Tablero

En la Figura 9 se muestra una sección transversal de un puente de carretera de pequeña luz. Por razones obvias, un puente de este tipo requiere un tablero por el que pueda circular el tráfico. El tablero debe ser lo bastante fuerte como para distribuir las cargas locales a las vigas principales. Para estructuras de jácenas múltiples de este tipo, al proyectista le queda una elección conceptual muy reducida: la experiencia ha demostrado que una losa de hormigón armado de un grosor aproximado de entre 200 y 300 mm, apoyada cada 3 - 3,5 m es apropiada para la mayoría de los fines. Para estructuras de gran luz, las soluciones de vigas gemelas resultan más atractivas y se requiere un tablero más grueso, probablemente de un canto variable o se deben introducir travesaños. Sólo en puentes en los que el peso es realmente importante (p.ej., puentes de gran luz o puentes móviles) normalmente es necesario pensar en algo más.

Una posibilidad para la reducción del peso del tablero es el uso de hormigón aligerado (un ejemplo es el puente Friarton de un tramo principal de 174 m en el Reino Unido, donde el tablero se ha construido como una losa de hormigón armado aligerado). Sin embargo, una alternativa más normal a una losa de hormigón

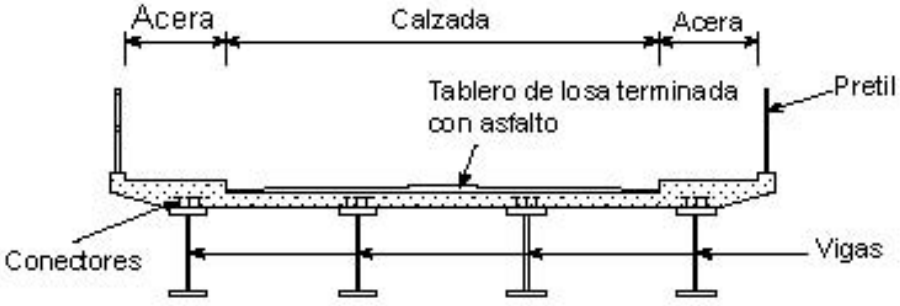


Figura 9 Sección tipo de un puente de carretera con calzada única

armado es un tablero de chapa de acero rigidizada ortotrópicamente. Se han probado muchas disposiciones, algunas de las cuales han experimentado fatiga prematura, producida por las tensiones continuas del tráfico. Ahora parece haberse llegado a un consenso general en Europa respecto a que la sección transversal mostrada en la Figura 10 es la "solución más avanzada" para un tablero de acero en 1992.

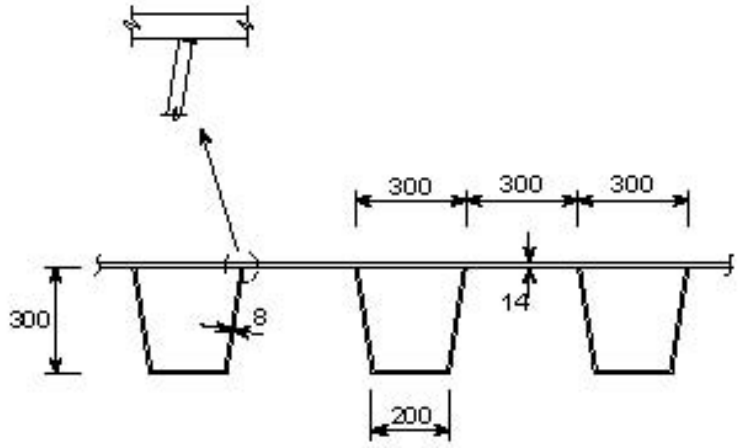


Figura 10 Tablero de acero ortotrópico

Finalmente, se debe subrayar que en los proyectos modernos el tablero, ya sea de hormigón armado o de chapa de acero rigidizada, siempre estará unido a

las jácenas por debajo del mismo, de forma que actúe en combinación con ellas para soportar los momentos de flexión que se les imponen. En el caso de tableros de hormigón, esta unión se realizará utilizando conectores (véase la figura 9) y en el caso de tableros de acero mediante una unión directa (normalmente, soldadura o tornillos de alta resistencia por fricción).

5.3 Disposiciones típicas de puentes de pequeña y mediana luz

Las figuras 8, 11 y 12 muestran diversas disposiciones de conjunto típicas de puentes de este tipo con indicaciones de las dimensiones. En la Sección 4.5 ya se han comentado los aspectos estéticos. En la presente sección se abordan algunas cuestiones técnicas relacionadas con las alternativas. Por ejemplo:

- ¿Cuáles son las ventajas relativas de construir el vano de la losa transversalmente entre las vigas principales (figuras 11 a, b, c, d y f) o construirla longitudinalmente entre jácenas transversales que se extiendan entre las jácenas longitudinales (figura 11e)?
- ¿Debe la losa proporcionar el único medio de distribución para transferir las cargas debidas al tráfico desde la superficie de la carretera a las jácenas longitudinales principales o se utilizarán jácenas transversales y/o arriostramientos transversales adicionales?
- ¿Debe la losa tener un canto constante o variable?
- ¿Deben fabricarse las jácenas longitudinales principales a partir de perfiles laminados o deben elaborarse (p.ej., vigas armadas o vigas en cajón)?
- ¿Deben proyectarse las vigas principales de forma que sean compactas o no compactas?
- ¿Deben las vigas principales tener un canto constante o variable?
- ¿Deben las vigas principales ser continuas sobre las pilas o no? Si son continuas, ¿en cuántos tramos debe estar dividido el puente?
- ¿Cuál es el canto apropiado de las vigas principales?
- ¿Existe alguna ventaja en el hecho de utilizar una estructura distinta a las jácenas libremente apoyadas, p.ej., los pórticos?
- ¿Cómo se tienen en cuenta las cargas ambientales, p.ej., viento, temperatura?

Los puentes mostrados en las figuras 5, 8, 11 y 12 son todos estructuras reales; la figura 11, en particular, identifica seis tipos de secciones transversales para puentes de carreteras, de los que todos se han utilizado con éxito. Al final, la prueba en la etapa de proyecto detallado es qué disposición de conjunto es la más económica para una obra en particular. Resolver esta cuestión quizás requiera una cantidad significativa de cálculos de ensayo y error. No obstante, es útil establecer algunas pautas en la etapa de proyecto conceptual (¡no necesariamente en el mismo orden que las preguntas anteriores!):

- Si se construye una losa que se extienda transversalmente entre las jácenas longitudinales principales, la separación de jácenas se limita a 3 - 3,5 m (a menos que se utilice una losa más gruesa; es probable que dichas losas tengan canto variable). Por lo tanto, si la calzada es ancha, especialmente en el caso de tramos largos, quizás se requiera un número antieconómico y grande de vigas principales. Por otra parte, las vigas principales ampliamente separadas exigen el uso de jácenas transversales que no contribuyen a soportar los momentos de flexión longitudinales. De ahí que para calzadas estrechas, especialmente en tramos cortos, es poco probable que esta disposición resulte económica.
- Cuando una losa de hormigón se extiende entre jácenas transversales, los efectos de flexión local provocan

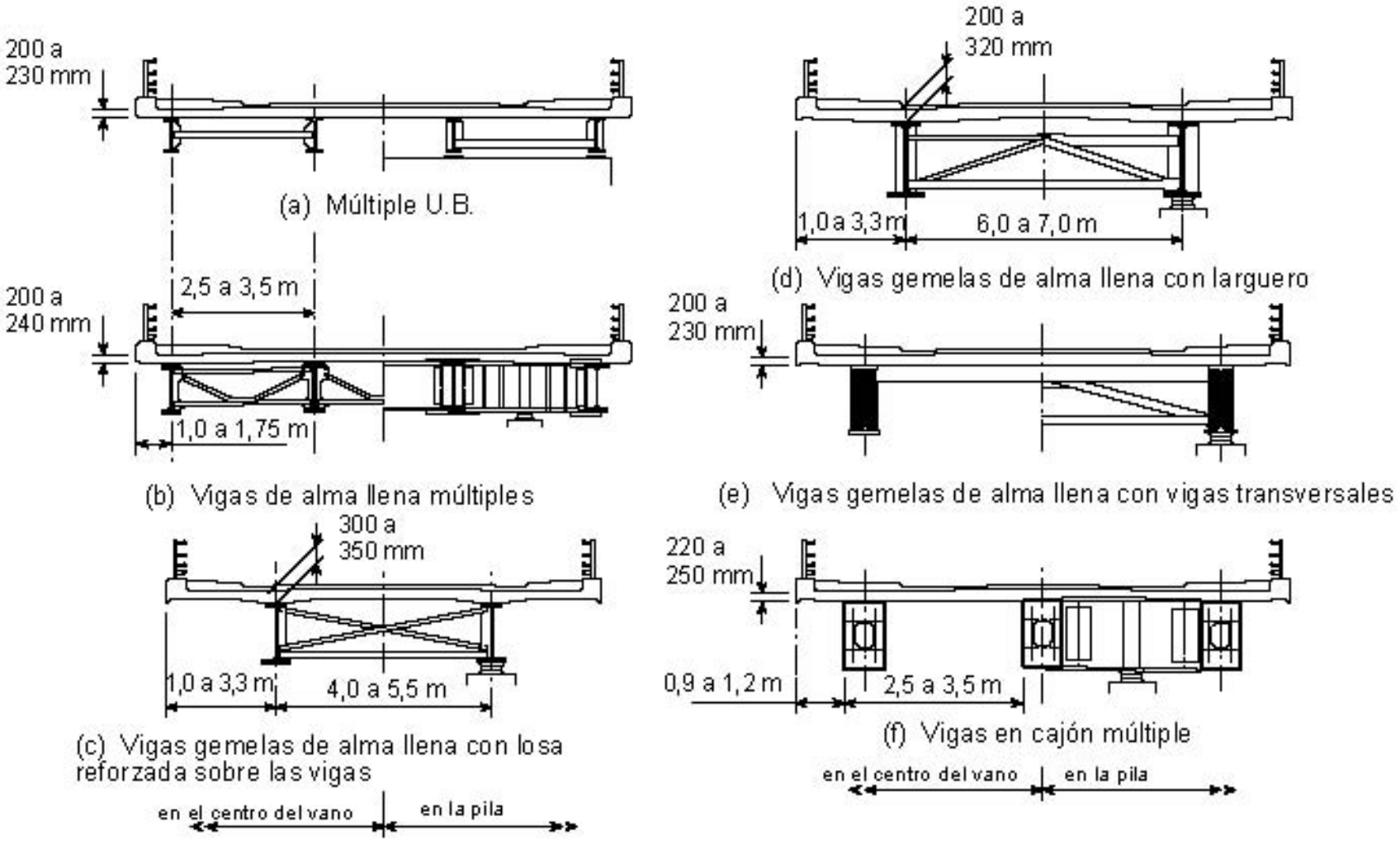


Figura 11 Varias secciones de puentes de carretera

tensiones en la misma dirección que las tensiones de flexión globales. Por consiguiente, con frecuencia los efectos se van añadiendo y la losa tiene que estar diseñada de forma que se tenga en cuenta esto.

- Cuando una losa de hormigón se extiende entre jácenas transversales, los efectos de flexión local provocan tensiones en la misma dirección que las tensiones de flexión globales. Por consiguiente, con frecuencia los efectos se van añadiendo y la losa tiene que estar diseñada de forma que se tenga en cuenta esto.
- Los tableros de chapa de acero casi siempre estarán proyectados para extenderse entre jácenas transversales, ya que si forman parte del ala de compresión de las vigas principales, en cualquier caso requerirán una rigidización longitudinal.
- Una alternativa a las jácenas transversales, para reducir el número de jácenas longitudinales, pero que aún permite que la losa se extienda transversalmente, se muestra en la figura 11d, en la que un larguero longitudinal de pequeña sección soporta la losa y a su vez es soportado desde las vigas principales.
- Normalmente, en el tipo de tramos en los que la solución económica la constituyen jácenas longitudinales múltiples con una losa que se extiende transversalmente, se descubrirá que la losa será suficiente para la distribución de momentos de flexión longitudinales entre las vigas principales sin arriostramiento adicional (no obstante, dicho arriostramiento puede requerirse durante el montaje para estabilizar el sistema).

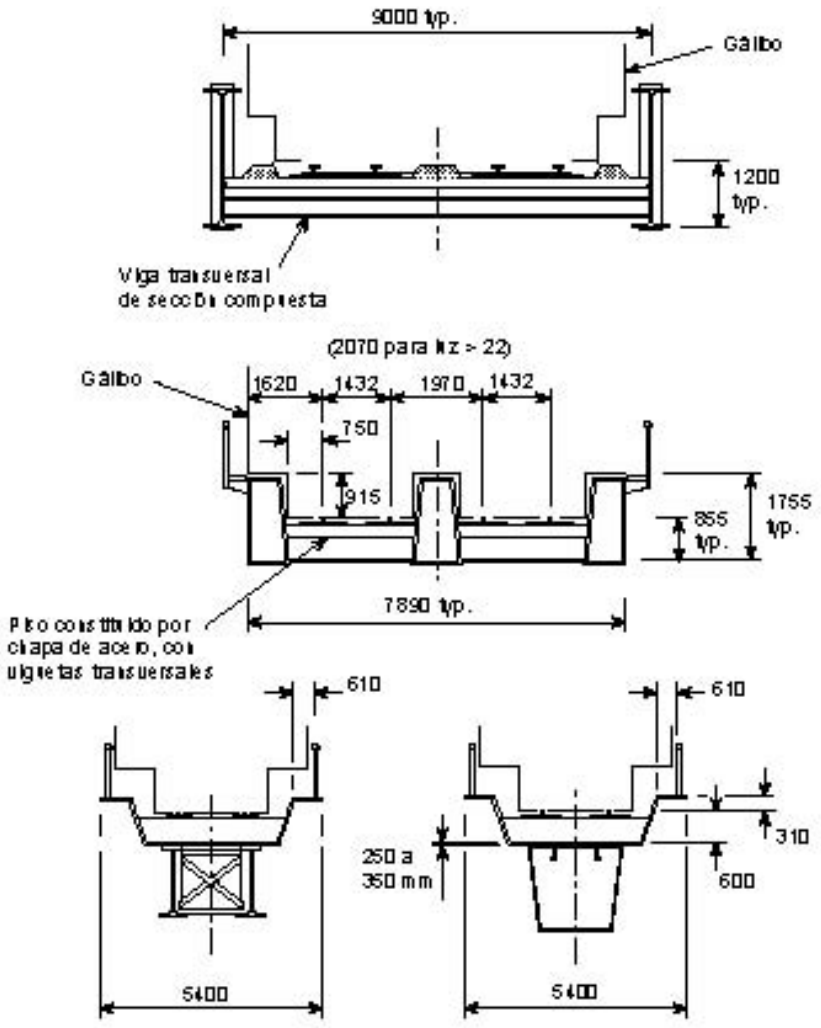


Figura 12 Varias secciones de puentes para ferrocarril

- Generalmente, una losa de canto constante es mucho más económica que una con refuerzo, pero normalmente se limita a un tramo de aproximadamente 3,5 m entre las viguetas de apoyo.
- Los perfiles laminados son significativamente más baratos por tonelada. Sin embargo, tienen una canto limitado, por lo que el tramo máximo para el que pueden utilizarse es limitado.
- Los perfiles armados pueden hacerse más "eficientes" estructuralmente que

los laminados, puesto que el material puede concentrarse allí donde más se necesita, es decir, en las alas, y más especialmente, en el ala inferior cuando el tablero forma una parte significativa del ala superior. Por lo tanto, para el mismo tramo pueden hacerse más ligeros, pero esta ventaja puede contrarrestarse por unos costes de fabricación unitarios más altos, véase la Sección 5.5.

- Las jácenas longitudinales de canto variable son más caras por tonelada que las de canto constante, pero pueden ofrecer ahorros de peso significativos en tramos continuos y con frecuencia son más agradables desde el punto de vista estético.
- Existen argumentos a favor y en contra de la continuidad en los tramos cortos a medios. A continuación se enumeran algunos de ellos:

A favor	En contra
1. Los elementos difíciles de mantener, tales como las juntas de dilatación, pueden reducirse al mínimo.	1. Compresión en el ala inferior cerca de las pilas; por lo tanto, problemas de estabilidad potenciales.
2. Ventajas de canto de construcción reducida	2. Secciones mixtas mucho más eficaces en momentos positivos que en negativos
3. Puede ser esencial para el montaje y/o lanzamiento del puente.	3. Estructura hiperestática -indeterminada-, problemas de asentamiento diferencial, retracción del hormigón y gradiente de temperatura.
4. Es útil la reducción de los momentos máximos durante la colocación de hormigón.	

- Los perfiles laminados son casi siempre de la Clase 1. Por ello, se puede sacar partido del hecho de proyectarlos de forma que se tenga en cuenta todo el momento plástico de resistencia a la hora de calcular su resistencia.
- Los perfiles armados diseñados como compactos raramente son económicos.
- La conclusión es que los perfiles laminados generalmente son económicos para tramos de hasta 25 m aproximadamente si están libremente apoyados y de 30 m más o menos si son continuos. Las vigas armadas y las vigas en cajón pueden utilizarse para tramos de hasta 300 m.
- La construcción de vigas en cajón para puentes de pequeña luz normalmente no es económica, a menos que sea necesaria para un fin específico, p. ej., cuando se necesita una gran resistencia a la torsión, como en el caso de los puentes curvos.

Mientras que en el pasado se han utilizado otras formas de construcción, p. ej., atirantados, para puentes de pequeña luz, normalmente se adoptan sólo en casos en los que predominan unas condiciones especiales (p. ej., puentes móviles, graves restricciones de la altura libre, etc.) o cuando el atractivo estético innegable de dichos puentes es una cuestión importante. Las pasarelas entran dentro de esta última categoría.

5.4 Puentes de vigas de alma llena de gran luz

Los puentes de vigas de alma llena de gran luz son normalmente evoluciones de las formas de viga compuesta o viga en cajón descritas en la sección anterior. Generalmente serán continuos sobre dos o más tramos y con frecuencia estarán reforzados. Normalmente, el límite de tramo es de aproximadamente 250 metros de vano (aunque existen ejemplos de mayor longitud, p. ej., río Niteroi). Un alzado típi-

co de un puente de vigas de alma llena de este tipo se muestra en la figura 13.



Figura 13 Alzado tipo de un puente de viga de alma llena de gran luz

Al igual que con los tramos más cortos, se debe estudiar minuciosamente la sección transversal (número de vigas principales, etc.) y la forma de tablero - hormigón armado normal, hormigón armado aligerado, chapa de acero rigidizada ortotrópicamente, etc. Una sección transversal muy típica es la viga en cajón doble con jácenas transversales, como se muestra en la figura 14,

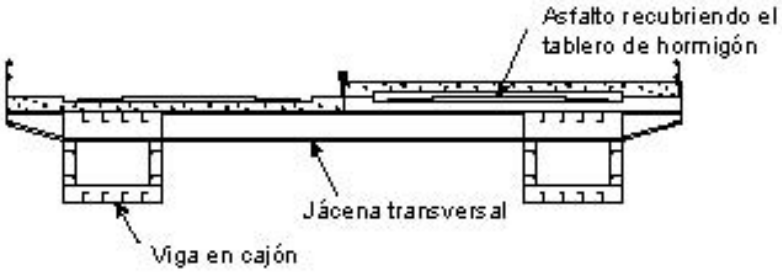


Figura 14 Sección tipo de un puente ancho de doble viga en cajón, de gran luz

aunque cuando la calzada es relativamente estrecha, es bastante común una única gran viga en cajón, frecuentemente con un tablero de acero ortotrópico (figura 15).

Una forma de construcción utilizada con frecuencia en EE.UU. y Canadá, aunque no generalizada en Europa, es la viga en cajón compuesta abierta, en la que la losa de hormigón armado, colocada a pie de obra, forma el ala superior completa (figura 16). El problema principal de esta forma tiene lugar durante la construcción, cuando las partes superiores de las almas necesitan una estabilización hasta que se coloca la losa.

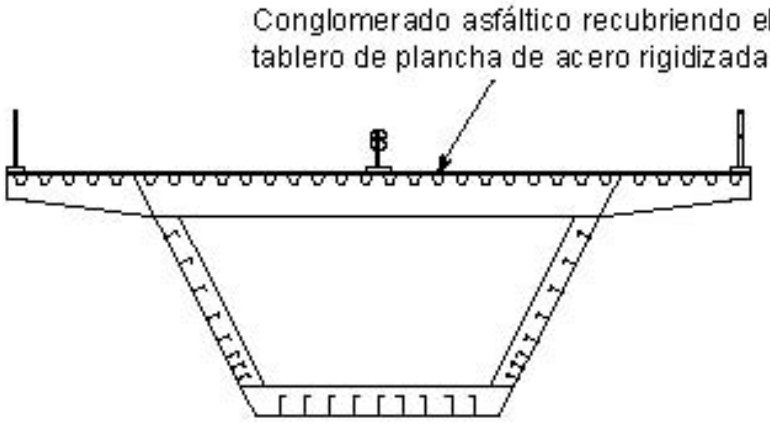


Figura 15 Sección tipo de un puente de gran luz, de una sola viga en cajón

5.5 ¿Coste mínimo o peso mínimo?

Cualquier proyectista de puentes de la actualidad debe reconocer que la relación entre los costes de material y mano de obra ha cambiado considerablemente en las últimas décadas. Dependiendo de las condiciones locales, 1 hora de mano de obra cuesta ahora lo mismo que 30 a 70 kg de acero. En el pasado, los costes de los materiales eran relativamente mayores y es probable que los proyectos detallados que se acerquen a un peso prácticamente mínimo fueran también proyectos de coste mínimo.

En las condiciones actuales, frecuentemente se da el caso de que el proyecto más económico es aquél en el que la cantidad de mano de obra en el trabajo de taller se ha reducido al mínimo gracias a un proyecto minucioso y, cuando es necesario, a costa del peso del material. La figura 17 muestra dos

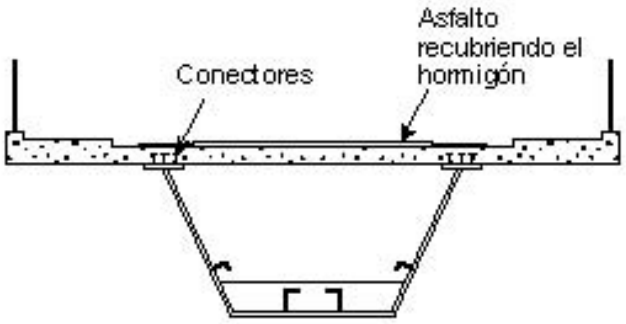


Figura 16 Puente de una viga en cajón compuesta descubierta con el tablero como ala superior

ejemplos en los que un proyecto económico moderno es considerablemente más sencillo que los proyectos detallados anteriores. En el ejemplo de viga armada que se muestra, la jácena rigidizada sería 230 kg más ligera si tuviera una longitud de 10 m, pero se tardaría al menos 3/4 de hora en colocar y soldar cada uno de los siete rigidizadores, invirtiendo un tiempo total de $5_{1/4}$ horas. De esta forma, la jácena más pesada es más barata en todos los talleres de fabricación en los que una hora de mano de obra cuesta más que $230 \div 5_{1/4} = 44$ kg de acero.

5.6 Proyecto de construcción

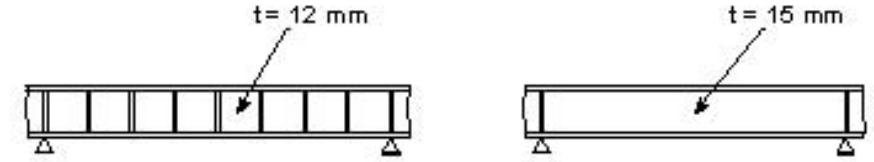
Una planificación para un mínimo de trabajo en taller puede influir de forma directa en la elección de la forma estructural. La tabla 1 indica las contribuciones al coste total de estos tipos diferentes de vigas de puentes, tomando el coste total de la construcción de una viga compuesta como 100 unidades.

La influencia del contenido del trabajo de taller se puede ver inmediatamente. Claramente, un puente de perfiles laminados aún puede constituir la solución más barata, aun cuando es significativamente más pesado que una alternativa de una viga en cajón.

La comparación económica minuciosa variará considerablemente con las condiciones locales, pero los fabricantes locales generalmente estarán demasiado dispuestos a aconsejar sobre la economía relativa de las diferentes formas de construcción.

El trabajo de taller puede facilitarse en gran medida por un diseño de detalles que maximice la repetición y que además haga más fácil la construcción del puente. Por ejemplo, la incor-

Tipo de puente	Perfil laminado	Viga compuesta	Viga en cajón
Acero	30	30	30
Trabajo de taller	30	50	70
Protección frente a la corrosión	10	10	15
Montaje	10	10	15
TOTAL	80	100	130





(i) Diseño tradicional con una gran elaboración

(ii) Diseño actual con el mínimo de elaboración

Figura 17 Cambios para un diseño más económico

poración de uniones atornilladas para algunas uniones introduce una tolerancia en la estructura que no está disponible en la construcción totalmente soldada. Colocadas cuidadosamente, pueden minimizar el uso de caras soldaduras a tope de penetración total y pueden también reducir el riesgo de desgarramiento laminar. Una vez más, generalmente a los fabricantes les gusta aconsejar a los proyectistas sobre dichas cuestiones.

6. OBSERVACIONES FINALES

La gama de tipos de puentes y métodos de montaje que se le presentan a un proyectista es inmensa y a veces desalentadora. No hay duda de que la tarea más difícil que va a tener que afrontar un ingeniero inexperto es la de obtener la mejor elección conceptual de entre las alternativas disponibles. Con esta lección se ha intentado, a grandes rasgos, ofrecer algún tipo de orientación sobre qué tipo es apropiado para un objetivo y obra en particular, pero es necesario señalar que a menudo se tendrán que probar varios para decidir cuál es el mejor. Por supuesto, algunas veces quizás sea necesario obtener licitaciones para dos o más alternativas, puesto que estarán tan próximas que el proyectista no puede, con seguridad, decidir entre ellas, sino que tiene que depender de un fabricante para hacerlo. En efecto, diferentes fabricantes pueden poner los proyectos en órdenes de coste diferentes.

Al menos una comprensión de los elementos básicos debería evitar los problemas que surgen al intentar construir un proyecto totalmente inadecuado.