

CURSO de CONCEPCIÓN de PUENTES

VOL. I: PANORÁMICA GENERAL de PUENTES

Salvador Monleón Cremades



© Salvador Monleón Cremades

Editorial de la Universitat Politècnica de València, 2012

Ref. 6040

ISBN O.C.: 978-84-8363-890-3

ISBN VOL. I: 978-84-8363-891-0

Segunda edición



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CURSO de CONCEPCIÓN de PUENTES
VOL. I: PANORÁMICA GENERAL de PUENTES
Salvador Monleón Cremades



01 Motivación e Introducción

02 Puentes de fábrica de piedra

03 Puentes metálicos



04 Puentes de hormigón armado

05 Puentes de hormigón pretensado



<los primeros puentes SFD>

<fundición, hierro y acero, el gran salto>

<moldear formas a voluntad>



<la economía de medios>

1. Motivación e introducción

2. **Puentes de fábrica piedra.** *El imperio romano. La edad media. El renacimiento. El siglo XVIII. Los últimos puentes de fábrica de piedra*

3. **Puentes metálicos.** *Puentes de fundición. Puentes de hierro: puentes colgantes, puentes de vigas y puentes arco. Puentes de acero: puentes colgantes, puentes de vigas y puentes arco. Tendencias actuales en el diseño de puentes metálicos: materiales y procedimientos constructivos, pisos de los tableros, secciones transversales y nuevas morfologías longitudinales*

- 4. Puentes de hormigón armado.** *Presentación histórica del nuevo material. Diversos tipos de puentes de hormigón armado: Robert Maillart, Eugène Freyssinet y otras obras de este mismo período. Situación actual de la construcción de puentes de hormigón armado*
- 5. Puentes de hormigón pretensado.** *Orígenes del hormigón pretensado. Los primeros puentes de hormigón pretensado (1937-1960). Concepción de puentes de hormigón pretensado: estado del arte. Tramos simples de vigas, puentes continuos hormigonados mediante cimbra, puentes hormigonados vano a vano, puentes empujados, puentes contruados por avance en voladizo, puentes pórtico de apoyos inclinados y puentes atirantados*

1.1 Motivación

1.2 Introducción: puentes primitivos



01 Motivación e introducción

□ ORGANIZACIÓN DEL CURSO DE CONCEPCIÓN DE PUENTES

En la actualidad, el **Curso de Concepción de Puentes** de la *E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos* de la *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA de VALENCIA* está compuesto de dos grandes bloques, cuyas **presentaciones** dan lugar a los dos Volúmenes siguientes, concebidos como **herramientas de apoyo** a las sesiones de teoría

□ OBJETIVOS DEL VOLUMEN (I): PANORÁMICA GENERAL de PUENTES

Como principales objetivos de este primer bloque del curso destacaremos:

- (1) La adquisición de una **cultura propia**, de los conocimientos necesarios para permitir la identificación y la descripción de las distintas familias de puentes y sus fundamentos resistentes y constructivos
- (2) Proporcionar una **visión global de la materia** que vaya desde datos históricos hasta el estado actual del arte
- (3) Anticipar algunas **nociones de diseño** (rango de luces, esbelteces...)

01 Motivación e introducción

- ❑ **ORGANIZACIÓN DIDÁCTICA.** Este volumen (I) se ha estructurado en **cuatro** grandes unidades didácticas cuyo contenido constituye *“una presentación cronológica de los distintos materiales estructurales empleados en la construcción de puentes”*

1) Puentes de fábrica de piedra

2) Puentes metálicos

3) Puentes de hormigón armado

4) Puentes de hormigón pretensado

2.1 El período Romano

2.2 La edad media

2.3 El renacimiento

2.4 El siglo XVIII

2.5 Los últimos puentes de piedra

3.1 Puentes de fundición

3.2 Puentes de hierro

3.3 Puentes de acero

- ❑ En un segundo nivel, se introducen los aspectos *tipológicos* y *constructivos*, completando de esa forma la descripción *ingenieril* de estas obras

01 Motivación e introducción

- ❑ SE EMPLEAN MATERIALES NATURALES, sin apenas tratarlos: losas de piedra, troncos de árboles y fibras vegetales trenzadas

- ❑ NO EXISTEN RESTOS ORIGINALES, pero las técnicas todavía en uso en regiones aisladas y subdesarrolladas constituyen la herencia directa de las primitivas formas de proceder

- ❑ YA INTUYEN ALGUNAS TIPOLOGÍAS Y MODOS DE CONSTRUIR:
 - sistemas suspendidos (colgantes)
 - sistemas de vigas y pórticos (puntales)
 - pequeños avances en voladizo

01 Motivación e introducción



▪ Puentes naturales: Arco en Utah y cantilever en Bronte (Yorkshire)

01 Motivación e introducción



- muy deformables
- poco resistentes e incómodas

▪ Puentes primitivos: catenaria de lianas trenzadas (Himalaya)

<1.2 INTRODUCCIÓN: puentes primitivos>

01 Motivación e introducción



- más resistentes y duraderos que los puentes colgantes o las losas de piedra
- en algunos casos, se construyeron utilizando pilas intermedias
- captan las ventajas de algunas disposiciones estructurales (puntales inclinados, tramos iniciales en voladizo...)

▪ Puentes primitivos: puente de vigas de madera en Nepal (concepción longitudinal en *cantilever*)

2.0 Motivación

2.1 El período romano

2.2 La edad media

2.3 El renacimiento

2.4 El siglo XVIII

2.5 Los últimos puentes de fábrica de piedra



02 Puentes de fábrica de piedra

- ❑ LA PIEDRA, labrada en sillares resulta ser un material resistente y duradero (primeras obras **SFD**)

- ❑ LA ÚNICA TIPOLOGÍA REALMENTE ADECUADA AL USO DE LA PIEDRA ES LA BÓVEDA. Con el espesor suficiente, se consigue un estado de compresión en la construcción que garantiza su estabilidad

- ❑ SU USO SE EXTIENDE HASTA PRINCIPIOS DEL SIGLO XX

- ❑ DISTINGUIREMOS CINCO PERÍODOS EN ESTE ESTUDIO
 - *El período romano*
 - *La edad media*
 - *El renacimiento*
 - *El siglo XVIII*
 - *Los últimos puentes de fábrica de piedra*

02 Puentes de fábrica de piedra

- ❑ Se caracteriza por el empleo de la **bóveda de piedra**, apreciando:
 - Su **resistencia**
 - Su **durabilidad**
 - Su **construcción sencilla**, puesto que al adoptar bóvedas de **medio punto** ($f/L=1/2$) todas las dovelas podían labrarse idénticas. Además, gracias al escaso empuje transmitido en la base, los sucesivos vanos podían construirse uno tras otro, siendo necesario para ello tan solo una cimbra

- ❑ **Se produce una proliferación de obras**, debido a la existencia de un proyecto político integrador (el imperio). Ello requiere vías cómodas y de escaso mantenimiento, para el movimiento de tropas y el comercio

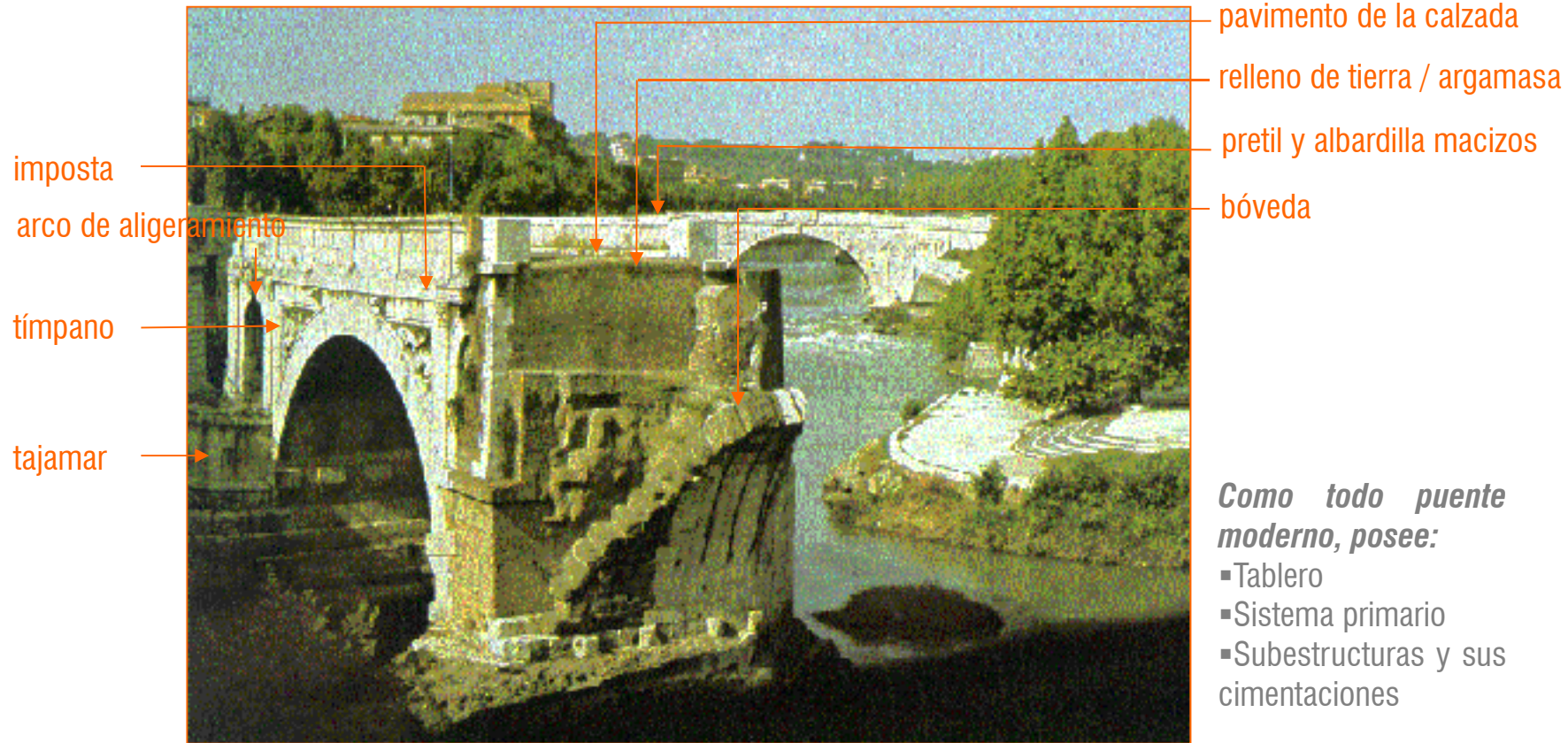
- ❑ **Morfología de un puente romano**: en él aparecen soluciones estructurales (cimentaciones profundas...) y funcionales que todavía se usan o requieren (calidad de la rodadura, seguridad vial, evacuación de aguas...)

02 Puentes de fábrica de piedra



- La isla Tiberina (óleo de Gaspar Van Wittel, 1653-1736)

02 Puentes de fábrica de piedra



▪ Elementos constitutivos de los puentes romanos: el puente Emilio o puente Rotto (Roma, 179 a.C.)

02 Puentes de fábrica de piedra



▪Proporciones de los puentes romanos: el puente Fabricio (Roma, 62 a.C.)

02 Puentes de fábrica de piedra



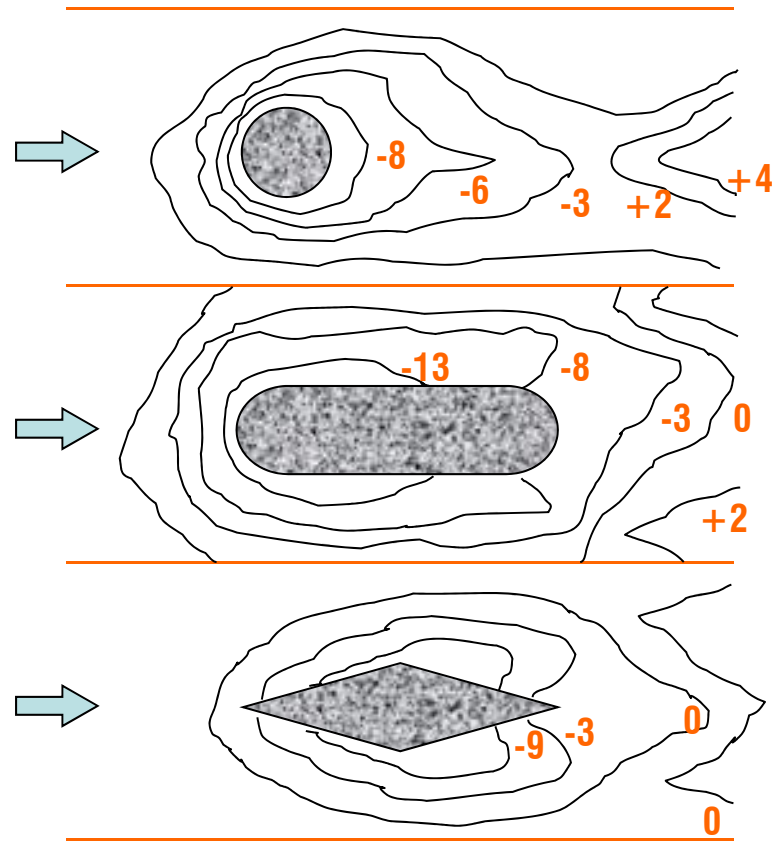
- Para un puente de n vanos y un espesor de pila igual a αR , la anchura libre del cauce pasará de $(2+\alpha)nR$ a $2nR$, sufriendo una reducción igual a

$$\rho = \frac{100\alpha}{2+\alpha} \%$$

ρ es un parámetro de obstrucción que oscila entre 25 y 33% para esbelteces α comprendidas entre $2/3$ y 1 y conlleva un aumento de la velocidad del agua en torno a las pilas → **erosión y arrastre**

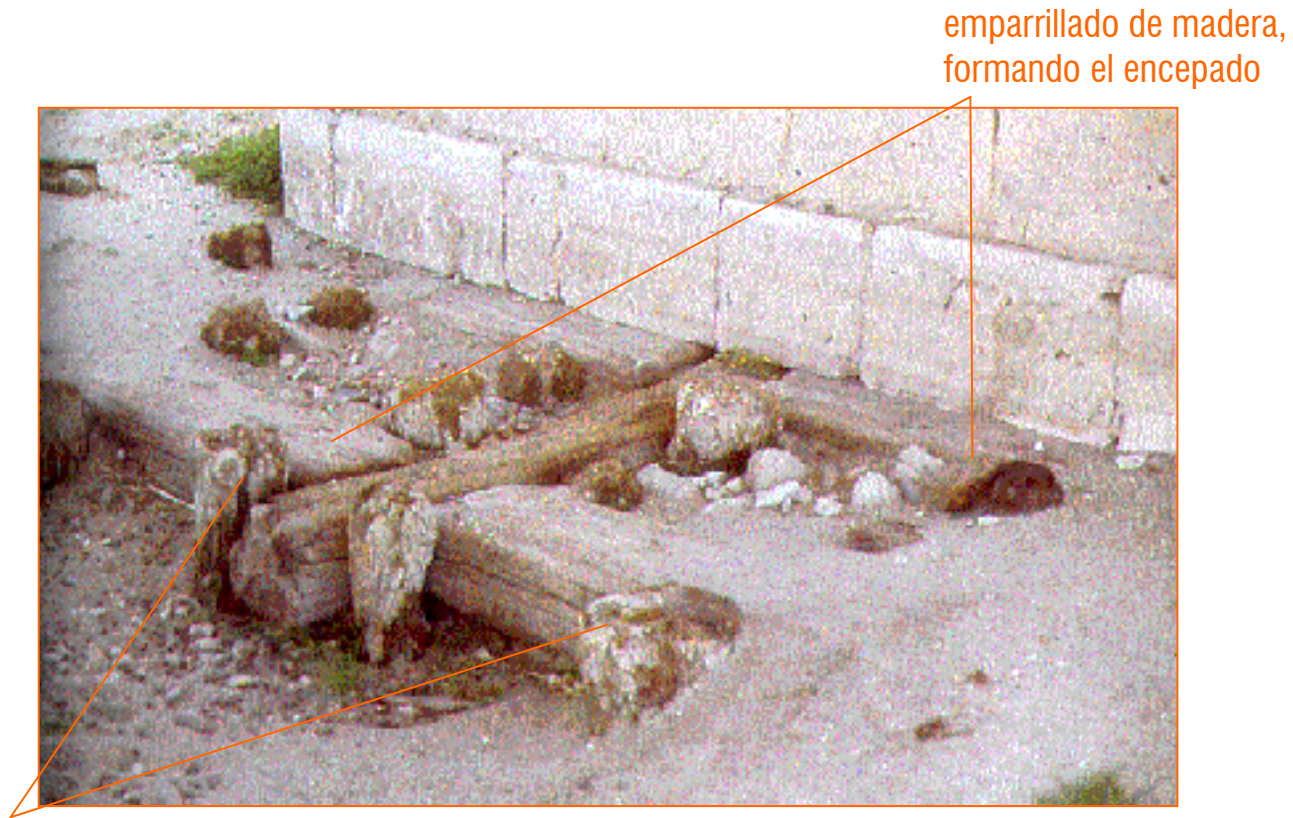
- **Problemas hidráulicos:** socavación y cimentaciones profundas

02 Puentes de fábrica de piedra



▪ Problemas hidráulicos: socavación y cimentaciones profundas

02 Puentes de fábrica de piedra



emparrillado de madera,
formando el encepado

pilotes de madera hincados

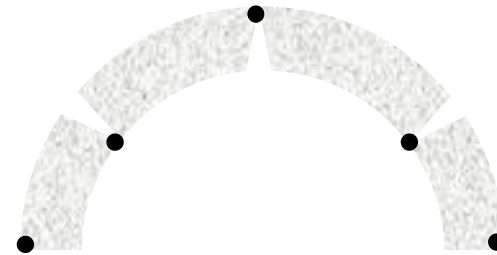
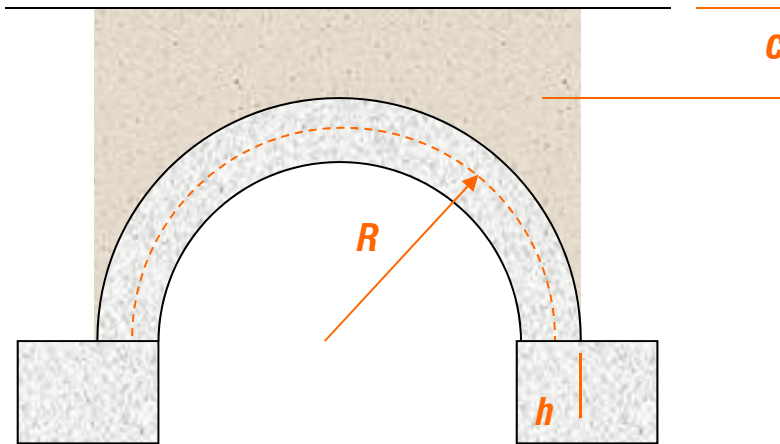
▪ **Problemas hidráulicos:** socavación y cimentaciones profundas

02 Puentes de fábrica de piedra



▪ **Problemas hidráulicos:** hundimiento del puente Wilson, sobre el Loira en Tours (socavación por crecida en 1978, 15 arcos de 24 m de luz)

02 Puentes de fábrica de piedra



□ Hipótesis básicas del arco de Heyman:

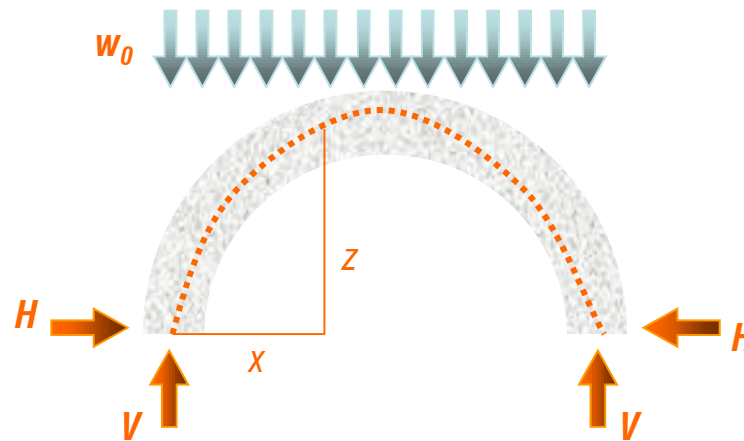
- la fábrica no tiene resistencia a tracción
- las tensiones son tan bajas que, a efectos prácticos, la fábrica tiene una ilimitada resistencia a compresión

□ En estas condiciones, puede admitirse la sucesiva formación de **rótulas puntuales**, hasta convertir la bóveda en un **mecanismo** (dispuestas simétricamente para la bóveda considerada)

▪ **Problemas estructurales:** el peso propio principal factor de resistencia → **reglas empíricas/espesores seguros**

02 Puentes de fábrica de piedra

□ Supongamos que $c/R \rightarrow \infty$, en estas condiciones puede admitirse que la carga está uniformemente distribuida, con una densidad w_0 (el peso del relleno y el de la fábrica no serán muy diferentes), resultando la siguiente condición de equilibrio a lo largo de la **línea de empujes**:



$$H \frac{d^2 z}{dx^2} + w_0 = 0$$

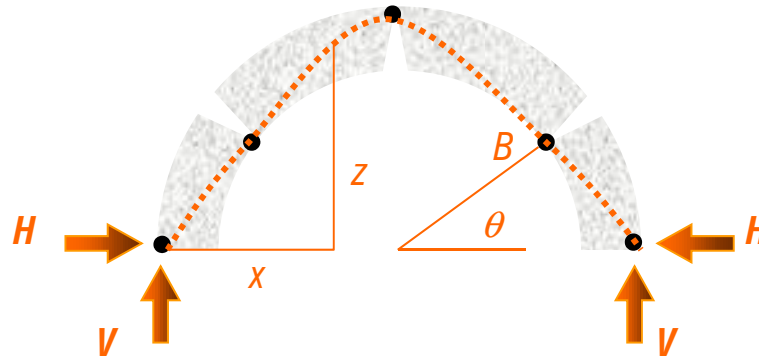
□ H es el empuje del arco, constante en ausencia de cargas transversales. Integrando e imponiendo $z=0$ para $(x=0,L)$ resulta:

$$z = \frac{w_0 L^2}{2H} \xi(1-\xi), \xi = \frac{x}{L}$$

▪ **Problemas estructurales:** el peso propio principal factor de resistencia

02 Puentes de fábrica de piedra

- En el equilibrio límite, la **línea de empujes** deberá pasar por las rótulas para seguir contenida por el arco



- Esta observación exige

- $L = 2R + h$, $z = L/2$ para $\xi = 0.5$
- intradós tangente a la parábola en el punto B

- Resultando

- $H = w_0 L/4$, $z = 2L\xi(1-\xi)$
- $\text{sen } \theta = 1/\sqrt{3}$, $h/R = 2(7-4\sqrt{3})$

▪ **Problemas estructurales:** el peso propio principal factor de resistencia

02 Puentes de fábrica de piedra

□ La última condición $h/R=2(7-4\sqrt{3})$ establece el mínimo espesor, o **espesor crítico** de las dovelas del arco, compatible con el equilibrio en rotura, para la relación $c/R \rightarrow \infty$ considerada

c/R	0	0.01	0.1	0.2	0.4	0.8	1.5	4.0	10.0	1000	∞
θ	21.6°	23.0°	29.5°	32.0°	33.6°	34.5°	34.9°	35.1°	35.2°	35.3°	35.3°
h/R	0.047	0.051	0.078	0.094	0.104	0.122	0.130	0.138	0.141	0.144	0.144

Espesores críticos y posición de la rótula de riñones del arco de medio punto para distintos espesores del relleno

▪ **Problemas estructurales:** el peso propio principal factor de resistencia

02 Puentes de fábrica de piedra

□ Del análisis anterior se deduce:

- Una acertada **selección del espesor de la bóveda** proporcionará reserva resistente, de tal forma que la línea de empujes esté siempre contenida por el arco
- El arco de medio punto no es **antifunicular** de la carga permanente, produciéndose el inoportuno desdoblándose entre directriz y línea de empujes, que conlleva la posible aparición de **fisuras** y la creación del **empuje horizontal**
- Este último puede resistirse con una adecuada proporción de pilas, siendo entonces viable el **descimbrado vano a vano**

▪ **Problemas estructurales:** el peso propio principal factor de resistencia

02 Puentes de fábrica de piedra



■ Obras: el *Puente Elio*, actualmente Sant´Angelo (Roma, 134 d.C.)

02 Puentes de fábrica de piedra



■ Obras: el *Pont du Gard* (óleo de Hubert Robert, 1733-1808):siglo -I, abastecía a la ciudad de Nîmes

02 Puentes de fábrica de piedra



- Obras: el *Acueducto de Segovia* (Siglo I, longitud total 800 m)

02 Puentes de fábrica de piedra



- Obras: el *Puente de Alcantara*, sobre el Tajo (Julius Lacer, Siglos I y II, vanos de 28 m para alturas de pilas de 47 m)

02 Puentes de fábrica de piedra

☐ CAÍDA DEL IMPERIO ROMANO. Supone:

- La **parcelación geopolítica** de Europa
- La adopción de **medidas protectoras**, incluso defensivas de los dominios (abandono de las calzadas, fortificaciones...)
- La **pérdida de los conocimientos** y tradiciones constructivas Romanas (en el panteón, se llegó a los 42 m de diámetro)

☐ TODO ELLO CONDUCE A UN ENORME RETROCESO EN EL ARTE DE CONSTRUIR PUENTES

☐ Los itinerarios santos y el papel de la iglesia

- los constructores de catedrales acumulan un gran conocimiento empírico sobre el **comportamiento estructural** de las fábricas de piedra, que no se traslada a los puentes
- justifican la conservación de algunas calzadas y puentes

02 Puentes de fábrica de piedra

□ **Las cruzadas y sus efectos sobre la arquitectura medieval:** se introduce la bóveda ojival, mal adaptada a la construcción de puentes por

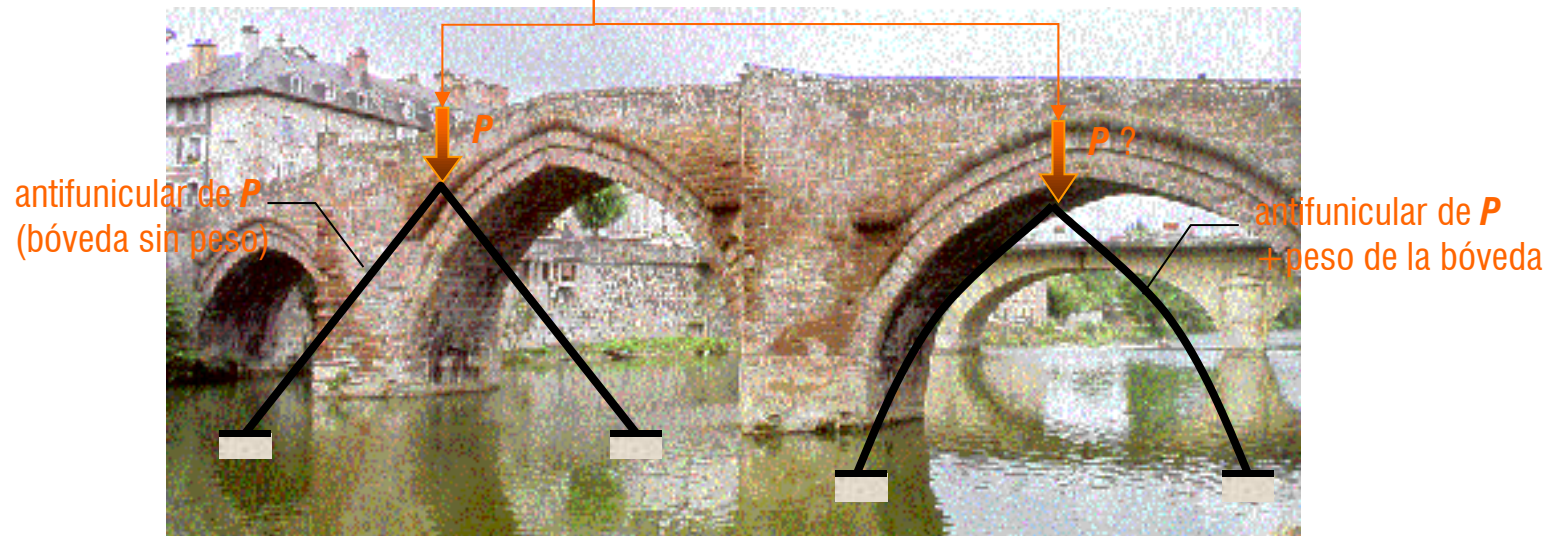
- crear itinerarios en lomo de asno



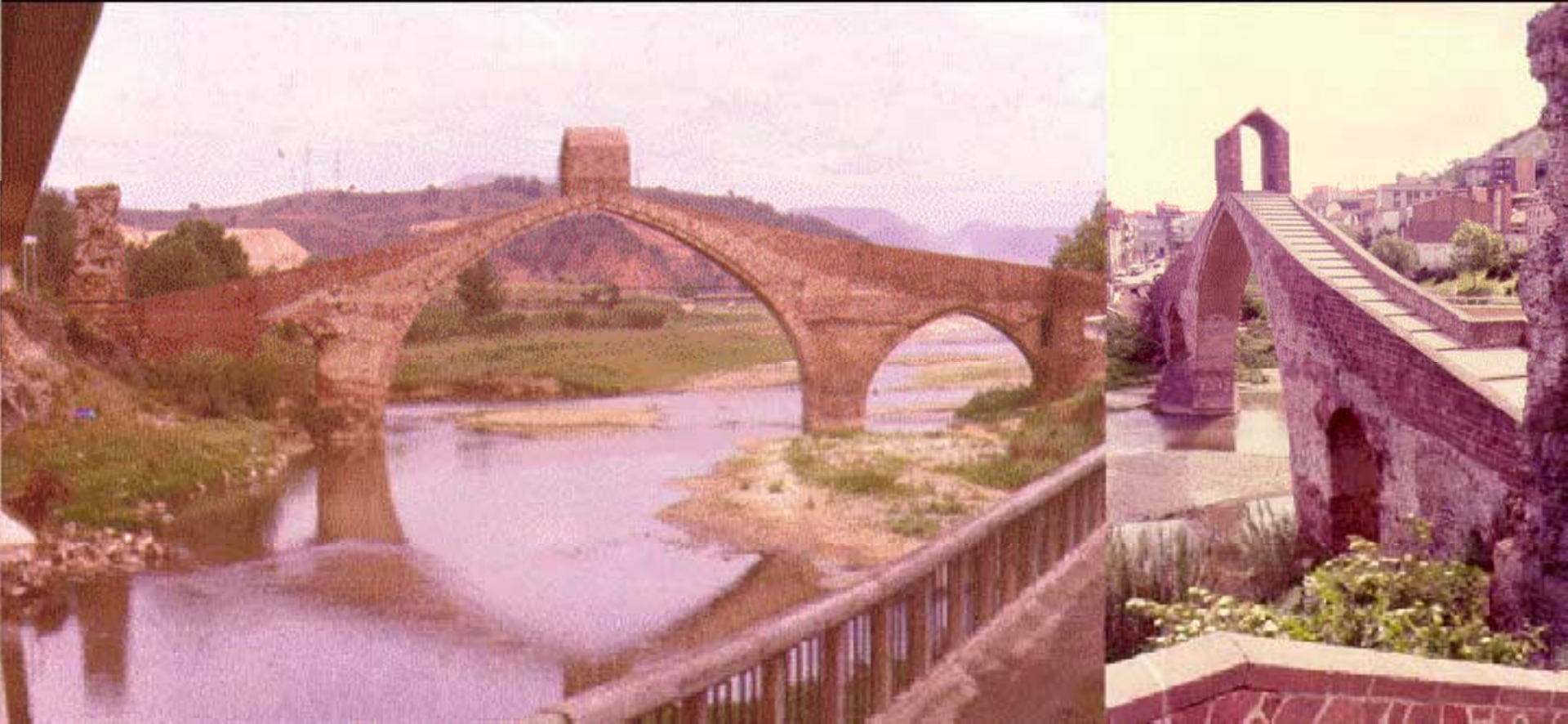
02 Puentes de fábrica de piedra

□ **Las cruzadas y sus efectos sobre la arquitectura medieval:** se introduce la bóveda ojival, mal adaptada a la construcción de puentes por

- no poseer una forma adecuada a las cargas propias de estas estructuras



02 Puentes de fábrica de piedra



■ Obras: el *Puente del Diablo* en Martorell, sobre el Llobregat (Siglo XIII, arco de 37 m)

02 Puentes de fábrica de piedra



▪Obras: el *Pont d'Avignon*, sobre el Ródano (Siglos XII a XIV, numerosas reconstrucciones, Saint Bénézet)

02 Puentes de fábrica de piedra



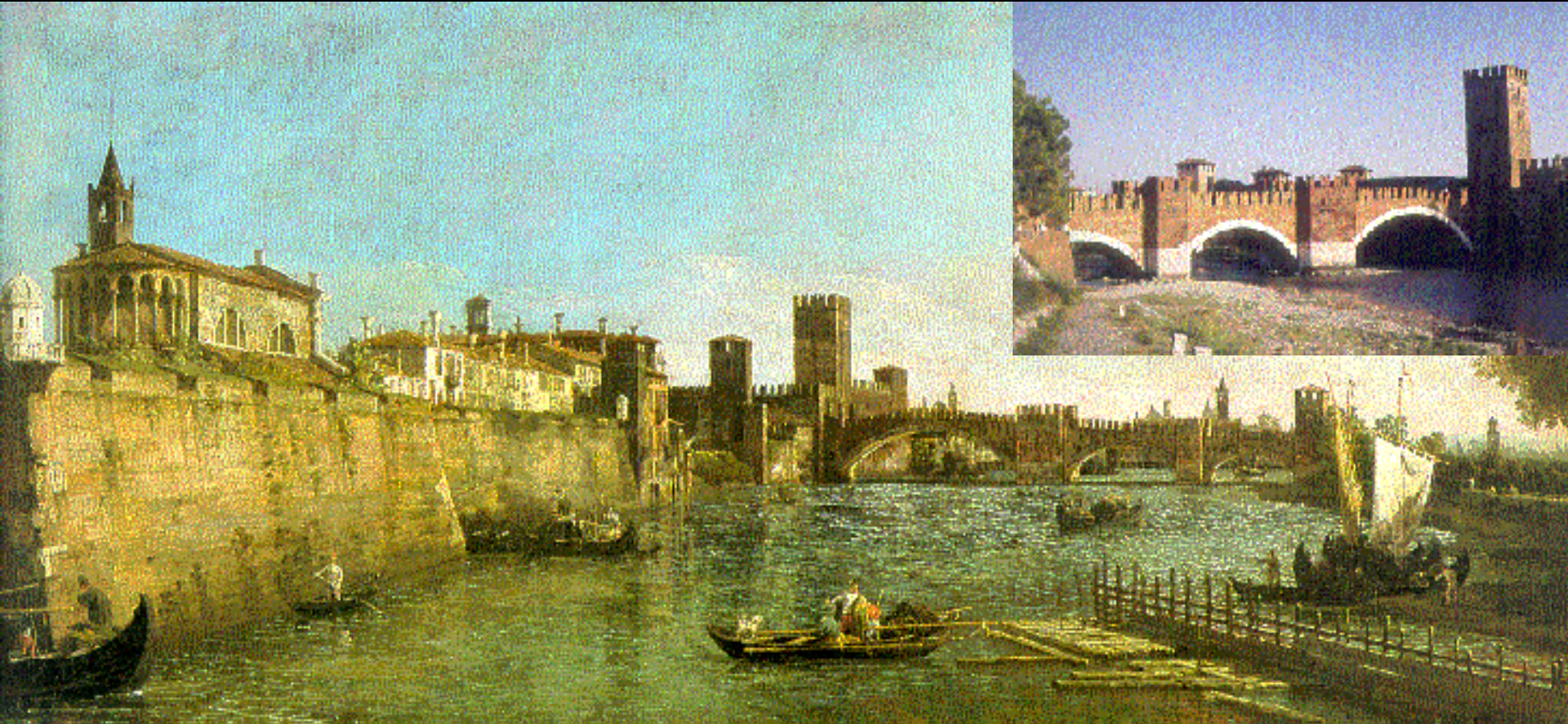
▪Obras: el *Puente de Frías* en Burgos, sobre el río Ebro (siglo XIII)

02 Puentes de fábrica de piedra



- Obras: el *Puente de Valentré*, en Cahors, sobre el Lot (construido entre 1306 y 1355, seis arcos apuntados de 16.50 m)

02 Puentes de fábrica de piedra



■ Obras: vista de Verona con el Castel Vecchio y el *Puente Scaligero* (óleo de Bernardo Bellotto, 1720-1780)

02 Puentes de fábrica de piedra

□ Se caracteriza por la búsqueda del equilibrio en las formas, como consecuencia del estudio sistemático de la historia (la erudición...) junto con algunas incorporaciones de raíz artística, que no estructurales o constructivas. Ello conduce a:

▪ **Progreso** en lo que a construcción de puentes se refiere, puesto que los puentes Romanos superaban en calidad a sus homólogos medievales

▪ **Retroceso** respecto al arte de construir desarrollado por los maestros de obra de las catedrales góticas (por ejemplo, Palladio preconiza simples reglas de proporcionalidad para dimensionar las construcciones, concentrándose únicamente en las formas y no en los sistemas resistentes, en **el esqueleto de piedra**)

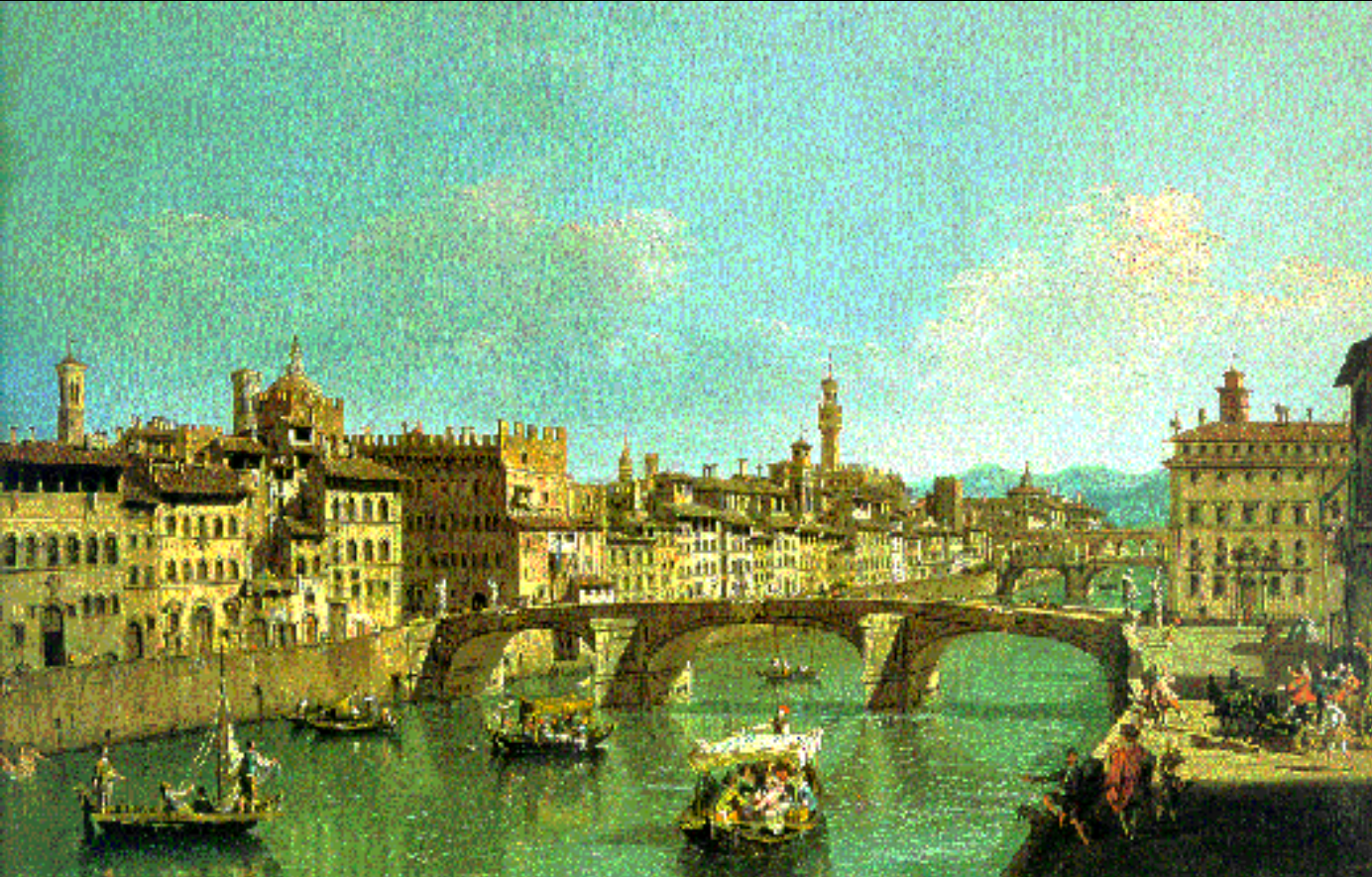
02 Puentes de fábrica de piedra

- ❑ Se emplean bóvedas más rebajadas, $L/f \in [3,7]$, aunque son todavía frecuentes las bóvedas de medio punto:
 - arco segmental o **escarzano** (radio constante), como en el Ponte Vecchio o en el puente de Rialto
 - arco en asa de cesta o **carpanel** (varios radios), como en el puente de la Trinidad

- ❑ Se diseñan pilas más esbeltas

- ❑ Ambas disposiciones favorecen **la economía** (se utiliza menos material) y **la seguridad** (mayor capacidad de desagüe), aunque su origen está en la estética y no en la racionalidad

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: el Arno en el *Puente Santa Trinidad* (óleo de Giuseppe Zocchi, 1716-1767)

02 Puentes de fábrica de piedra



■ Obras: *Ponte Vecchio*, sobre el Arno (Florencia, siglo XIV, bóvedas escarzanas de 30 m, Tadeo Gaddi)

02 Puentes de fábrica de piedra



■ Obras: ***Puente de la Trinidad***, sobre el Arno (Florencia, siglo XVI, arcos carpaneles de 29 m, Bartolomeo Ammanati)

02 Puentes de fábrica de piedra



- Obras: *Puente de Rialto*, sobre el gran canal (Venecia, siglo XVI, bóveda escarzana de 27.5 m, Antonio Da Ponte)

02 Puentes de fábrica de piedra

- Obras: *Puente de Rialto* con el palacio Camerlenghi (óleo de Francesco Guardi, 1712-1793)



02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: el Gran Canal con el *Puente de Rialto* según el proyecto de Palladio (óleo de Francesco Guardi, 1712-1793)

02 Puentes de fábrica de piedra

■Obras: *The Palladian Bridge*, en Stowe House, Buckinghamshire, Inglaterra (William Kent, 1734)



■La herencia de Palladio

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: *Puente Pulteney*, en Bath, sobre el Avon (Robert Adam, 1770)

■La herencia de Palladio

02 Puentes de fábrica de piedra

- ▀ Obras: la fiesta de los marineros entre el *Puente de Nôtre-Dame* y el *Pont au Change* (óleo de Jean-Baptiste Raguenet, 1715-1793)



02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: el *Pont-Neuf* desde el muelle de la Mégisserie (óleo de Hyacinthe de la Pegnia, 1706-1772)

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: el *Pont-Neuf*, sobre el Sena (París, 1607, B. Androuet du Cerceau y G. Marchand)

02 Puentes de fábrica de piedra



- Obras: el *Pont-Neuf*, detalles ornamentales de Germain Pilon

02 Puentes de fábrica de piedra

▀ Obras: el *Pont-Marie* (óleo de Jean-Baptiste Ragueneau, 1715-1793)

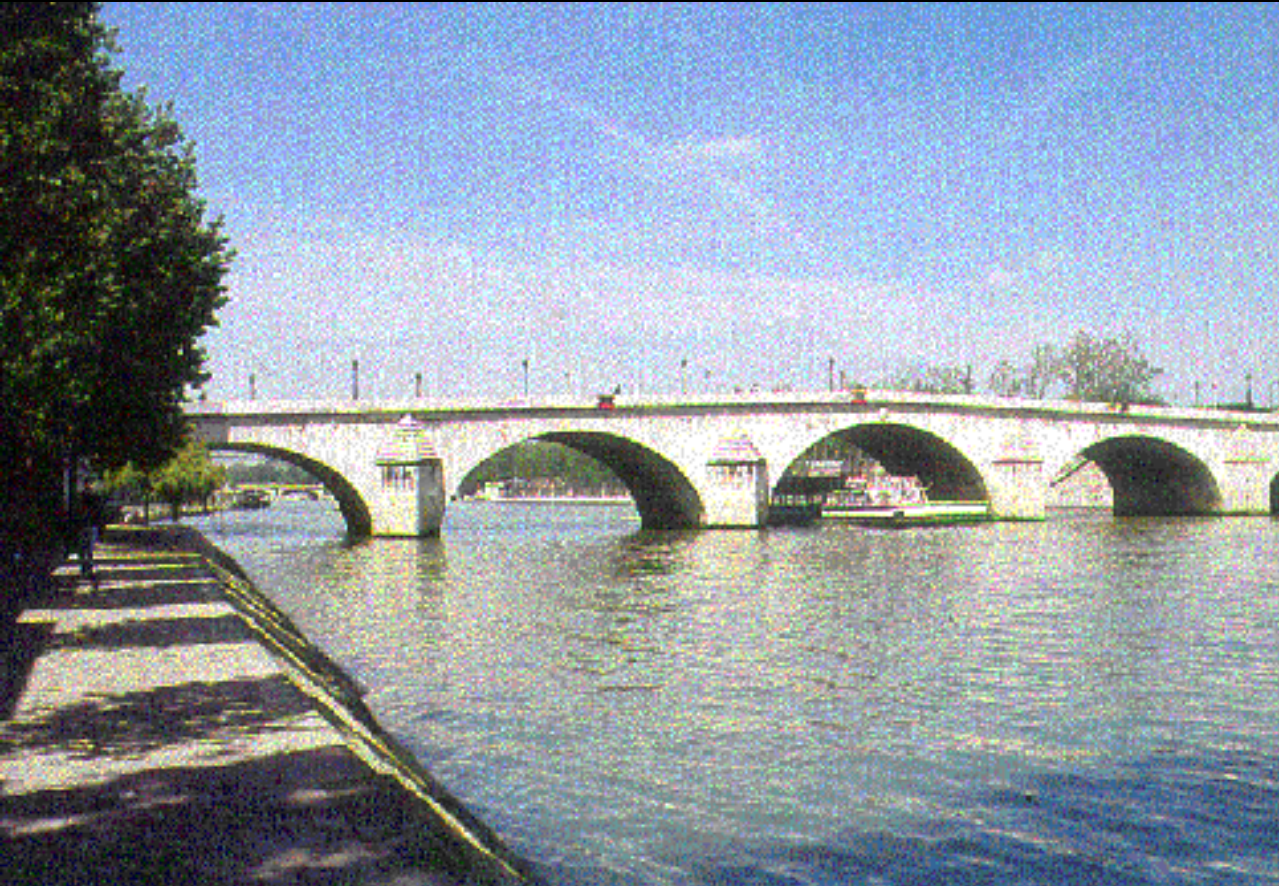


02 Puentes de fábrica de piedra



- Obras: ***Pont Marie***, sobre el Sena (París, 1635, 5 arcos carpaneles con 17.60 m de luz máxima, Christophe Marie)

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: *Pont Royal*, sobre el Sena (París, 1687, 5 arcos carpaneles de 23.50 a 20.60 m, J.H. Mansart y Jacques Gabriel)

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: *Pont Gabriel*, sobre el Loira (Blois, 1724, 11 arcos carpaneles de 26.30 a 16.55 m, Jacques Gabriel)

02 Puentes de fábrica de piedra

□ Hasta mediados del siglo XVIII, la construcción de puentes sigue básicamente la tradición Romana, en formas y técnica. Desde l' ENPC, su primer director **J.R. Perronet** (1708-1794) promueve la **primera evolución de este arte**



□ Evolución del diseño: la **compensación de vanos**



02 Puentes de fábrica de piedra

☐ VENTAJAS:

- 1) Aumento del rebajamiento ($1/5$ a $1/10$) puesto que la componente horizontal de los empujes se ve compensada en los vanos internos
- 2) Aligeramiento de las pilas ($L/10$), debido a que la reacción está **centrada** y es **moderada** luego permite un mejor aprovechamiento de la fábrica



reducción del volumen de fábrica (economía)



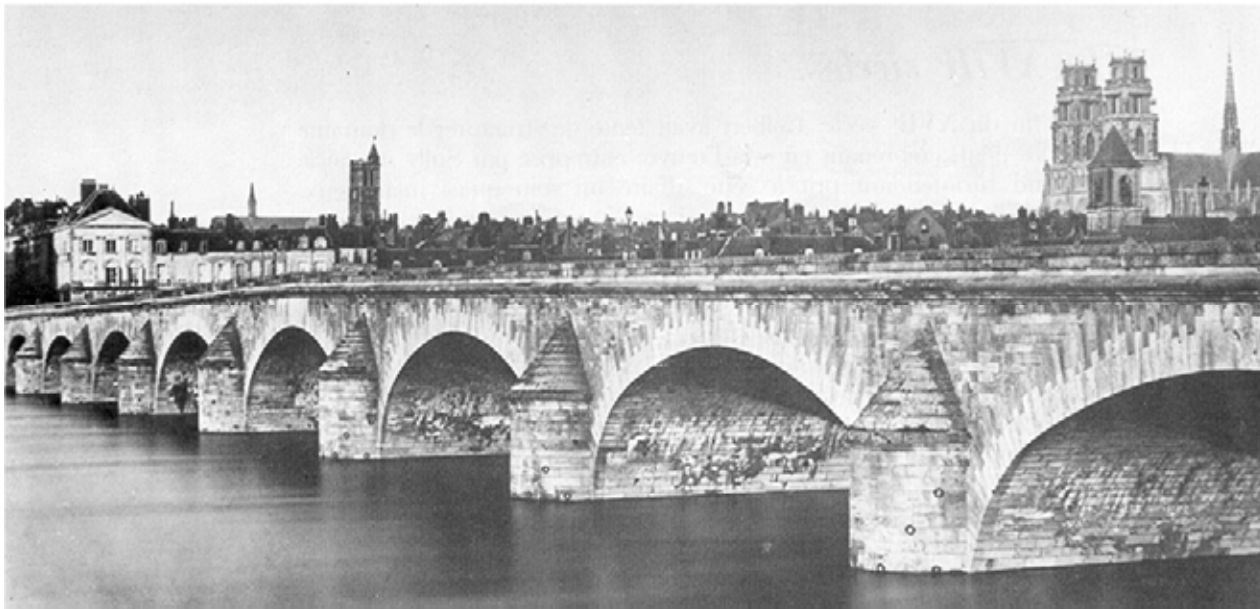
- 3) Mejor comportamiento hidráulico y estructural
- aumento de la seguridad***

☐ INCONVENIENTES:

- 4) Todos los vanos deben descimbrarse simultáneamente (*caro y complejo*)
- 5) Los empujes no compensados exigen mayor volumen de estribos

02 Puentes de fábrica de piedra

- EVOLUCIÓN DEL ANÁLISIS Y DE LA ARQUITECTURA: aunque ya se ha publicado algún tratado de mecánica (Lahire-1695, Varignon-1725), aún no se aplica la estática a las construcciones→Perronet encaja sus bóvedas mediante modelos. Sus puentes también presentan algunas innovaciones formales interesantes: **desdoblamiento de pilas** y **“corne de vache”**



■Obras: *Pont d'Orléans*, sobre el Loira (J.R. Perronet, 1763)

02 Puentes de fábrica de piedra

Elevation de l'Arche du milieu faite sur une Echelle double .



Coupe de la partie du Pont dont deux piles ont été déchargées .



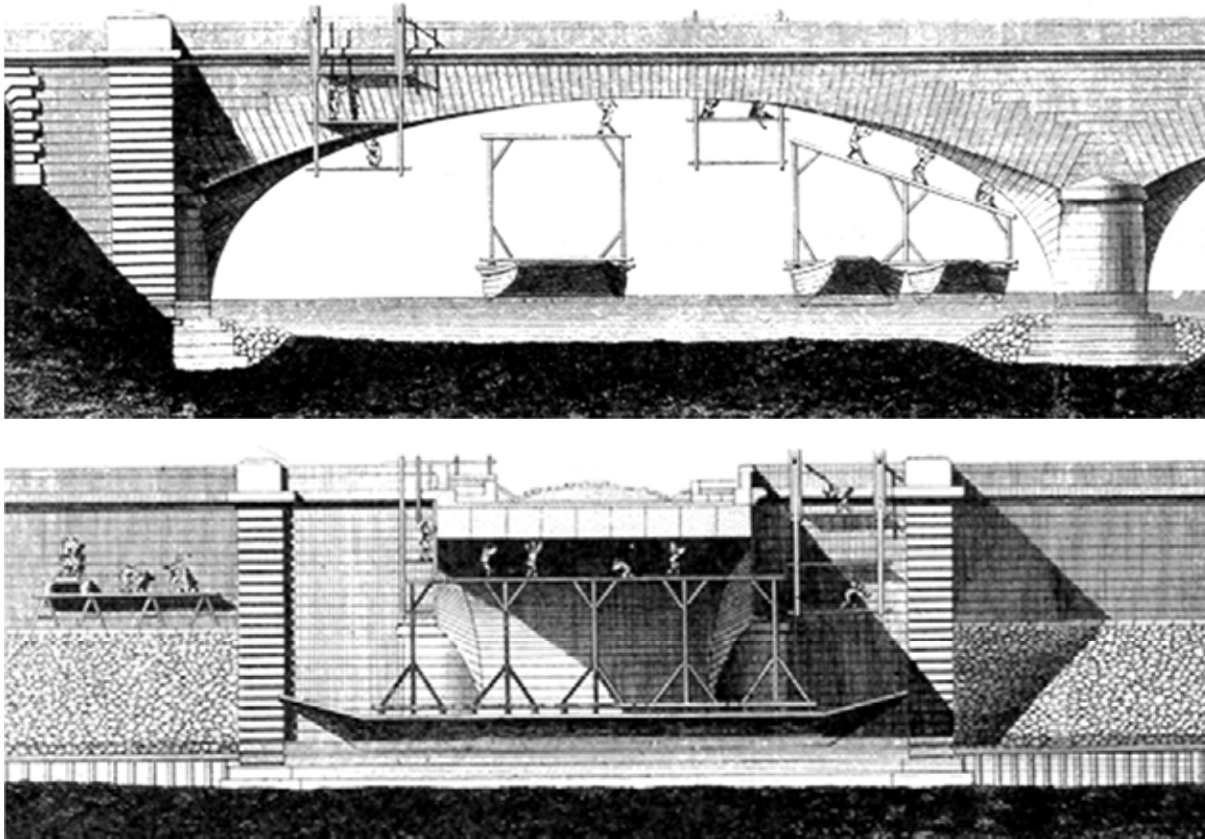
■Obras: dibujos originales del *Pont d'Orléans*, sobre el Loira

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: El descimbramiento del *Pont de Neuilly*. J.R. Perronet, 1774 (óleo de Hubert Robert, 1733-1808)

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: dibujos originales del *Pont de Neuilly*. J.R. Perronet, 1774

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: *Pont de la Concorde*, sobre el Sena (París, 1791, bóvedas escazanas de 31 m, J.R. Perronet)

02 Puentes de fábrica de piedra



- Obras: *Pont de Nemours*, sobre el Loing (J.R. Perronet, tres arcos de 16.25 m con rebajamiento $1/15$, finalizado en 1804)

02 Puentes de fábrica de piedra



▪Obras: *Pont Fouchard* en Saumur, sobre el Thouet (J.R. Perronet)

02 Puentes de fábrica de piedra

❑ ALGUNAS MEJORAS

- Empleo de los morteros de cemento (Vicat, 1818)
- Aplicación de la estática gráfica para encajar las bóvedas (diagrama de Méry, 1840)

❑ **FUERTE PERSONALIDAD de Paul SÉJOURNÉ**, firme detractor del uso del hormigón armado en las bóvedas de los “ouvrages d’art” y ello desde su cátedra de puentes de l’ENPC!!!

❑ **EL FIN DE LOS PUENTES DE PIEDRA**. Iniciado el siglo XX, la competencia de los otros materiales estructurales, y muy directamente del hormigón armado, redujo la aplicación de la piedra a las subestructuras (pilas y estribos de algunos viaductos metálicos...) y finalmente a los acabados

02 Puentes de fábrica de piedra



espesor en clave:

$$e_0 = \alpha(1 + \sqrt{L})\mu$$

espesor en riñones:

$$e_1 = (1 + 2\sigma)e_0$$

espesor en arranques:

$$e_2 = (1 + 12\sigma^2)e_0$$

$$\mu = \frac{4}{3}(1 - \sigma + \sigma^2) \quad \sigma = \frac{f}{L}$$

$\sigma = 0.12$ a 0.18 en puentes de carretera

$\sigma = 0.15$ a 0.21 en puentes de ferrocarril

■ FÓRMULAS DE PREDIMENSIONAMIENTO de Séjourné

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: *Puente Over*, sobre el Severn (Gloucester, 1827, arco de 47.5 m, cuernos de vaca, T. Telford)

02 Puentes de fábrica de piedra



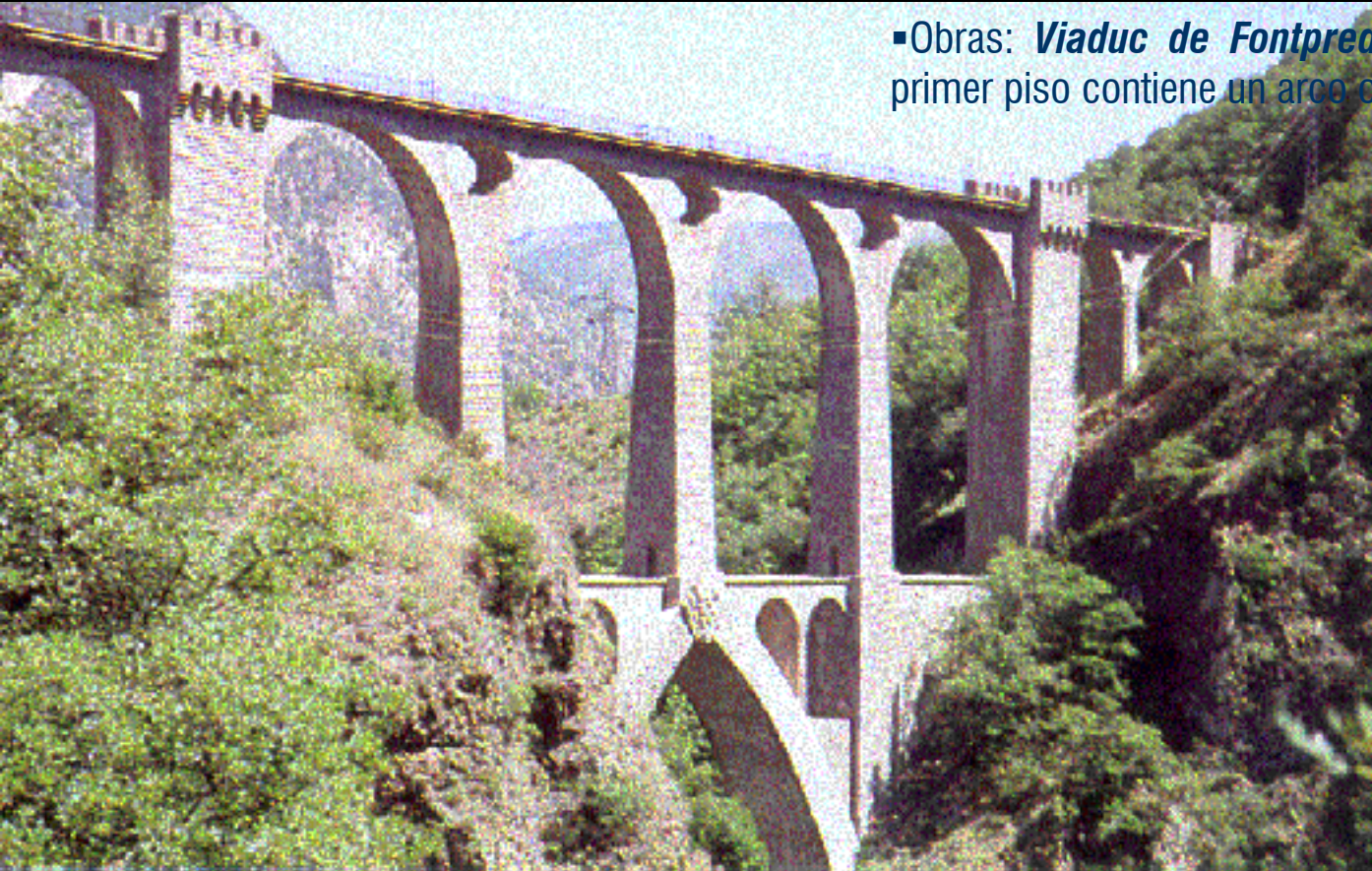
▪Obras: *Pont d'Iéna*, sobre el Sena (París, 1813, cinco vanos de 28 m, encargado por el decreto imperial de Varsovia a Lamandé)

02 Puentes de fábrica de piedra



■ Obras: ***Puente Adolfo***, sobre el Pétrusse (Gran ducado de Luxemburgo, 1903, 84.6 m, Paul Séjourné)

02 Puentes de fábrica de piedra



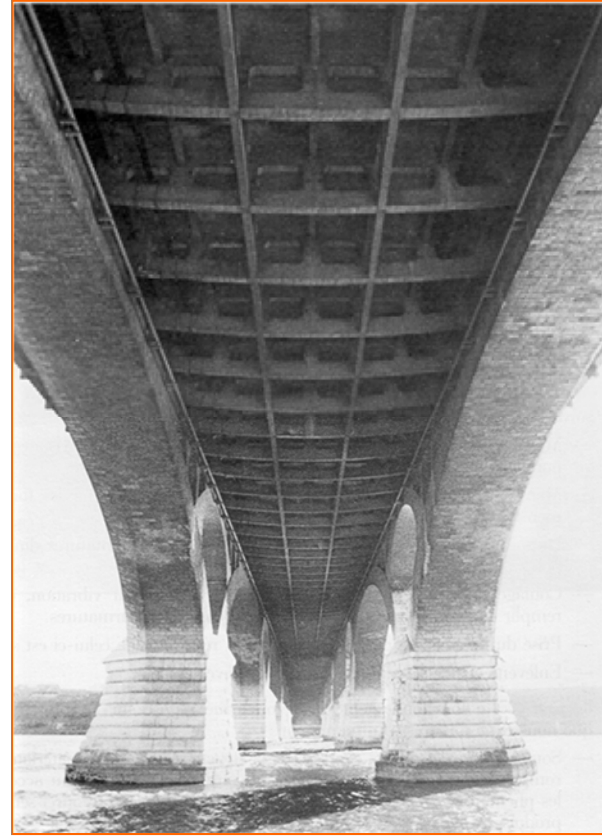
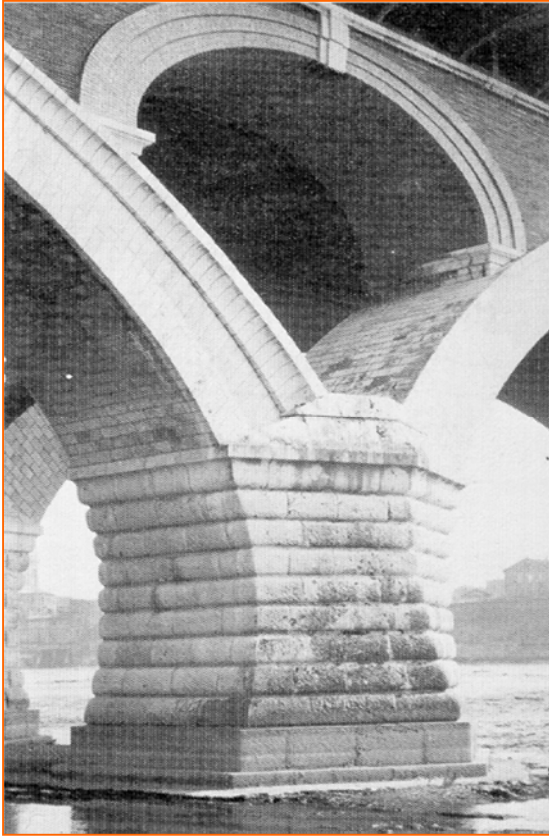
- Obras: *Viaduc de Fontpedouse*, sobre el Têt (1908, el primer piso contiene un arco ojival de 30 m, Paul Séjourné)

02 Puentes de fábrica de piedra



■Obras: *Pont des Catalans*, sobre el Garona (Toulouse, 1910, vanos de 38.50 a 46 m, Paul Séjourné)

02 Puentes de fábrica de piedra



■ Obras: *Pont des Catalans*, detalles de pilas y tablero

02 Puentes de fábrica de piedra



▪Obras: *Puente Vittorio Emanuele*, sobre el Tiber (Roma, 1911)

3.0 Motivación

3.1 Puentes de fundición

3.2 Puentes de hierro

<puentes colgantes, puentes viga y puentes arco>

3.3 Puentes de acero

<puentes colgantes, puentes viga y puentes arco>

3.4 Tendencias actuales en el diseño de puentes metálicos

<materiales, construcción, pisos, secciones transversales y nuevas morfologías>



03 Puentes metálicos

*“Los primeros puentes metálicos datan de finales del siglo XVIII, principios del siglo XIX. Se construyeron primero de fundición, después de hierro y finalmente de acero y supusieron sobre todo **un gran salto** en las luces”*

❑ FUNDICIÓN: **Puente de Coalbrookdale** (1779). Este material se aplicó unos 100 años a la construcción de puentes **arco**



❑ HIERRO: **Puente de Berwick** (1820). El hierro se utiliza hasta finales del siglo XIX en puentes colgantes, puentes de vigas o puentes arco



❑ ACERO: **Puente de St Louis** (1874). Desde entonces, se aplica al diseño de puentes colgantes, de vigas, arcos y atirantados



03 Puentes metálicos

“Plantean la sustitución de la piedra por la fundición, con la misma tipología que los puentes de fábrica y algunos detalles propios de la construcción en madera”

❑ PROBLEMAS DERIVADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL:

- **Baja resistencia a la tracción** ► requiere tipologías abovedadas, con el inconveniente de $G \downarrow$
- **Aumento de las cargas variables** ► crecen las vibraciones (\pm), muy nocivas para las uniones

❑ PROBLEMAS DERIVADOS DEL DISEÑO ESTRUCTURAL:

- **Detalles propios de la construcción en madera** ► al ser materiales muy distintos, estas soluciones en general no funcionan
- **Los elementos de contención suelen estar flectados** ► son de escasa durabilidad

03 Puentes metálicos



■Obras: el *Puente de hierro de Coalbrookdale* (óleo de William Williams, 1740-1798)

03 Puentes metálicos



▀ Obras: *The Iron Bridge*, sobre el Severn (Coalbrookdale, 1779, consta de 5 arcos de fundición de 30 m, Darby & Wilkinson)

<3.1 Puentes de fundición>

03 Puentes metálicos



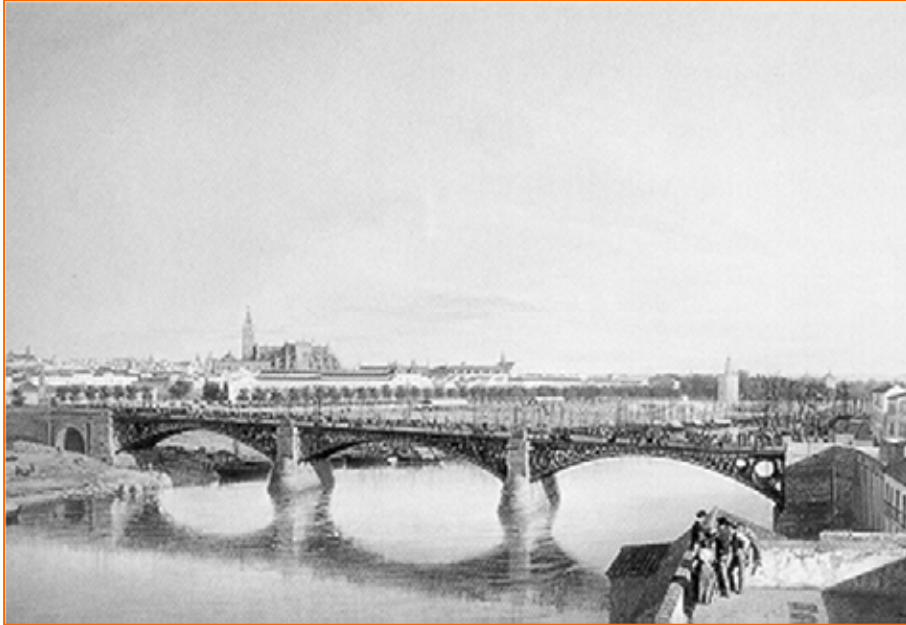
■Obras: *Pont des Arts*, sobre el Sena en París (Louis Alexandre de Cessart, 1803)

03 Puentes metálicos



■Obras: el *Puente del Carrousel* (óleo de Vincent Van Gogh, 1853-1890)

03 Puentes metálicos



▪ Vista de Sevilla en 1862 (óleo de Manuel Barrón y Carrillo)



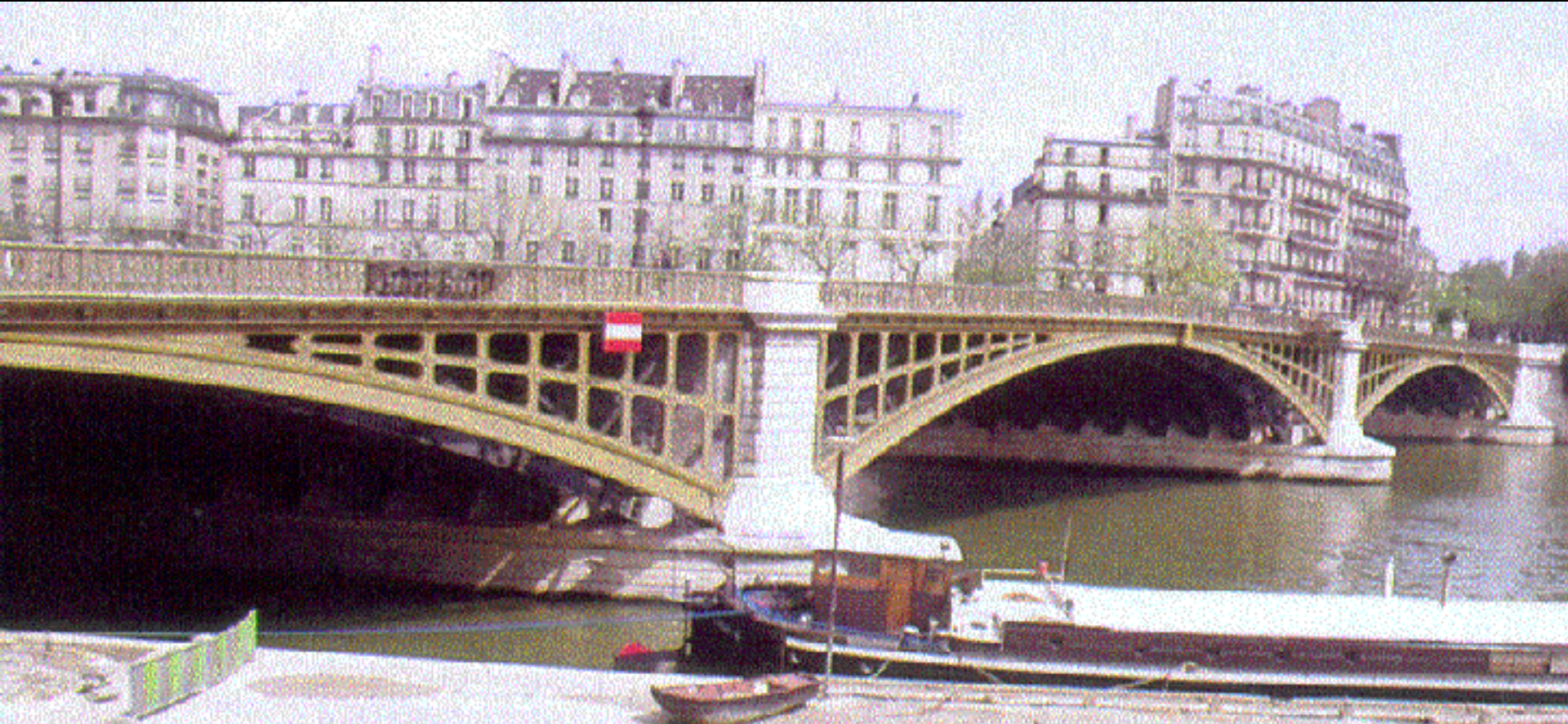
▪ Puente de Isabel II, o de Triana, en 1866 (fotografía de Jean Laurent)

03 Puentes metálicos



▀Obras: arcos de fundición en Central Park (Vaux & Wrey Mould, 1862 a 1864, detalle del Gothic Arch). Además del *Gothic Arch*, también se construyeron el **Bow Bridge** y el *Réservoir Bridge*

03 Puentes metálicos



■Obras: *Pont Sully*, sobre el Sena (París, 1876. Un vano de 42 m para el brazo menor y tres vanos para el mayor, el central de 50 m, todos ellos formados por 11 arcos)

03 Puentes metálicos



▪Obras: *Pont Sully*, detalles del piso del tablero y del arriostramiento transversal

03 Puentes metálicos

“La construcción de puentes de hierro se desarrolló en paralelo a la fundición desde comienzos del siglo XIX y aunque el material fuera más caro, los constructores supieron apreciar y aprovechar sus ventajas resistentes”

□ Permite sintetizar la **herencia histórica** (formas estructurales) y la **experiencia constructiva** desarrollada con diversos materiales (vigas de madera, arcos de piedra o fundición ...)

□ SE DESARROLLAN LAS TRES GRANDES FAMILIAS TIPOLOGICAS DE PUENTES:

▪ **Puentes colgantes**

▪ **Puentes de vigas** (trianguladas, de alma llena o en cajón)

▪ **Puentes arco**

03 Puentes metálicos

“El hierro se aplicó primero, en el ámbito de los puentes, a la construcción de cadenas de suspensión”

❑ EVOLUCIÓN DE LOS PUENTES COLGANTES DE “CABLES” DE HIERRO

- Los puentes colgantes de cadenas: **de James Finley a la escuela inglesa**
- Los puentes colgantes de alambres: la **escuela francesa** (Seguin y Arnodin) y la **americana** (Ellet y Roebling)

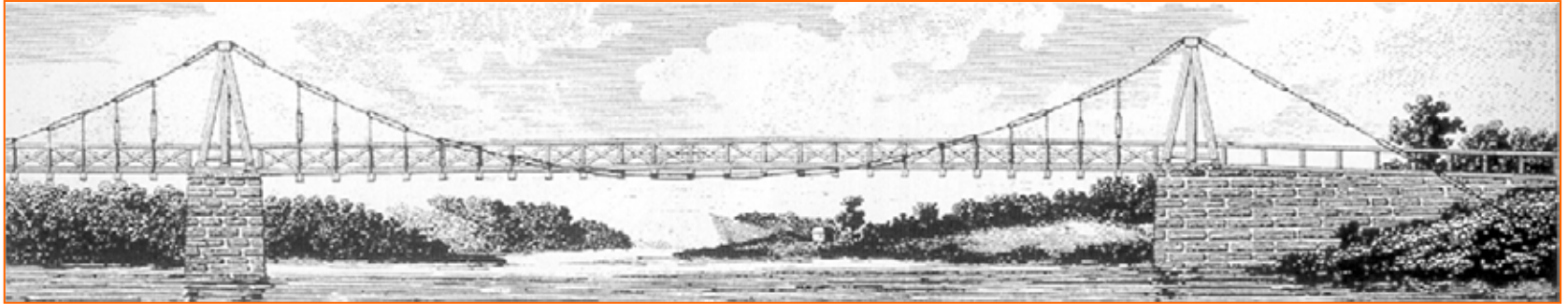
❑ **Precedentes:** las pasarelas colgantes hechas con cuerdas de fibras naturales trenzadas (Andes e Himalaya) y los puentes de cadenas de China y del Tibet, de eslabones convencionales (anulares) y disposición del piso entre el cableado

❑ **Historia moderna:** se inicia con los puentes colgantes de **James Finley**, en Estados Unidos. Aunque este juez de profesión conserva el sistema de cadenas de los chinos, **separa** el tablero (de vigas trianguladas de madera) de los cables portantes, disponiendo péndolas verticales entre ambos elementos

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



Dibujo de la patente de James Finley

1801 Jacob´s Creek, 21 m
1807 Potomac River, 39 m
1808 Patenta su sistema y lo publica en el diario *Port Folio*, con difusión en EE UU y GB
1809 Schuylkill Falls, 2×47 m
1810 Newburyport, 74 m, seguido de Brownsville, Lehigh River...

1811 Hundimiento del puente de Schuylkill Falls al pasar un rebaño
1820 Hundimiento del puente de Brownsville por el peso de la nieve
1827 Hundimiento del puente de Newburyport, reconstruido y en servicio hasta 1913

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

La escuela inglesa: *los puentes de cadenas planas*

1817: Samuel Brown patenta las cadenas planas

1820: Samuel Brown finaliza la construcción del puente de Berwick. A los seis meses, este es arrastrado por el viento



▀Obras: *The Union Bridge*, sobre el Tweed (Berwick, 1820, 137 m, primer puente de cadenas de hierro, Samuel Brown)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



▪Aspecto general de las cadenas de suspensión del *Puente de Berwick*

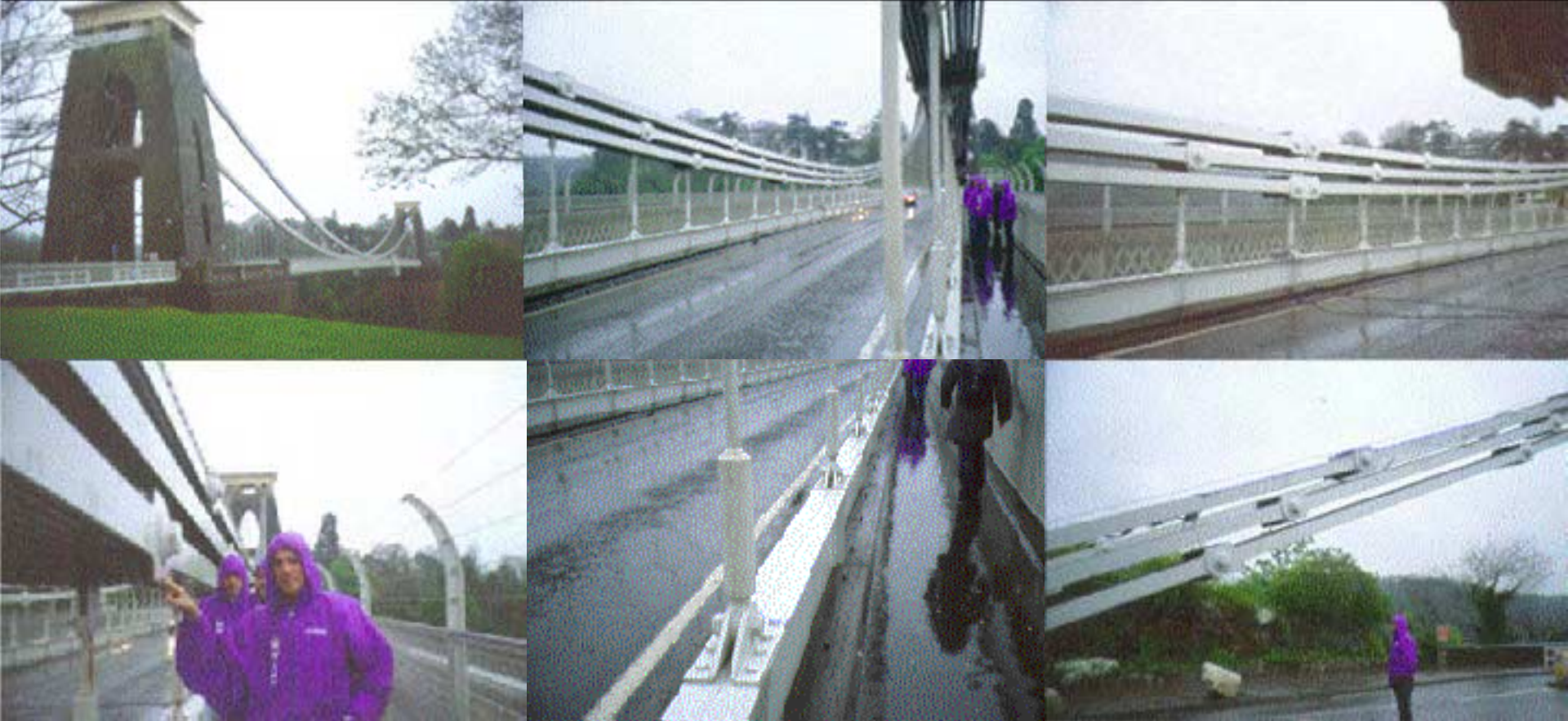
▪Detalle de las tres cadenas de barras de **unión indirecta** y de las péndolas, también formadas por barras de hierro, así como del cable de alambres de acero, colocado como refuerzo posterior

▪Elemento especial de unión de las barras de la cadena y de la péndola, característico de la unión indirecta

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



■Detalle de las cadenas de barras planas de **unión directa**, de las péndolas y de sus anclajes al tablero en el puente de Clifton (Bristol, 1865)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



■ Vista general de las cadenas de unión directa del puente de Clifton (Bristol, 1865) y del puente Albert (Londres, 1873)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



▪ Fue Thomas Telford (1757-1834), el gran ingeniero escocés, quien **asentó la validez de esta tipología para las grandes luces** construyendo el puente sobre el Menai entre 1822 y 1826. Con un vano de 177m, estuvo en servicio hasta 1940.

▪ Para esta obra, empleó **cadena plana de hierro, de unión indirecta**, más pesadas que los cables de alambre (pero conocía mejor su fabricación y el precio del hierro en Inglaterra era menor que en el continente)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: *Puente de Menai Straits* (Norte de Gales, 1826, colgante de 177 m con cadenas planas de hierro, T. Telford)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



■ Isambard Kingdom Brunel (retrato de Robert Howlett, 1857) y el *Puente de Clifton*, sobre el Avon (Bristol, 1865, 214 m)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *Puente de Clifton*, sobre el Avon (vista lateral, Bristol, 1865, 214 m, Isambard Kingdom Brunel)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

La escuela francesa: *los cables de alambres*

1821: viaje de H. Navier (profesor de Resistencia de Materiales en l'ENPC) a Inglaterra, para estudiar el puente de Berwick de S. Brown, primera estructura que sobrepasaba los 100 m de vano

1823: nuevo viaje de Navier a Inglaterra, para observar los inicios del puente del Menai. A su vuelta publica una memoria técnica sobre puentes colgantes, inmediatamente difundida en departamentos y prefecturas

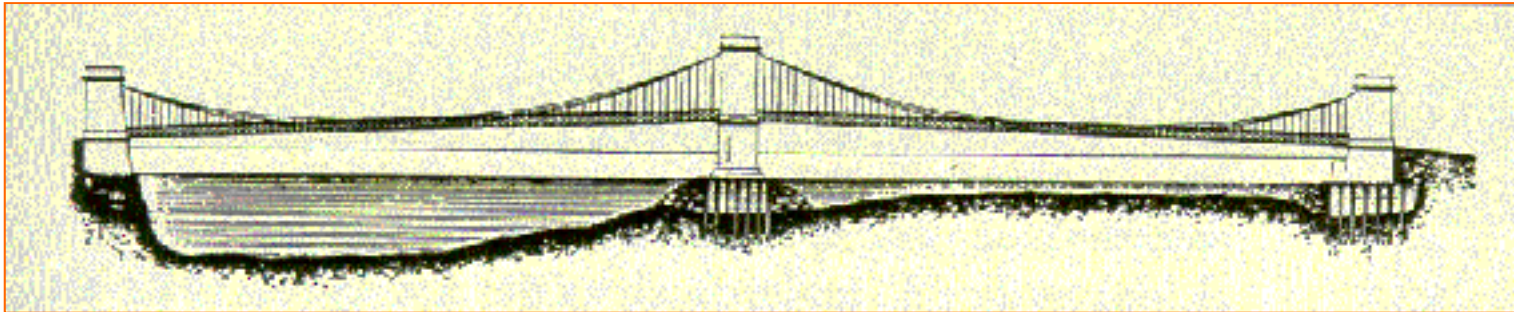
1824: el 26 de enero, Marc Seguin presenta una memoria en la Academia de las Ciencias sobre la construcción de puentes colgantes con alambre de hierro. El 18 de Febrero, Becquey (Director General de Ponts et Chaussées et Mines) envía una circular a todas las prefecturas, recomendando la promoción de estas obras y la respuesta no se hace esperar: *ese mismo año Seguin y Navier comienzan obras en Lyon y París*

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

- La familia Seguin inicia la construcción del puente de Tournon-Tain L´Hermitage (2×85 m suspendidos de cables de *alambre de hierro* Ø3), finalizado en 1825.

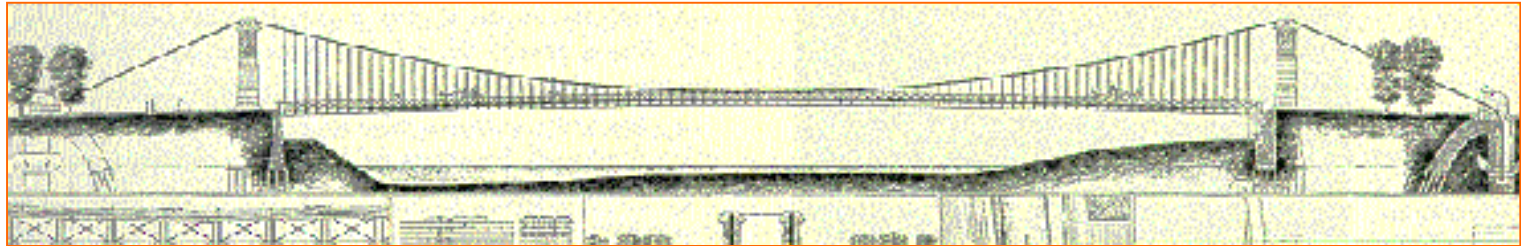


<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

▪ Navier comienza las obras del puente de Inválidos, en París, con un vano de 170 m colgado de **cadena planas**. En el verano de 1826, con el tablero en construcción, un movimiento en los cimientos de una torre forzó su desmontaje. El proyecto fue abandonado y Navier no volvió a construir puentes, dedicándose casi exclusivamente a la teoría de las estructuras



▪ Esta **primera generación de puentes colgantes franceses** nace de la estrecha colaboración entre el industrial Marc Seguin hijo y el ingeniero Plagniol (ENPC) sin olvidar el entusiasmo y apoyo incondicional de la administración. En ella se implican no solo los Seguin y Plagniol (construyeron un total de 186 puentes) sino también ingenieros de la talla de Vicat, Belin, Chaley... todos ENPC

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



Segundo puente de Tournon-Tain
L'Hermitage, sobre el ródano (Seguin, 1847, dos vanos de 89 m)



Puente de Friburgo (Suiza), sobre el Saarine (Chaley, 1834, 273 m y record mundial durante 15 años)



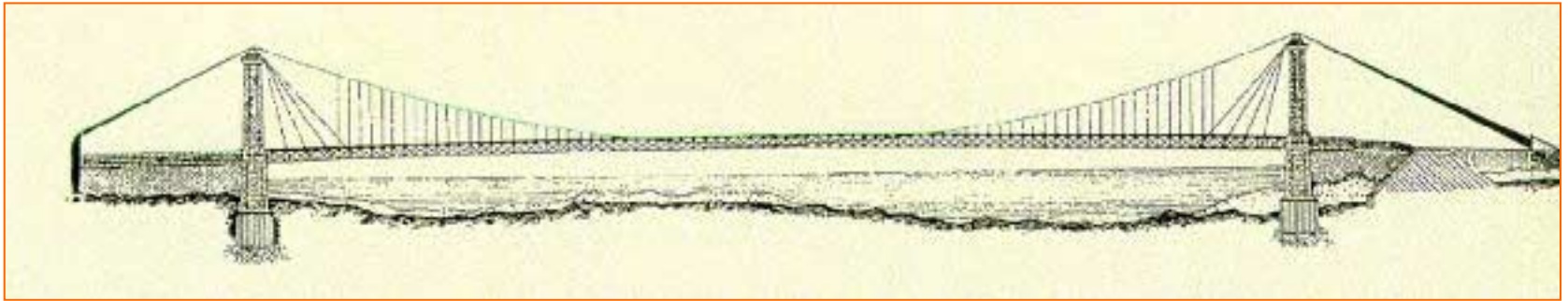
Pont de La Caille, o de Charles Albert sobre el barranco del río Usses (Belin, 1839, 182 m)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

- A partir de 1850, la construcción de puentes colgantes se ralentiza (accidentes por viento, por cargas dinámicas...). Estas obras eran **excesivamente económicas**: tableros de madera, suspensiones débiles...resultando un conjunto demasiado deformable teniendo en cuenta las crecientes cargas de uso (ferrocarril)
- La **segunda generación de puentes colgantes franceses** se debe a Ferdinand Arnodin. Mejoró la construcción de los cables, introduciendo el **cable monotorón de torsión alternativa** en sustitución de los cables de alambres paralelos, los sistemas de fijación de las péndolas y aumentó la rigidez longitudinal del tablero disponiendo barandillas metálicas trianguladas en lugar de las tradicionales de madera

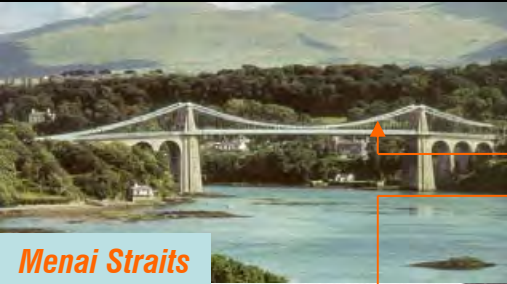


- Alzado del *puente de Lamothe*, sobre el Allier (proyecto de Arnodin)

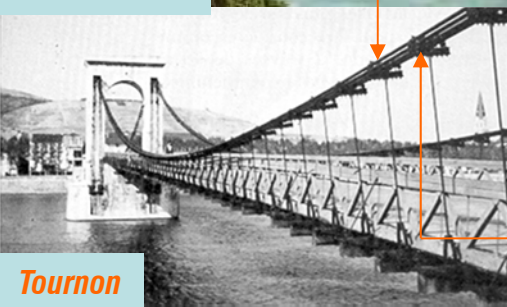
<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 Puentes de Hierro>

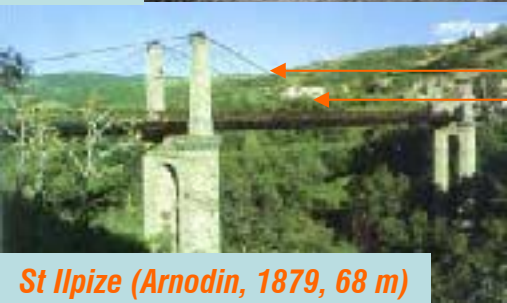
03 Puentes metálicos



Menai Straits



Tournon



St Ilpize (Arnodin, 1879, 68 m)

EVOLUCIÓN DEL SISTEMA PRIMARIO

- Cadenas de anillas (J. Finley)
- Cadenas planas (S. Brown)
- Cable de alambres paralelos (M. Seguin)
- Cable monotorón (F. Arnodin)

EVOLUCIÓN DE TABLERO Y PÉNDOLAS

- Suspensiones **abiertas** ancladas a riostras transversales. El tablero, generalmente de madera, carece de rigidez longitudinal
- Anclajes más compactos (collares). Tablero con rigidez longitudinal (barandillas metálicas trianguladas)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

La escuela americana

1849: Charles Ellet, antiguo alumno de Polytechnique, finaliza el puente de Wheeling sobre el Ohio, utilizando cables de alambres paralelos dispuestos como en los puentes franceses de 1ª generación (record mundial con sus 308 m)



<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

■ A raíz del éxito de esta obra (que se hundió por efecto del viento en 1854 y fue reconstruida por el propio Ellet), La compañía de America y Canada del puente del Niágara le encarga construir un vano de 240 m para ferrocarril



■ Obras: el *Puente de Wheeling*, sobre el Ohio (C. Ellet, 1849, 308 m)

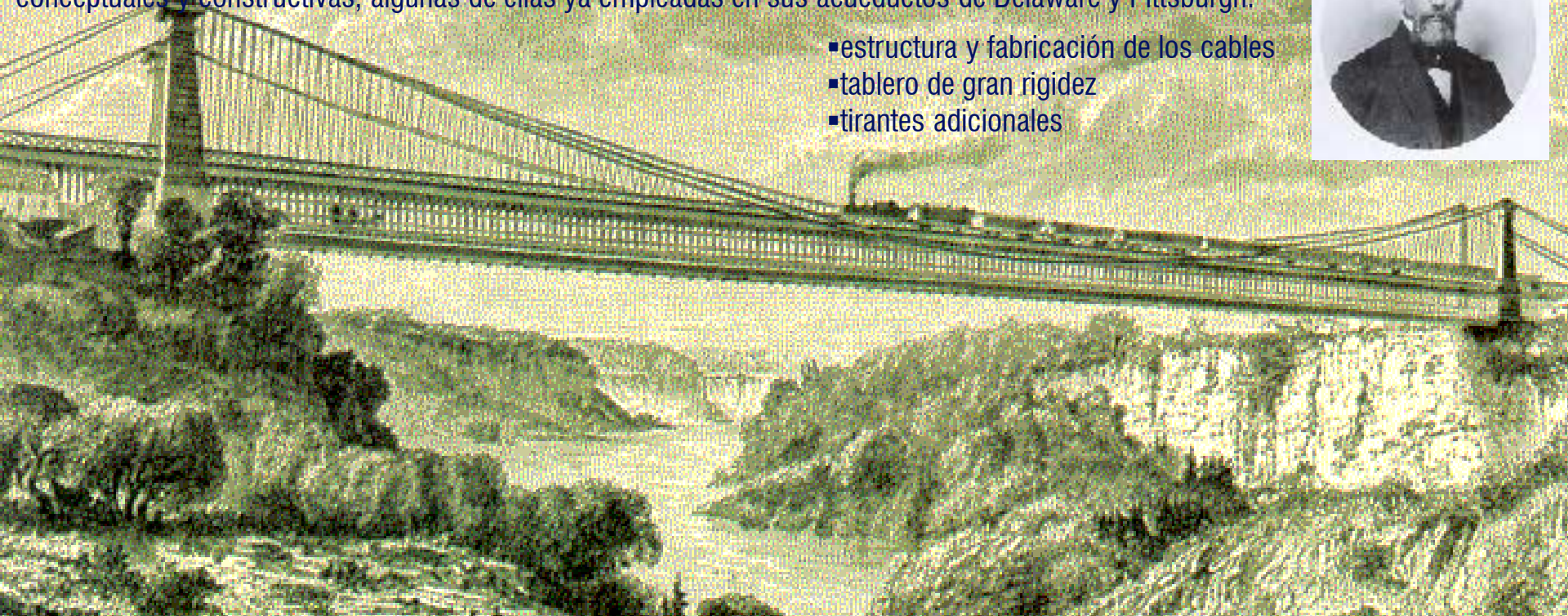
<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

1855: John Augustus Roebling (1806-1869), ingeniero de origen alemán, termina con éxito el puente de ferrocarril sobre el Niágara, sucediendo en el encargo a C. Ellet. Incorpora al proyecto notables innovaciones conceptuales y constructivas, algunas de ellas ya empleadas en sus acueductos de Delaware y Pittsburgh:

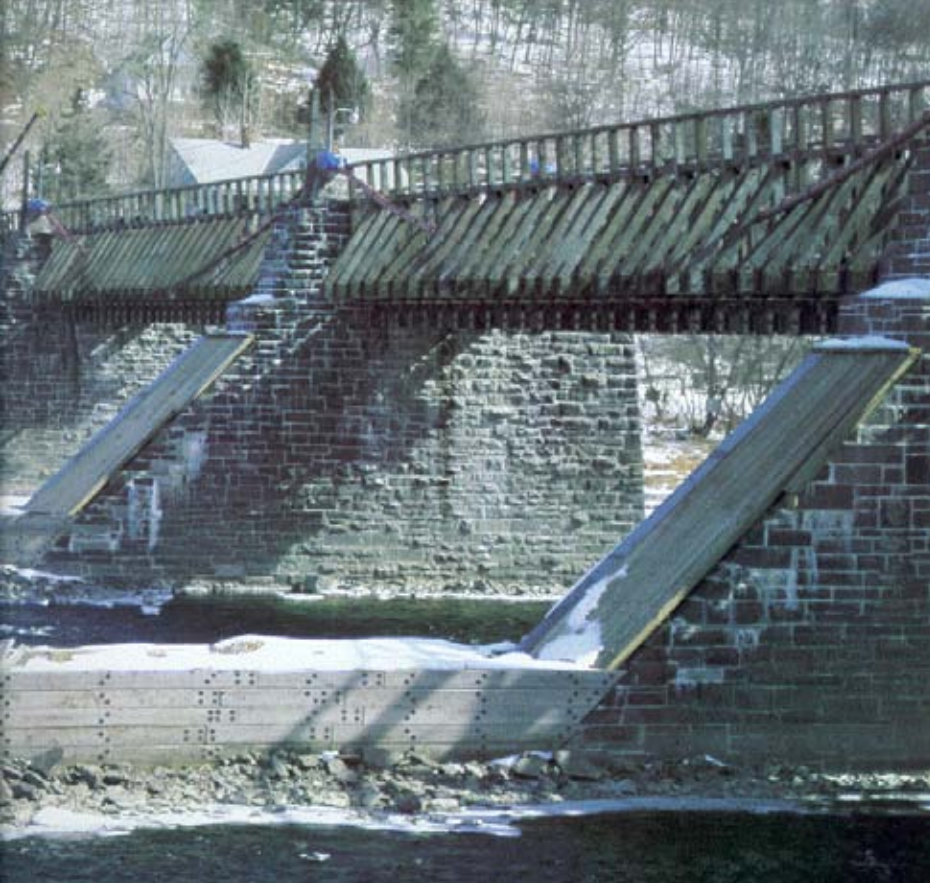
- estructura y fabricación de los cables
- tablero de gran rigidez
- tirantes adicionales



<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



ACUEDUCTO de DELAWARE (John A. Roebling, 1849)

- Actualmente es el puente colgante americano más antiguo y único superviviente de los cuatro acueductos suspendidos construidos por J.A. Roebling
- Facilitaba el paso del canal de Delaware & Hudson sobre el río Delaware, por el que se transportaba carbón hasta Nueva York
- Fuera de servicio desde 1898, fue reconvertido en puente de carretera
- En 1980, lo adquirió el Servicio de Parques Nacionales y en los últimos años ha sido rehabilitado como acueducto, reconstruyendo la superestructura original (1988)



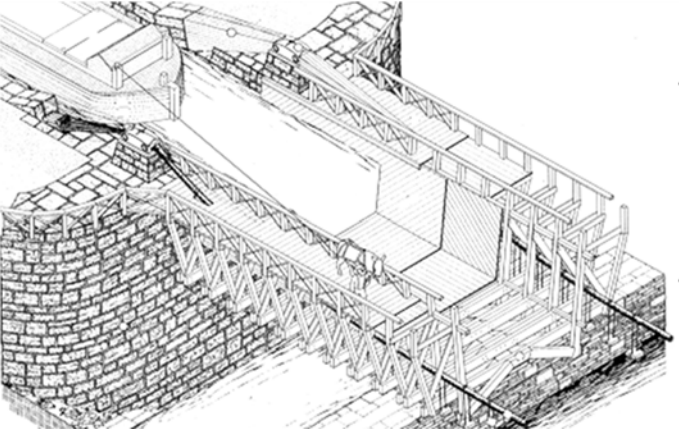
<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



- Detalle de las torres de fábrica, de las sillas de montar de fundición y de los cables de alambres paralelos empleados por John Roebling en esta estructura suspendida de cuatro vanos de 40 a 43 m

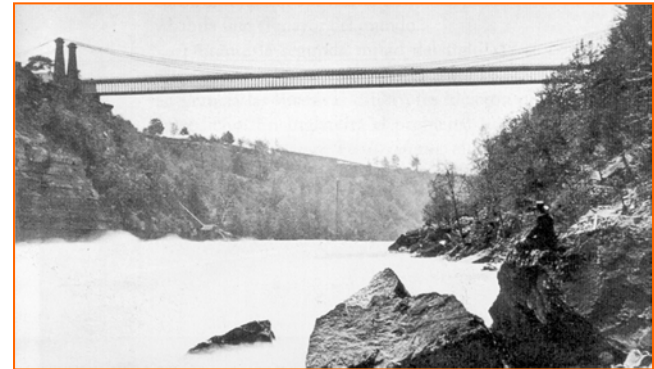
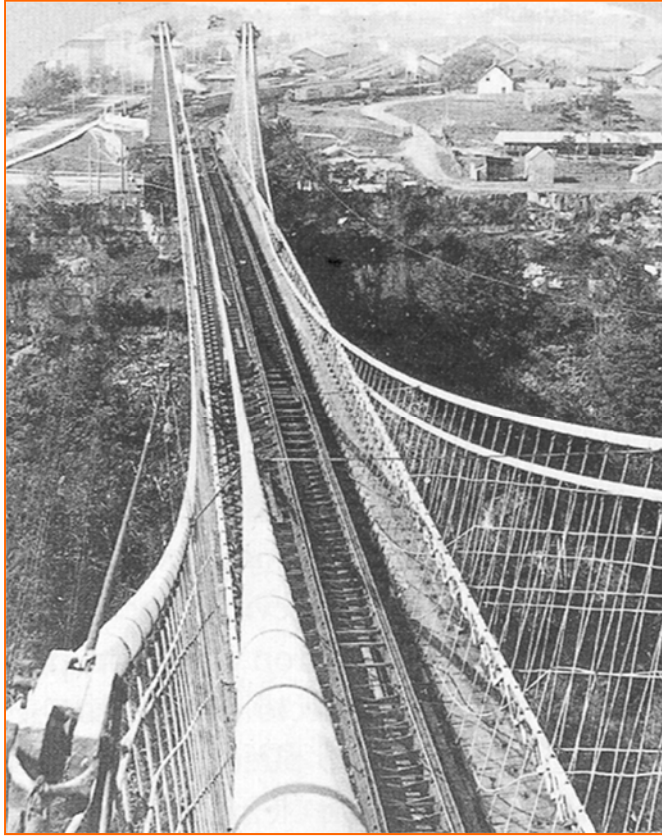


- Perspectiva axonométrica mostrando la concepción estructural y constructiva de los tramos suspendidos del canal

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



■Obras: el *Puente de ferrocarril sobre el Niágara* (John A. Roebling, 1855, 250 m)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



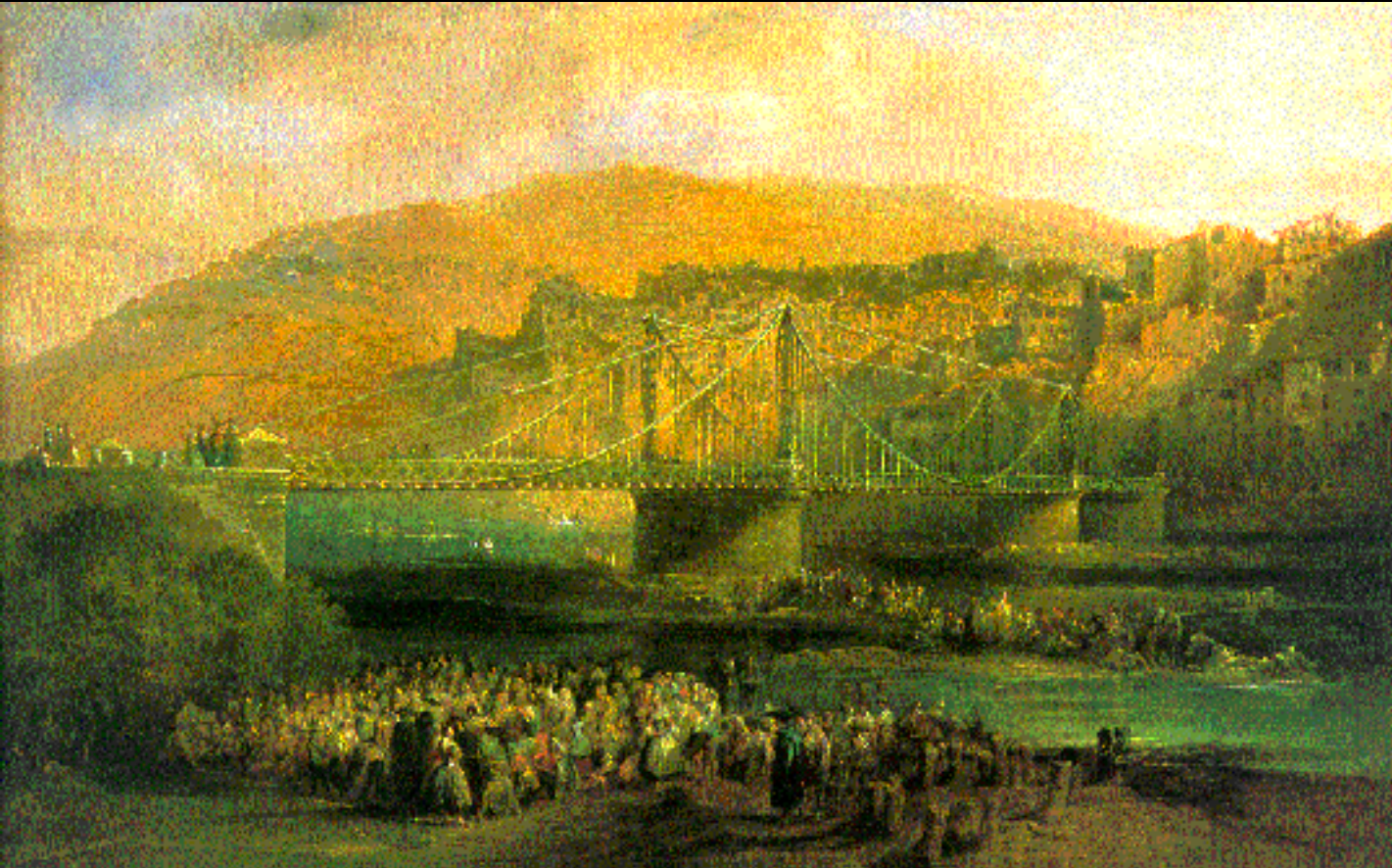
▪ Después del puente de ferrocarril sobre el Niágara, Roebling construye los puentes colgantes de la Calle Sexta en Pittsburgh, sobre el río Allegheny (1860, dos vanos principales de 95 m) y de Covington-Cincinnati (1867, vano central de 322 m), este último en colaboración con su hijo Washington A. Roebling

▪ Obras: el *Puente de Cincinnati*, sobre el Ohio (Cincinnati-Covington, 1867, colgante de alambres de hierro de 322 m, J.A. y W.A. Roebling)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



■El puente colgante de Fraga fue en la época uno de los más característicos símbolos de progreso y probablemente gracias a ello, fue escogido como tema por el artista. Se trató de una decisión adecuada porque, como sucedió con la mayoría de los puentes colgantes de entonces, hechos con materiales inadecuados y de escasa rigidez, el de Fraga no resistió mucho tiempo. Terminado en abril de 1847, se hundió en 1852, 1866 y 1877, tras sucesivas reconstrucciones

■Vista de la ciudad de Fraga y su puente colgante (óleo de Jenaro Pérez Villaamil, 1807-1854)

<3.2.1 Puentes colgantes>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

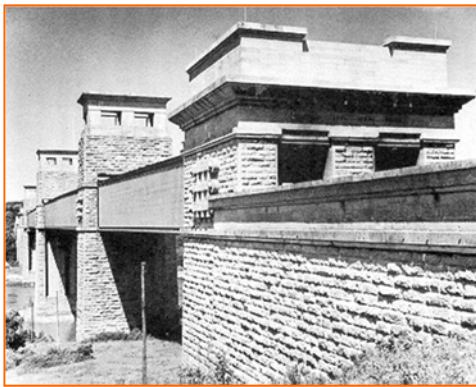
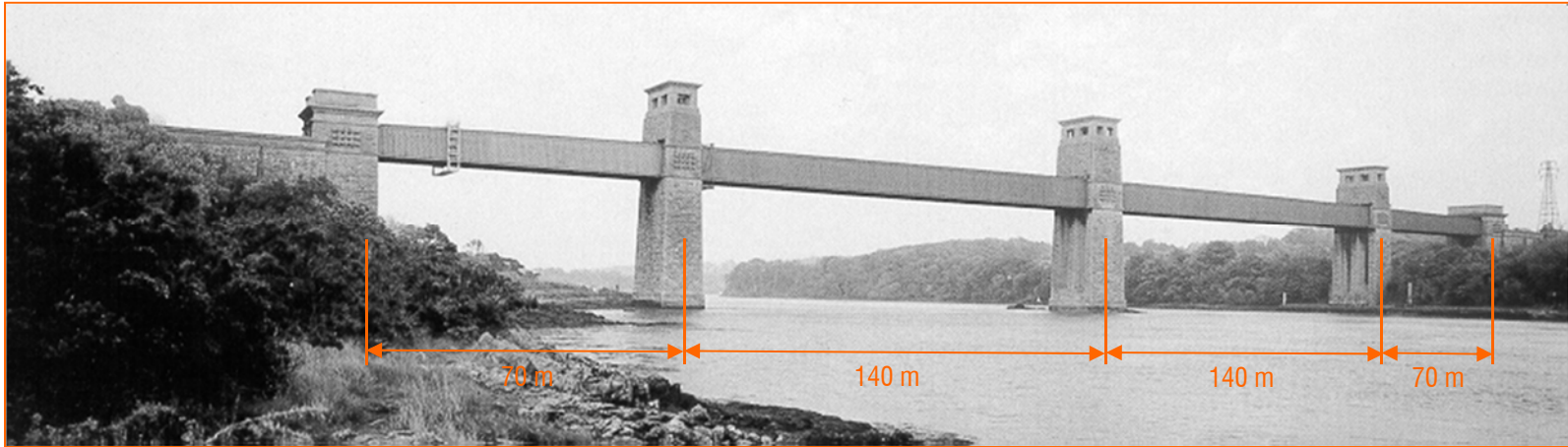
- ❑ DESARROLLO DEL FERROCARRIL. Este hecho es determinante para la construcción de puentes por dos motivos:
 - Supone la **producción industrial de hierro**
 - Exige itinerarios de trazado riguroso y **estructuras más resistentes**, debido al aumento del peso de los transportes

- ❑ DESTACAREMOS de este período:
 - El **puente Britannia**, de Robert Stephenson
 - Los viaductos de vigas trianguladas de **Gustav Eiffel**, en el “*Massif Central*” francés

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

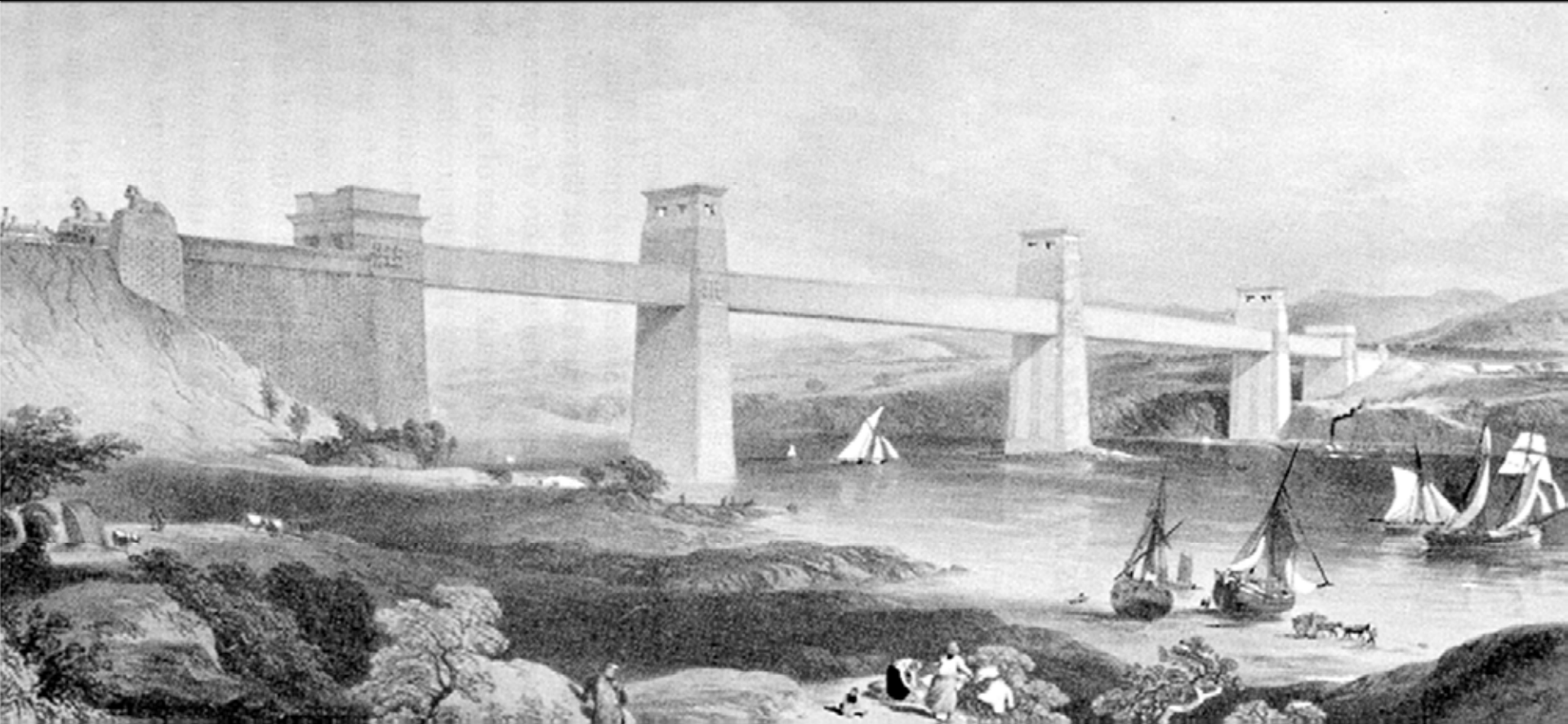


■Obras: el *Puente Britannia*, sobre el estrecho del Menai (FC entre el Norte de Gales y la isla de Anglesey, 1850, R. Stephenson)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *Puente Britannia*, sobre el estrecho del Menai (FC entre el Norte de Gales y la isla de Anglesey, 1850, R. Stephenson)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

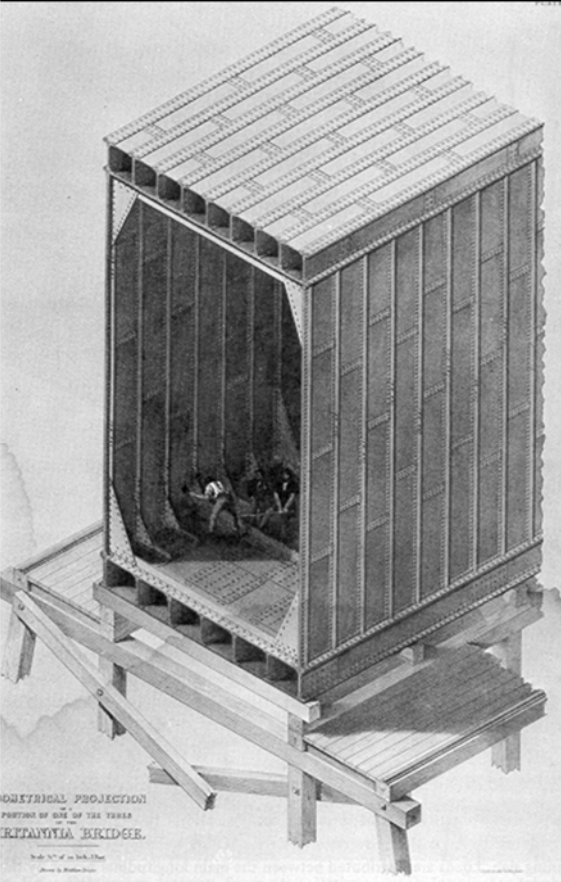


▀Obras: el *Puente Britannia*, grabados de distintas fases de la obra (1846-1850)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

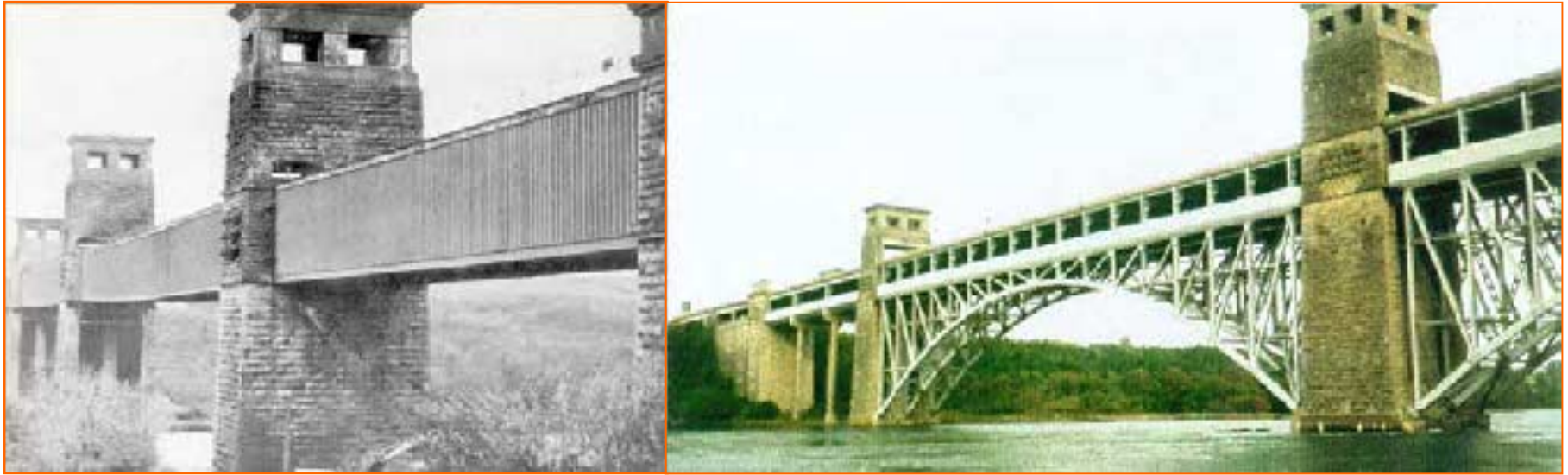


- En 1838, **Robert Stephenson** (1803-1859), hijo de George Stephenson (el “padre” del ferrocarril), es designado para construir un puente de ferrocarril a una milla del colgante de Telford
- Para este proyecto, busca la colaboración de **William Fairbairn**, ingeniero metalúrgico constructor de barcos, y del teórico **Eaton Hodgkinson**, con el que lleva a cabo la primera gran aplicación de la viga continua (Moseley ya había traducido las “*leçons*” de Navier)
- Como tablero, disponen por primera vez una **viga cajón**, de 9.45 m de canto para un vano principal de 140 m ($h/L=1/15$)
- **Fairbairn** interviene en el diseño de los cajones (espesores, rigidización...) mientras que **Hodgkinson** colabora en el cálculo de la **viga continua**, cuya rigidez permite finalmente prescindir de las cadenas de suspensión inicialmente previstas
- Para asegurarse de los diseños adoptados, construyeron y ensayaron hasta rotura un modelo de viga de 22m de luz y 1.20 m de canto, estudiando principalmente los fenómenos de abolladura de las chapas (“*Los tubos llenaban mi cabeza, Me acostaba con ellos y me levantaba con ellos*”)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



- El puente Britannia sufrió un grave incendio en Mayo de 1970, provocado por dos niños. Los daños causados (flechas de medio metro en las vigas) exigieron suplementar la estructura con unos arcos inferiores, solución que curiosamente había descartado Stephenson a causa de las restricciones impuestas por la navegación en el estrecho (tal vez hubiera sido más afortunado disponer suspensiones, más fieles al concepto original)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

PUENTES VIGA TRIANGULADOS en FRANCIA

1864: Compagnie d'Orléans

Viaduc de Busseau-sur-Creuse

W. Nördling, F. Moreaux

Cail

1866: Línea Figeac-Aurillac

Viaduc de la Cère

F. Moreaux

Cail

1869: Línea Commentry-Gannat (Massif Central)

Viaduc de la Bouble

W. Nördling, F. Moreaux

Cail

Viaduc de Bellon

W. Nördling

Fives-Lille

Viaduc de Neuvial

W. Nördling

Eiffel & Cie

Viaduc de Rouzat

W. Nördling

Eiffel & Cie

1883: Nationale 10 sur la Dordogne

Pont de Cubzac

Ch. De Sansac

Eiffel & Cie

- Nuevos sistemas de construcción (empuje, con o sin atirantamiento provisional, voladizos sucesivos...)
- Pilas metálicas de gran altura
- Tableros viga en celosía, $h/L \sim 1/11$

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



■ Gustav Eiffel (1832-1923)



- Viga en celosía, empujada con atirantamiento provisional, según el sistema ideado por F. Moreaux
- Dirigido por Wilhem Nördling, ingeniero de origen alemán, formado en Polytechnique

■ Viaduc de Busseau-sur-Creuse (FC, 41.25+4×50+41.25 m, 1864, W. Nördling, F. Moreaux y G. Eiffel. **Cail**)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



▪Viga en celosía, empujada según el sistema ideado por F. Moreaux

▪Obras: *Viaduc de la Cère* (FC, 1866, F. Moreaux. Cail)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



- **Viga en celosía**, empujada según el sistema ideado por F. Moreaux
- **Pilas de fundición** con cuatro tubos de compresión

▪ Obras: *Viaduc de la Bouble* (FC, 6×50 m, 1869, W. Nördling, F. Moreaux. **Cail**)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



- **Viga en celosía**, empujada según el sistema ideado por F. Moreaux
- **Pilas de fundición** con cuatro tubos de compresión

▪ Obras: *Viaduc de Bellon* (FC, 3×40 m, 1869, W. Nördling. Fives-lille)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



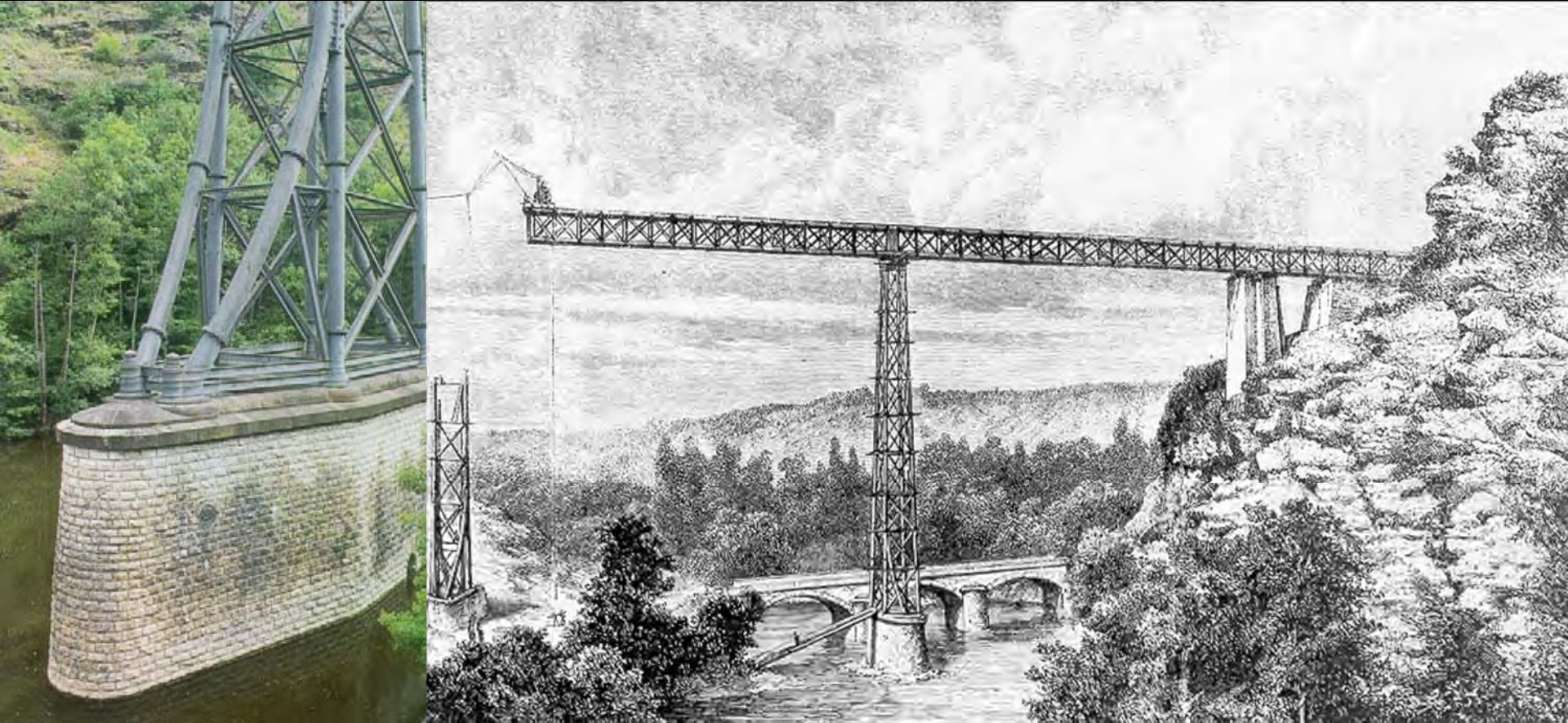
- **Viga en cruz de San Andrés**, empujada
- **Pilas de fundición** con cuatro tubos de compresión Ø50 cm

▪Obras: *Viaduc de Neuvial*, sobre la Sioule (FC, vanos de 55+58+55 m, pilas de hasta 50 m, 1869, W. Nördling. Eiffel & Cie)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



▪ *Viaduc de Neuvial*: detalle de la pila y grabado del empuje del tablero y montaje de la pila desde el voladizo (sistema Moreaux)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



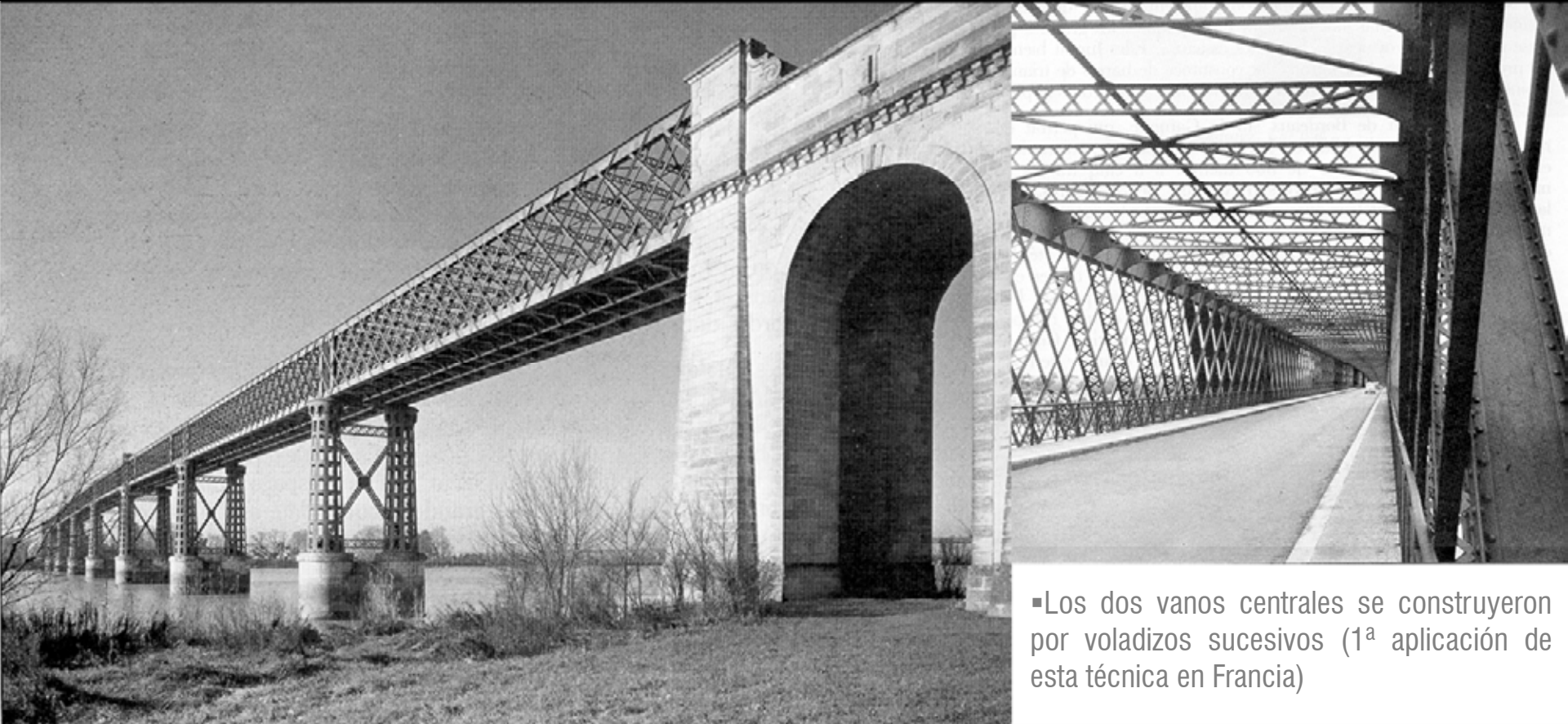
- Viga en cruz de San Andrés, empujada
- Pilas metálicas con cuatro tubos de compresión

▪Obras: *Viaduc de Rouzat*, sobre la Sioule (FC, dos vanos de 49 m, 1869, W. Nördling. Eiffel & Cie)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



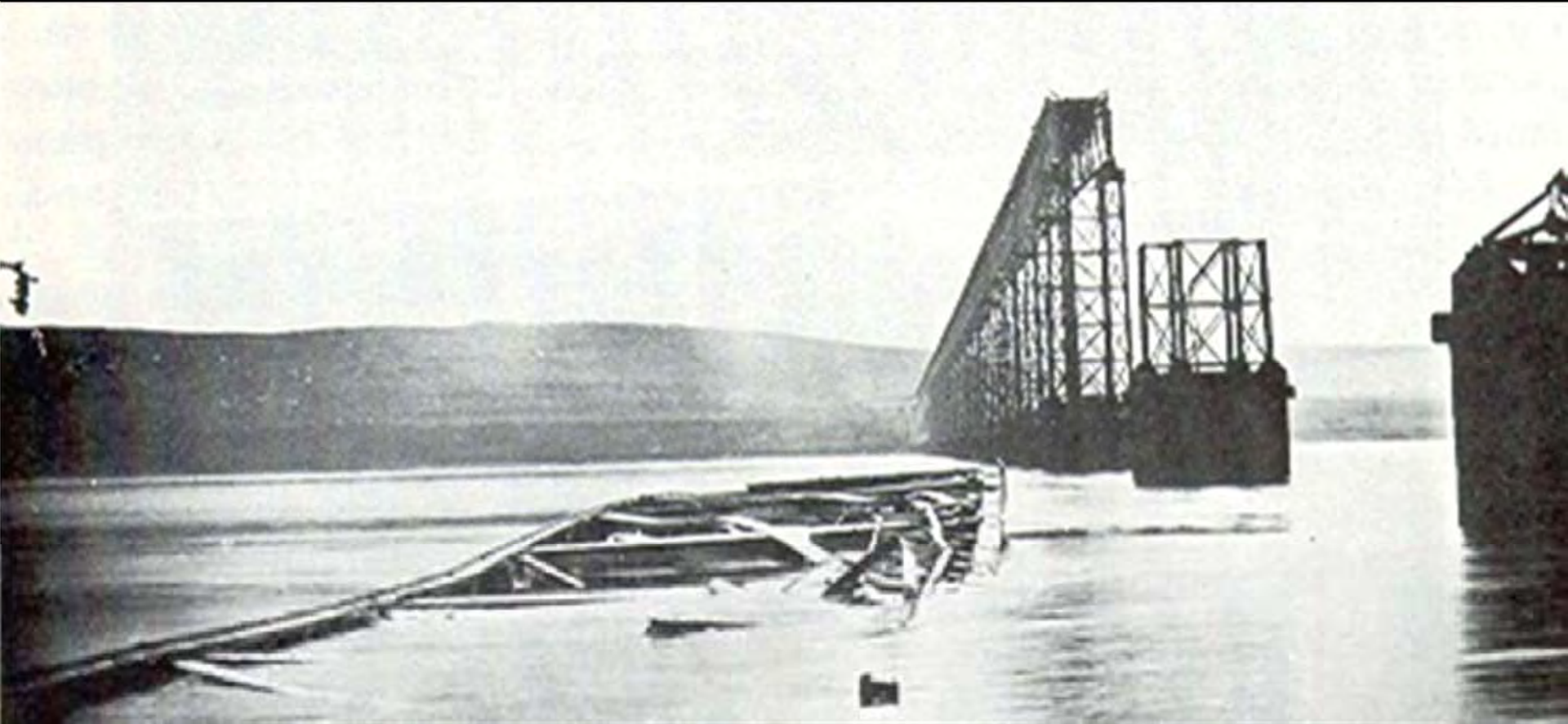
▪ Los dos vanos centrales se construyeron por voladizos sucesivos (1ª aplicación de esta técnica en Francia)

▪ Obras: *Pont de Cubzac*, sur la Dordogne (N10, 57.60+8×72.80+57.60 m en celosía, 1879-1883. Eiffel & Cie)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



■ Noche del 28/XII/1879: hundimiento del *punte del Firth of Tay* (viaducto de FC de la línea Edimburgo-Dundee, 50×64 m, viento de 145 km/h, 75 víctimas)

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

❑ DISEÑO: a partir de la segunda mitad del siglo XIX, en hierro forjado se proyectan arcos de alma llena, triangulados e incluso celulares, con tablero superior o inferior, pero dimensionados de acuerdo con los avances de la estática.

▪ En los **arcos de alma llena**, ya se computa la flexión (fórmulas de Bresse: “*Recherches analytiques sur la fléxion et la résistance des pièces courbes*”, 1854)

▪ **Los arcos triangulados** se analizan por métodos gráficos (las *libretas* de Eiffel de la expo...)

❑ Desarrollo de NUEVOS PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS, como los **voladizos sucesivos**, que permiten simplificar y abaratar las grandes obras

<3.2.2 Puentes viga>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: *acueducto de Pontcysyllte* (Canal de Ellesmere, sobre el Dee, 1805, arcos de 13.7 m y pilas de 38 m, T. Telford)

<3.2.3 Puentes arco>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos

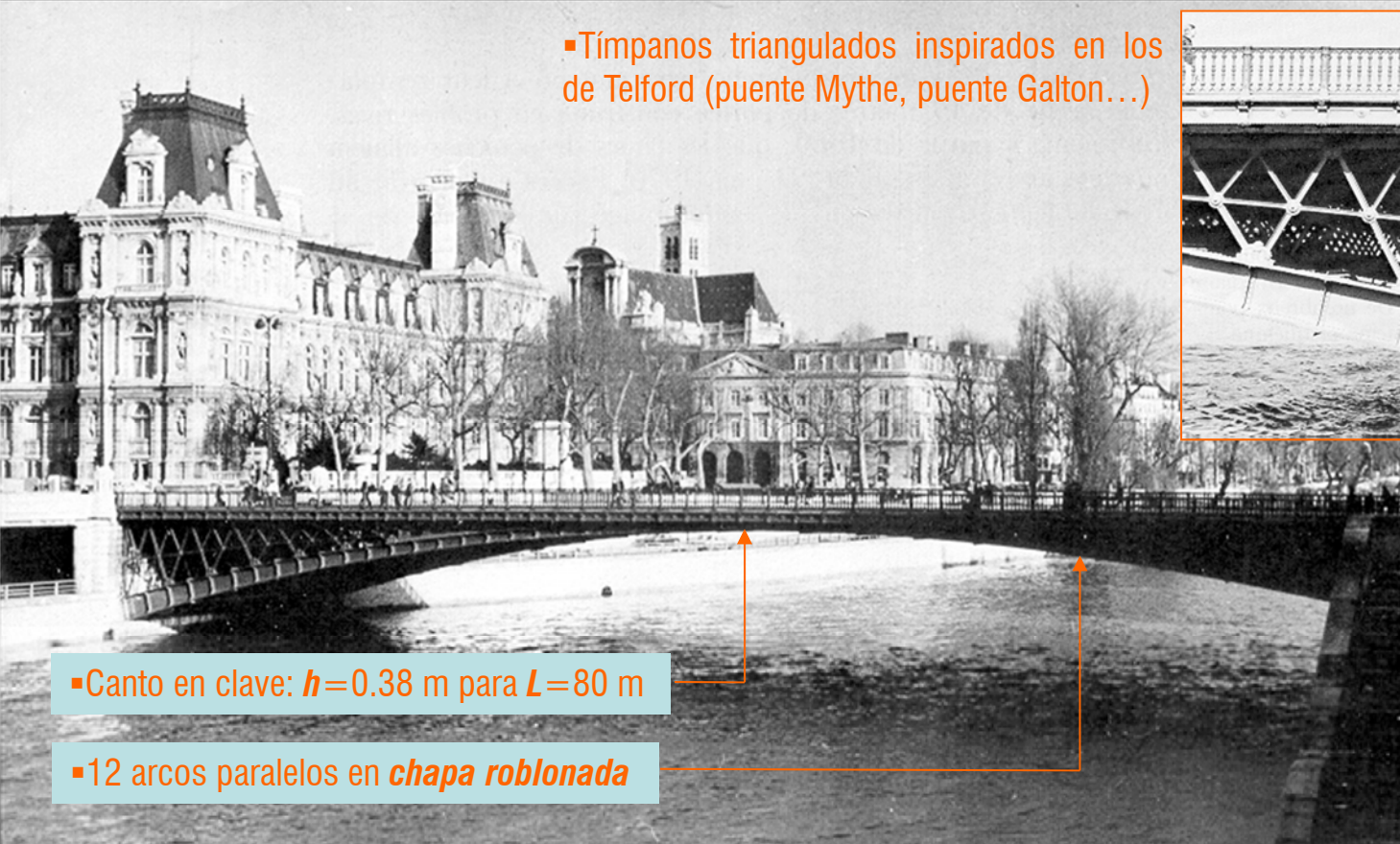


■Obras: *Puente Mythe*, sobre el Severn (1826, Arcos de hierro de 52 m con tímpanos triangulados, T. Telford)

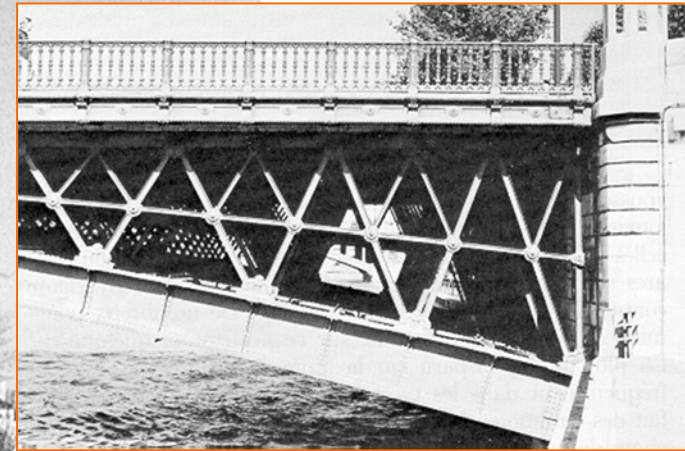
<3.2.3 Puentes arco>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos



▪ Tímpanos triangulados inspirados en los de Telford (puente Mythe, puente Galton...)



▪ Canto en clave: $h=0.38$ m para $L=80$ m

▪ 12 arcos paralelos en *chapa roblonada*

▪ Obras: *Pont d'Arcole*, sobre el Sena en París (un vano de 80 m, 1855, A. Oudry)

<3.2.3 Puentes arco>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



■Obras: *Puente Royal Albert*, en Saltash, sobre el Tamar (FC en el Sur de Gales, 1859, 2 vanos de 132 m, I.K. Brunel)

<3.2.3 Puentes arco>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

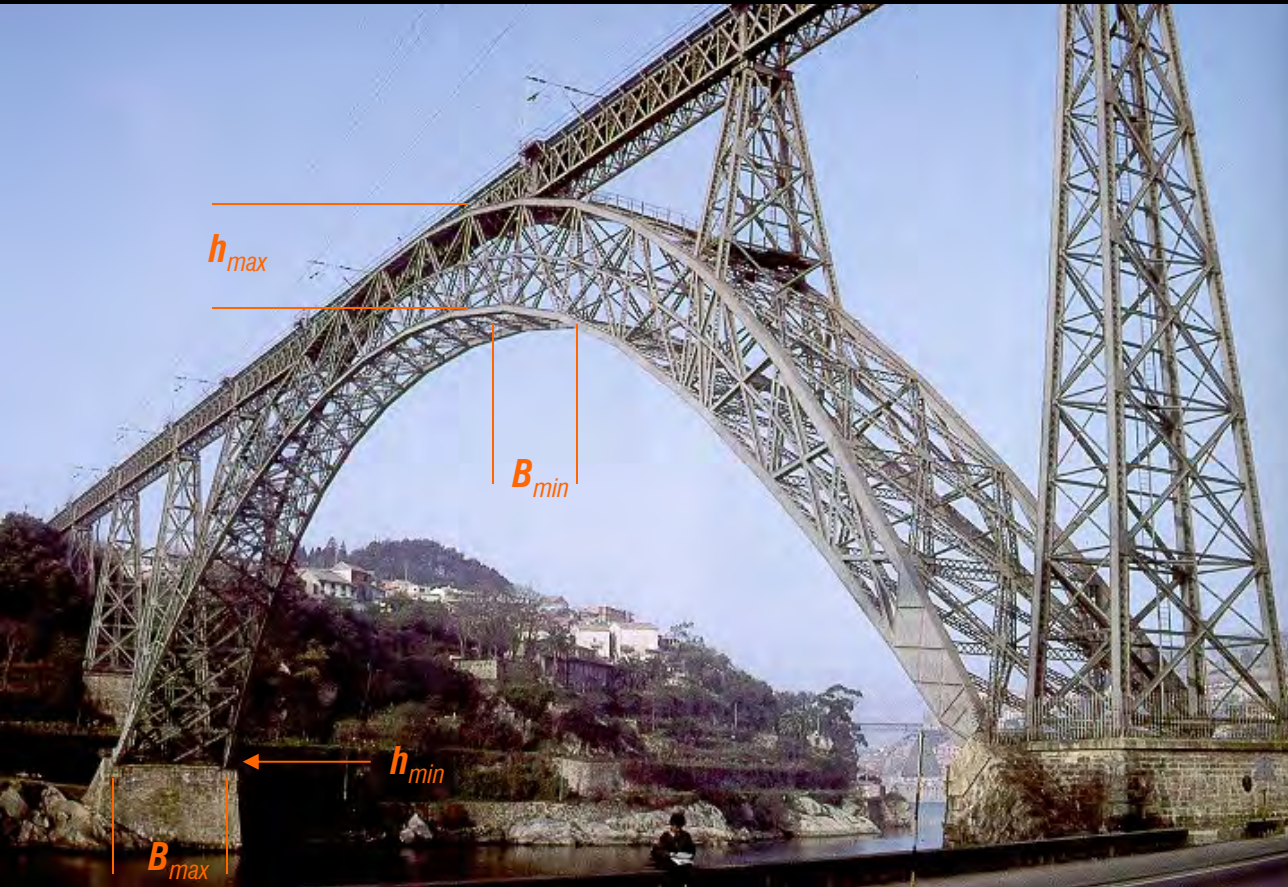


■Obras: *Puente Royal Albert*, en Saltash (variante del arco atirantado)

<3.2.3 Puentes arco>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

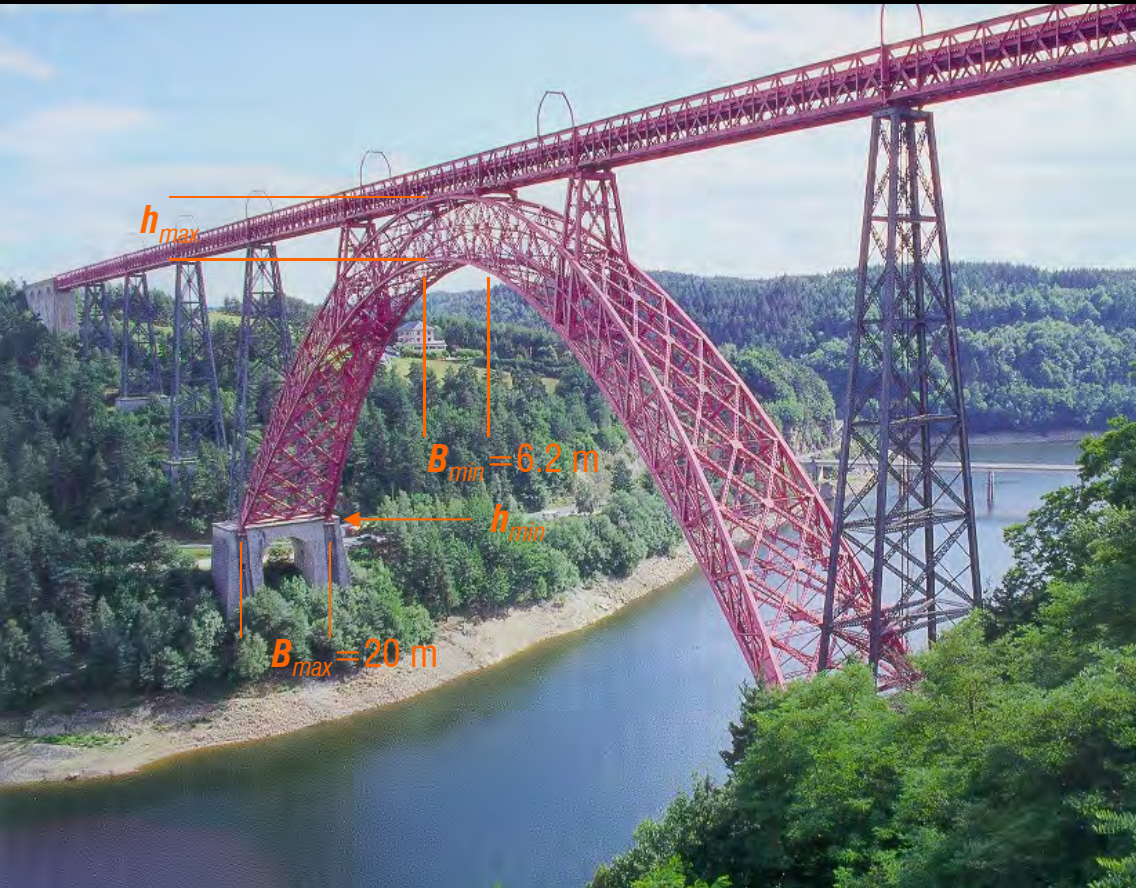


- Obras: *Ponte Maria Pia*, sobre el Duero (Oporto, 1877, arco de hierro biarticulado de 160 m, G. Eiffel y T. Seyrig)

<3.2.3 Puentes arco>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

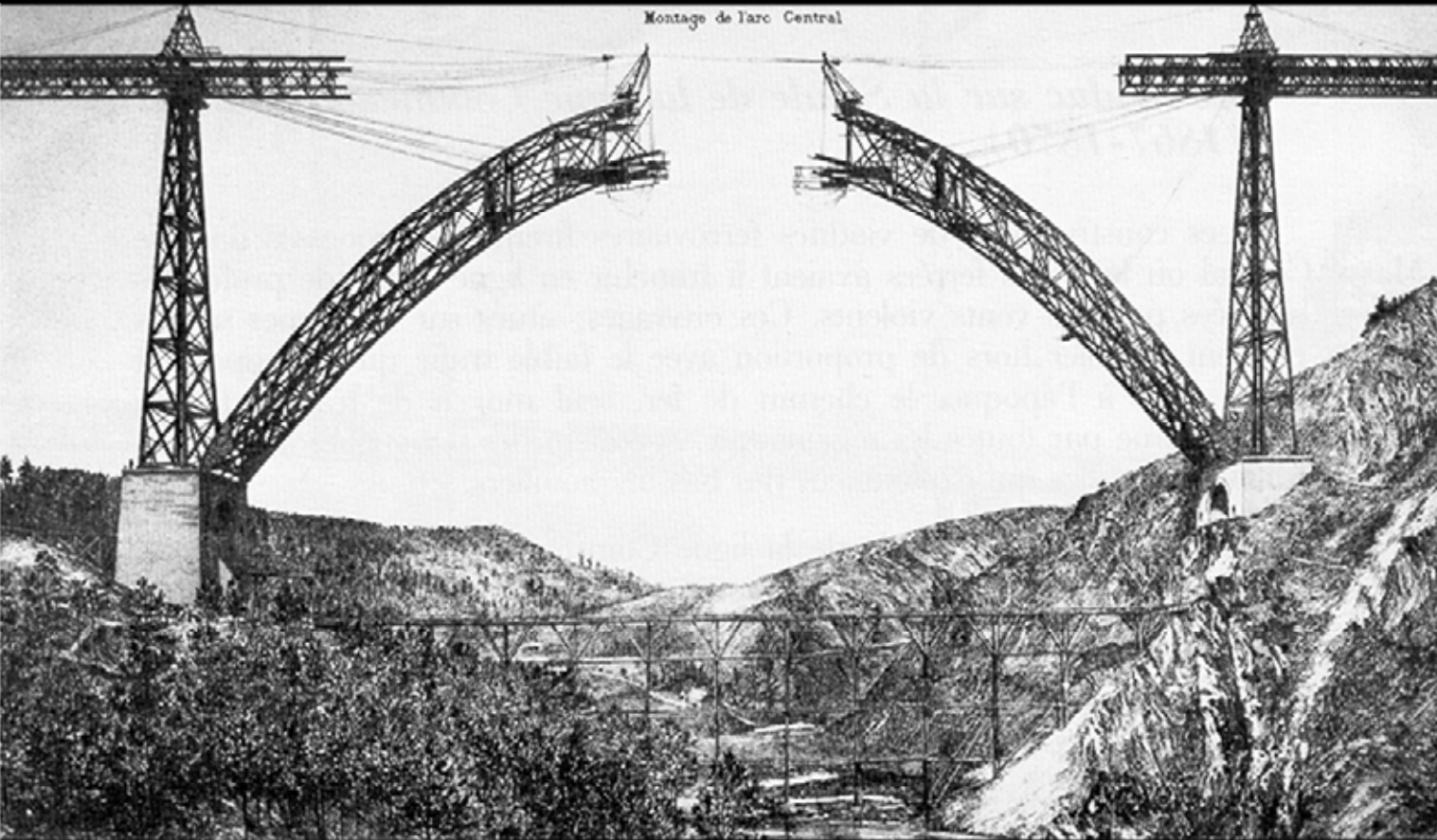


■Obras: *Viaduc del Garabit*, sobre el Truyère (FC, 1884, arco de hierro biarticulado de 166 m de luz y 52 m de flecha, Eiffel-Koechlin-Boyer)

<3.2.3 Puentes arco>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

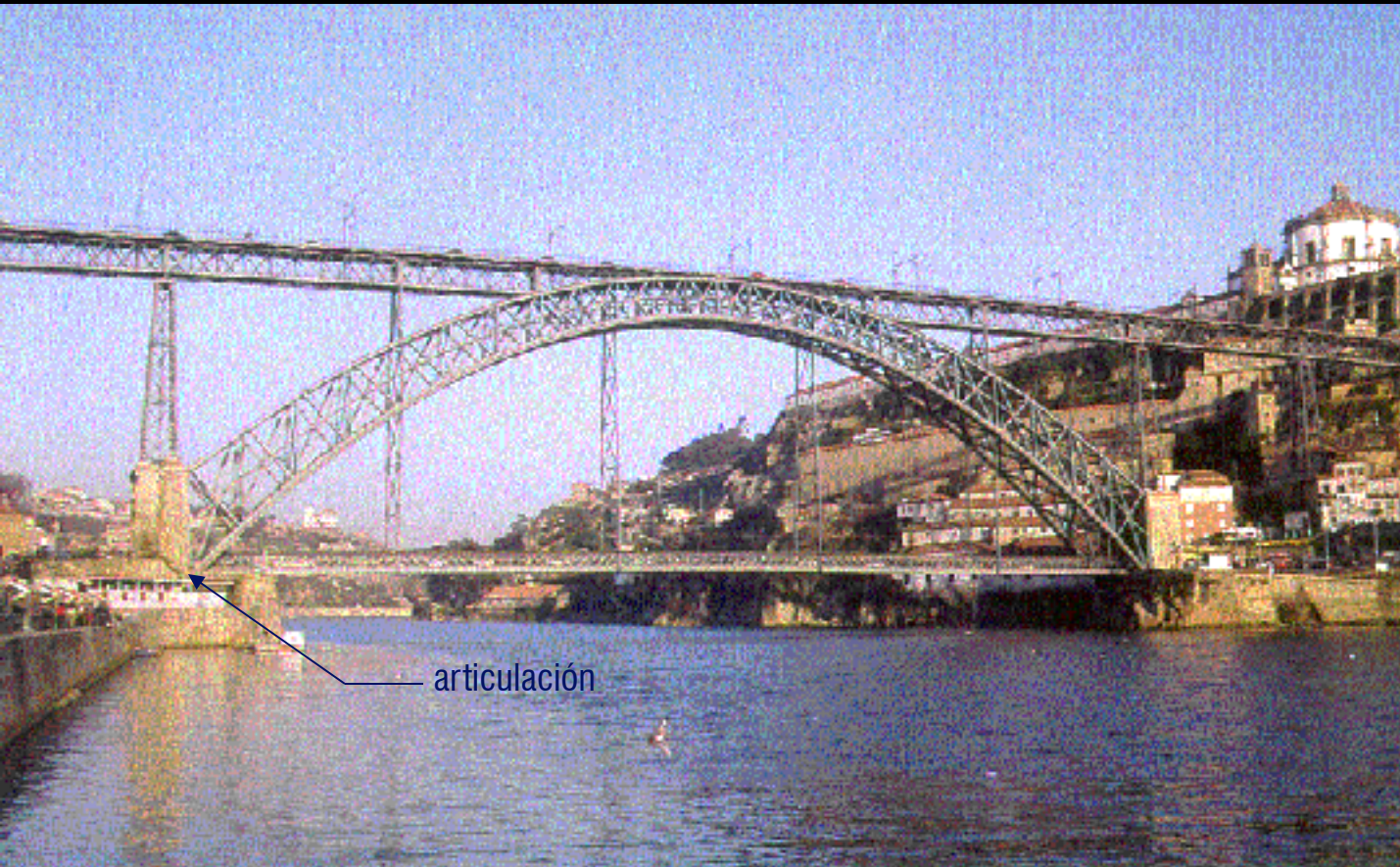


■Obras: *Viaduc del Garabit* (construcción mediante voladizos atirantados, tal y como se había procedido en el puente de J.B. Eads)

<3.2.3 Puentes arco>

<3.2 PUENTES DE HIERRO>

03 Puentes metálicos



- Obras: *Puente Luis I*, sobre el Duero en Oporto (FC y carretera, 1885, arco de hierro biarticulado de 174.5 m, Théophile Seyrig)

articulación

<3.2.3 Puentes arco>

<3.2 Puentes de Hierro>

03 Puentes metálicos

□ PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DEL ACERO

- **1856:** Henry Bessemer inventa el convertidor
- **1867:** William Siemens y Émile Martin patentan el procedimiento Siemens-Martin

□ Al igual que con el hierro, SE DESARROLLAN LAS TRES GRANDES TIPOLOGÍAS DE PUENTES, pero con un importante salto en las luces:

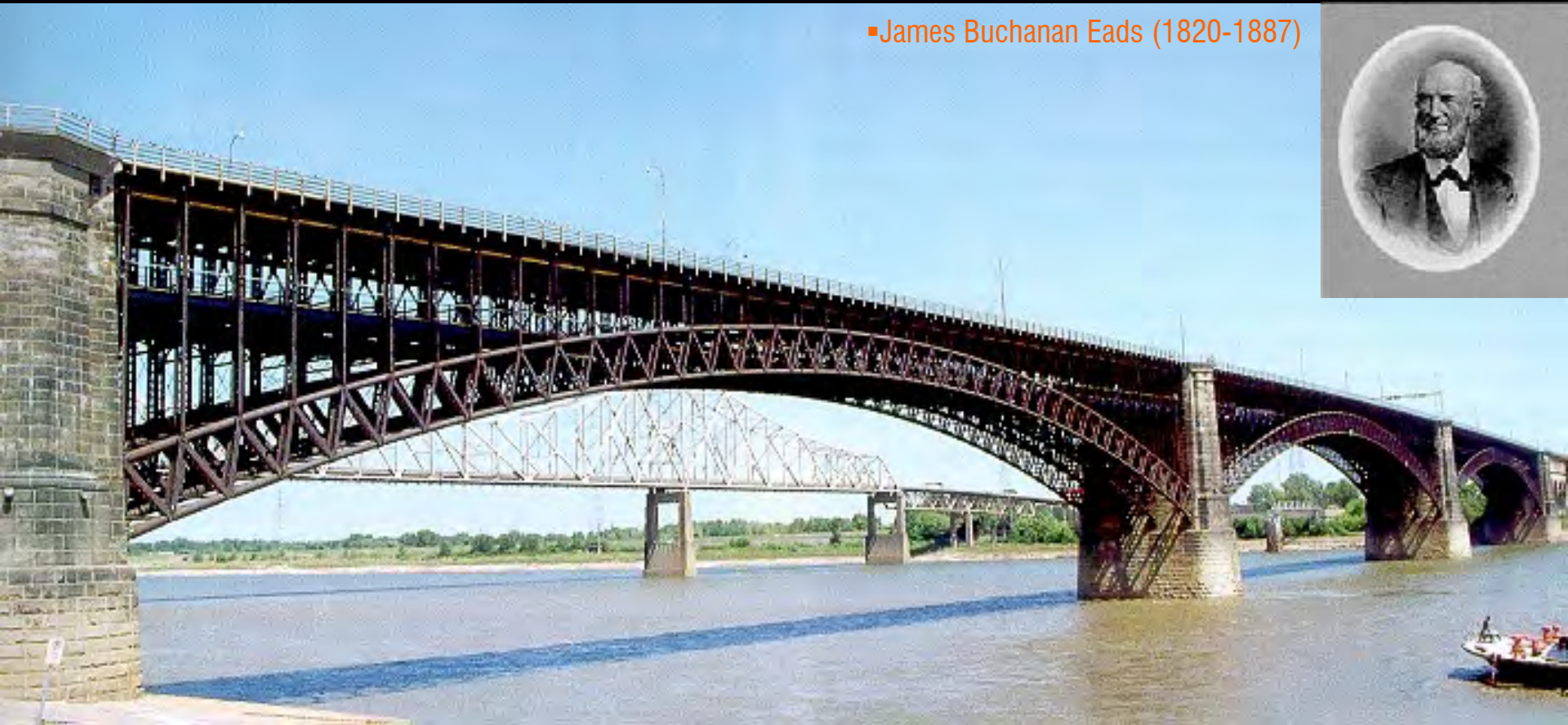
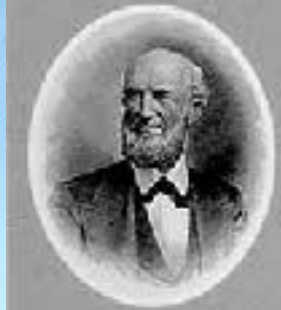
- **Puentes colgantes**
- **Puentes de vigas** (trianguladas, de alma llena o en cajón)
- **Puentes arco**

□ Además, en la segunda mitad del siglo XX aparecen nuevas tipologías:

- **Puentes pórtico de apoyos inclinados**
- **Puentes atirantados**

03 Puentes metálicos

■ James Buchanan Eads (1820-1887)



■ El primer puente de acero: *Puente de San Luís*, sobre el Mississippi (1874, vanos con cuatro arcos de 153+159+153 m)

03 Puentes metálicos



■ El *Puente de Brooklyn*, primer puente colgante construido con alambres de acero por John A. y Washington A. Roebling entre 1869 y 1883, abre una larga lista de obras y records, todavía viva. Su concepción y construcción determinaron la forma de hacer durante décadas

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪ **Cables portantes:** constituyen el elemento principal de todo puente colgante (sistema primario). *Pasan* sobre las torres (sillas de montar) y se *anclan* en contrapesos extremos (macizos de anclaje)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪ **Péndolas:** se anclan a los diafragmas del tablero y se sujetan al cable principal mediante **collares**. Estas dos familias de cables son de acero de alta resistencia



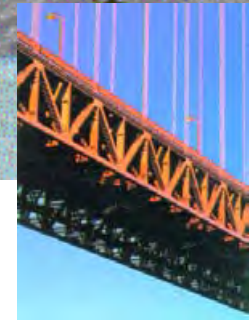
<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪ **Tablero:** los diafragmas transversales se enlazan longitudinalmente mediante **vigas de rigidez** (en general dos, trianguladas, o un cajón). El sistema resultante (entramado o cajón) así como el piso se diseñan en acero estructural

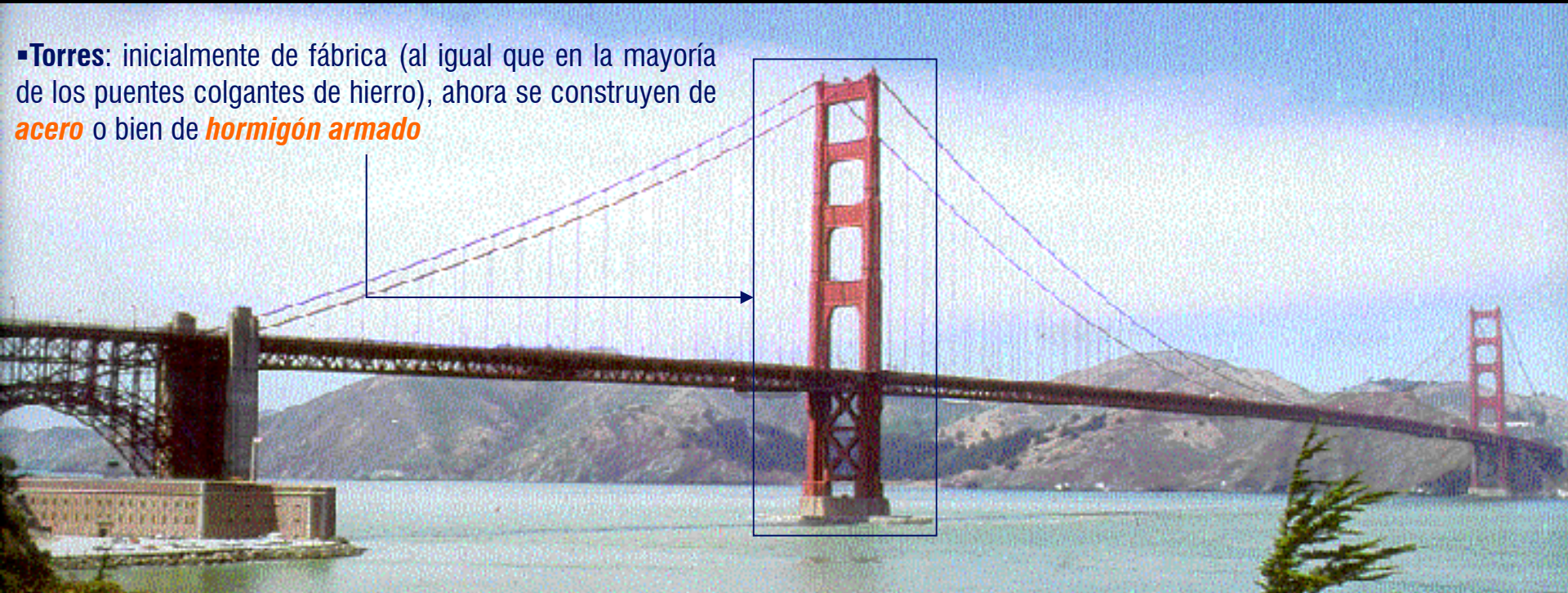


<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

- **Torres:** inicialmente de fábrica (al igual que en la mayoría de los puentes colgantes de hierro), ahora se construyen de **acero** o bien de **hormigón armado**



- El conjunto **sistema primario-tablero** puede construirse completamente, sin necesidad de apoyos intermedios

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



1) Macizo de anclaje e instalaciones de devanado hilo a hilo



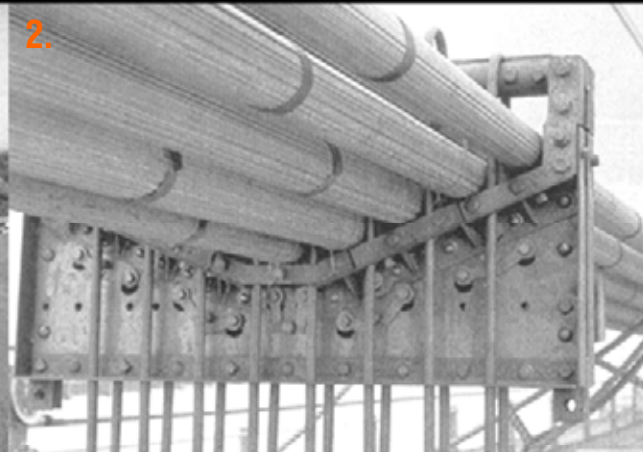
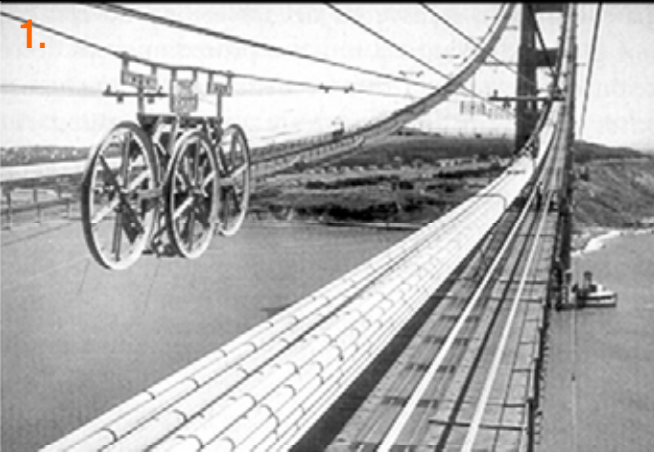
2) Paso de las poleas móviles por las sillas de las torres

■ Montaje de los cables de alambres paralelos (Golden Gate, método Roebling)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



1. Poleas móviles para el devanado de los alambres
2. Ordenación de los cables principales en haces parciales
3. Vista lateral de la pasarela de montaje de los cables principales
4. Gato anular de compactación del haz de alambres. Después, se procederá al enrollado del *spin* de protección

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



•Montaje de los cables del puente Høga Kusten (Suecia, 1997, vano principal de 1210 m)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

☐ Desde 1849 (puente de Wheeling, 332 m) hasta 1979, el mayor vano suspendido ha estado en EEUU (salvo durante el tramo 1890-1929 en el que reinan los cantilever) con un estilo propio bien definido

- **Torres esbeltas de acero** (con riostras o cruces de San Andrés)
- **Viga de rigidez triangulada** (Warren)
- **Cables de alambres paralelos**, apretados transversalmente

1964	Verrazano Narrows (NYC)	1298 m	O.H. Ammann
1937	Golden Gate (SF)	1281 m	J.B. Strauss, C. Ellis y L. Moissief
1957	Mackinack (MI)	1159 m	D.B. Steinman
1931	George Washington (NYC)	1067 m	O.H. Ammann
1950	2º Tacoma Narrows (WA)	853 m	L. Moissief
1936	Transbay (SF)	704 m	Purcell, Woodruff, Modjeski y Moissief

☐ PUNTOS NEURÁLGICOS en el comportamiento de un puente colgante

1. **La estabilidad aerodinámica** (hasta el hundimiento del puente de Tacoma, este fenómeno no se asociaba a la seguridad de los puentes de gran luz)
2. **ELU de equilibrio de los macizos de anclaje** (citaremos el accidente del puente de Inválidos de Navier, en 1826, o bien el colapso del puente sobre el río Peace, en 1957, con $\delta u = 3.7$ m !!!)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

☐ Desde 1820 (Union Bridge) el viento provocó numerosos colapsos de puentes colgantes *modernos*, por sus efectos:

1. **Estáticos** (presión/arrastre)
2. **Dinámicos** (vibración/aleteo)



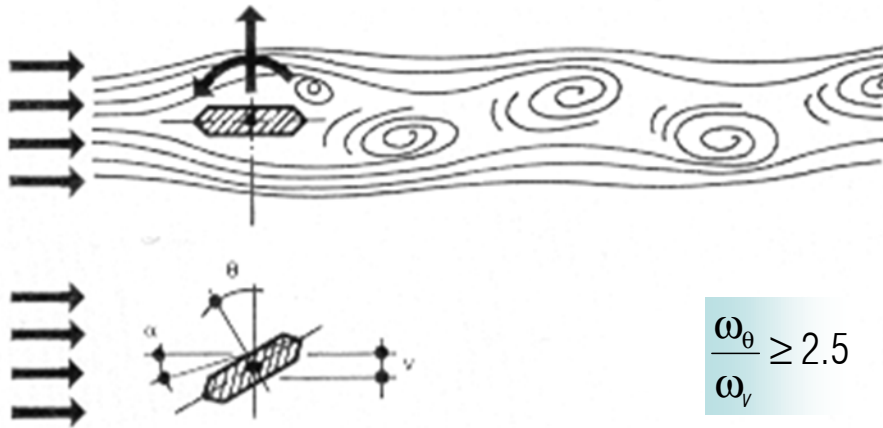
■ Oscilaciones del **puente de Tacoma Narrows** antes de su hundimiento, a los 4 meses de su inauguración (Seattle, Washington, 01/07/1940 a 07/11/1940, 854 m. Movimientos asociados al modo de torsión)

$$p_d = 1.23 \text{ kN/m}^2, \text{ para } v = 45 \text{ m/s}, p_u = 0.20 \text{ kN/m}^2, \text{ para } v = 18 \text{ m/s} \blacksquare$$

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



$$\frac{\omega_{\theta}}{\omega_v} \geq 2.5$$

Velocidad crítica para la resonancia (velocidad de **aleteo** o **“flutter”**):

$$v_f = 2\pi\beta\sqrt{1 - (\omega_v / \omega_{\theta})^2}$$

- $\beta = B_c / B$ es la relación entre la separación de cables y el ancho del tablero
- ω_v es la frecuencia del primer modo de flexión, mientras que ω_{θ} corresponde al primer modo de torsión

03 Puentes metálicos

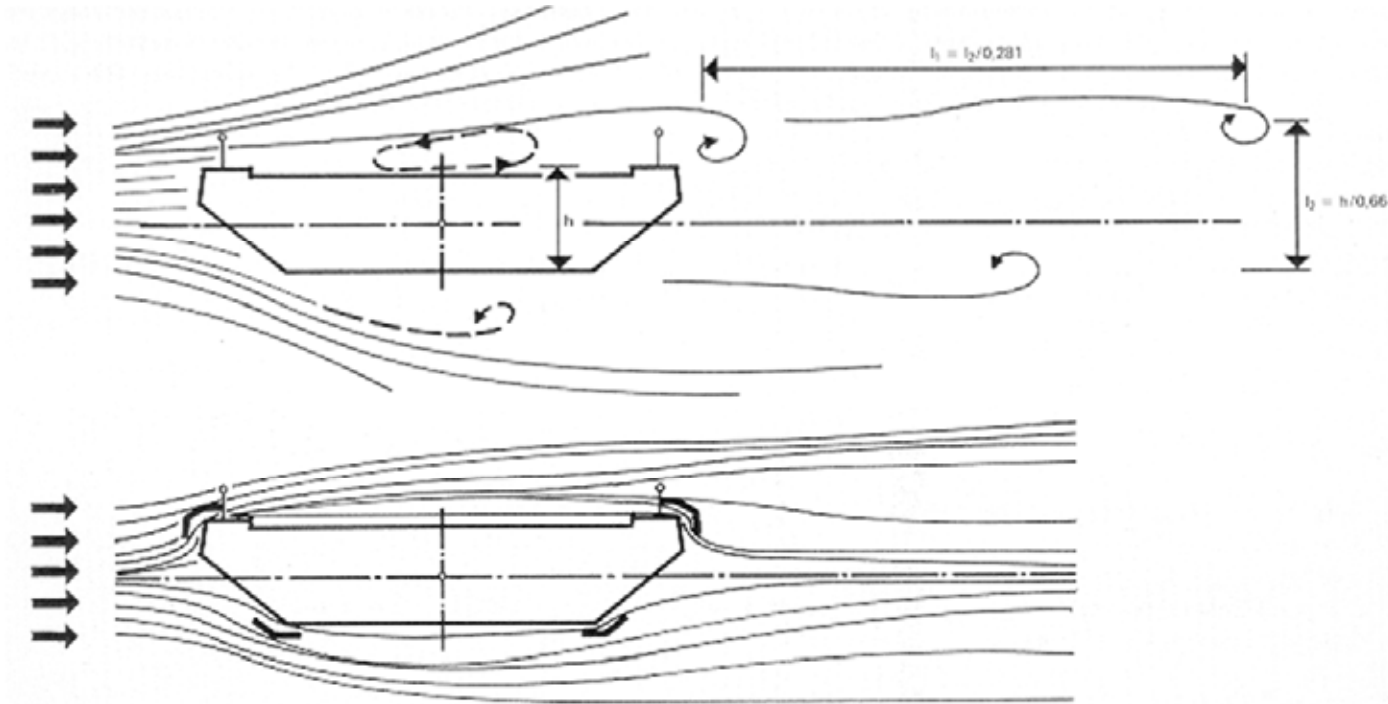
		ω_v	ω_θ	ω_θ/ω_v
Tacoma Narrows	1 ^{er} puente	8.0	10.0	1.25
	2 ^o puente	6.9	-	-
Golden Gate	inicial	5.6	7.0	1.25
	corregido	5.7	11.0	1.95
George Washington	1 ^{er} tablero	6.7	8.2	1.22
	2 ^o tablero	6.7	13.2	1.97
Verrazano Narrows		6.2	11.9	1.92
Firth of Forth (UK)		7.0	21.1	2.78
Tancarville (F)		15.0	62.0	4.13
Severn (UK)		7.7	30.6	3.97

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de Acero>

03 Puentes metálicos

- Aplicación de deflectores aerodinámicos para el control de las turbulencias (técnicas puramente aeronáuticas)



<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



□ Túnel de viento y modelo a “escala” del *punte de Akashi-Kaikyo*

- E: 1/100 , $L \approx 40$ m
- velocidad básica de diseño: 46 m/s
- velocidad máxima de ensayo en el túnel: 80 m/s

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de Acero>

03 Puentes metálicos

- ❑ NUEVAS TENDENCIAS en la construcción de puentes colgantes: aparecen alternativas europeas a la concepción tradicional americana
 - **Torres de hormigón.** Su aplicación se inicia en el puente de Tancarville (1959) y posteriormente los puentes del Pequeño Belt (1970), Humber (1979), Tsing Ma (1997), y Gran Belt (1999, con una altura de 254 m)



<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

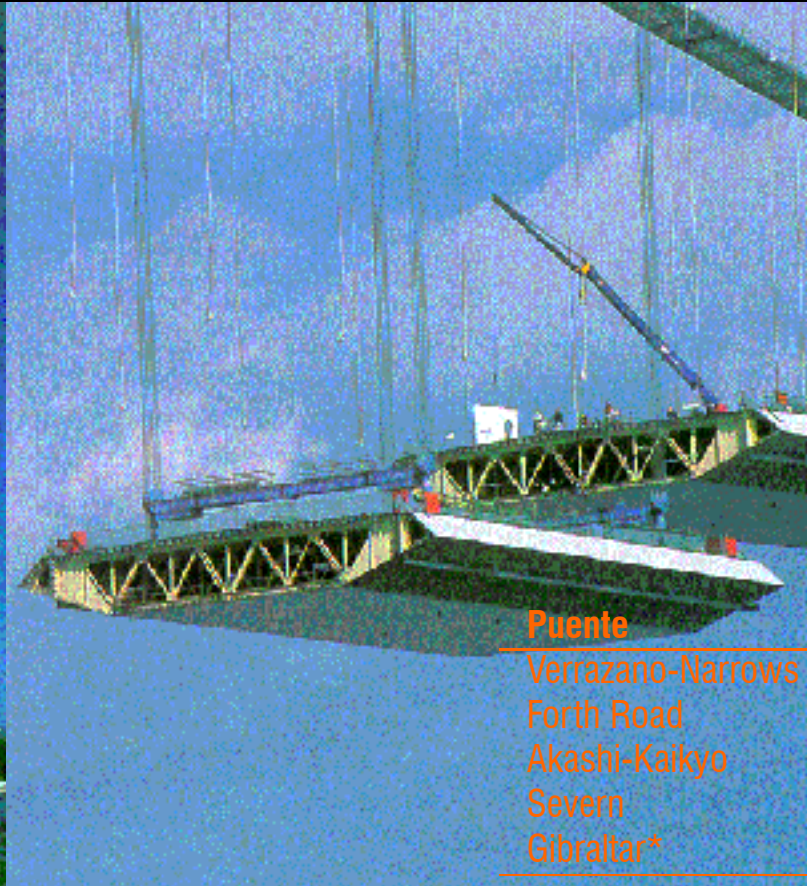
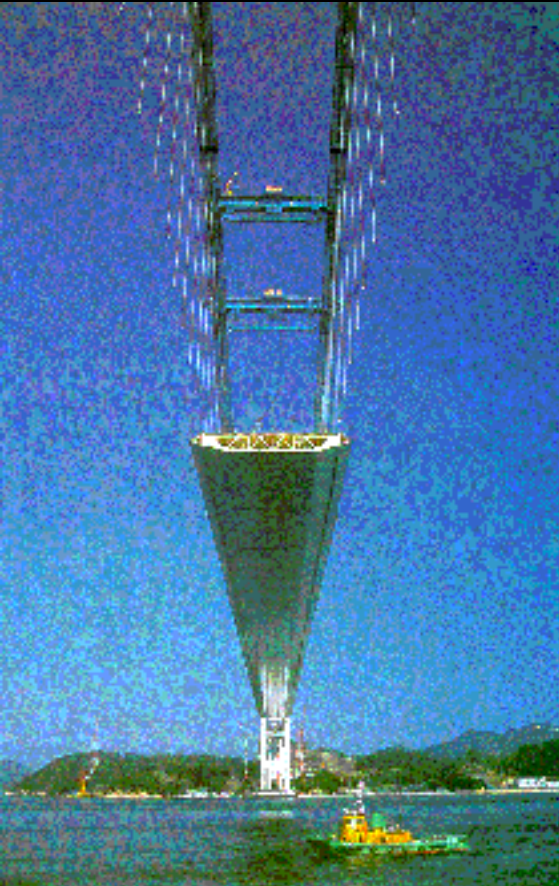
- **Tableros celulares.** Leonhardt propone esta solución en 1950, para el puente sobre el tajo en Lisboa, pero se aplicó por primera vez al puente del **Severn** y posteriormente a los dos puentes del **Bósforo** y al del **Humber**, todos ellos proyectados por Freeman, Fox & Partners
- **Péndolas inclinadas.** Patente de Gilbert Roberts que mejora el amortiguamiento de la estructura (**Severn, Humber**)



<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



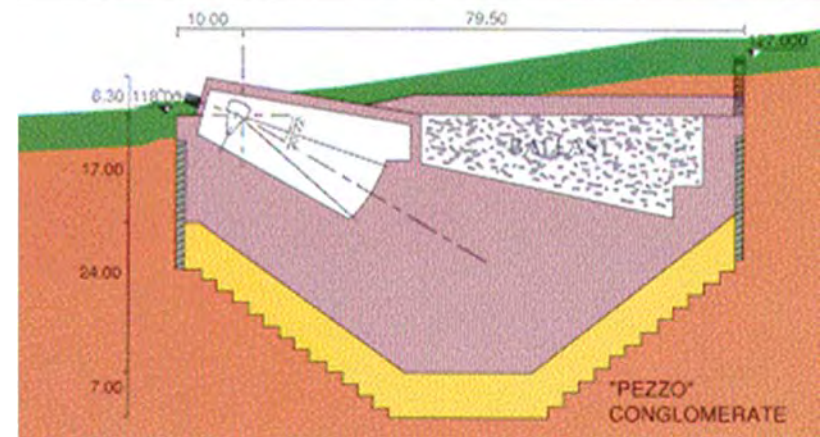
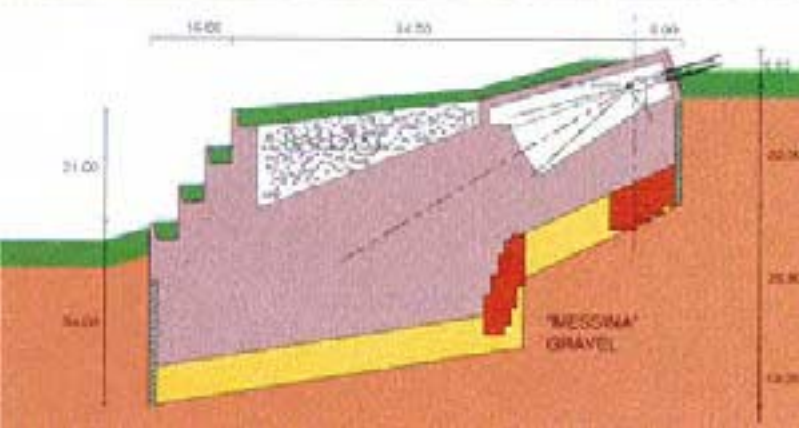
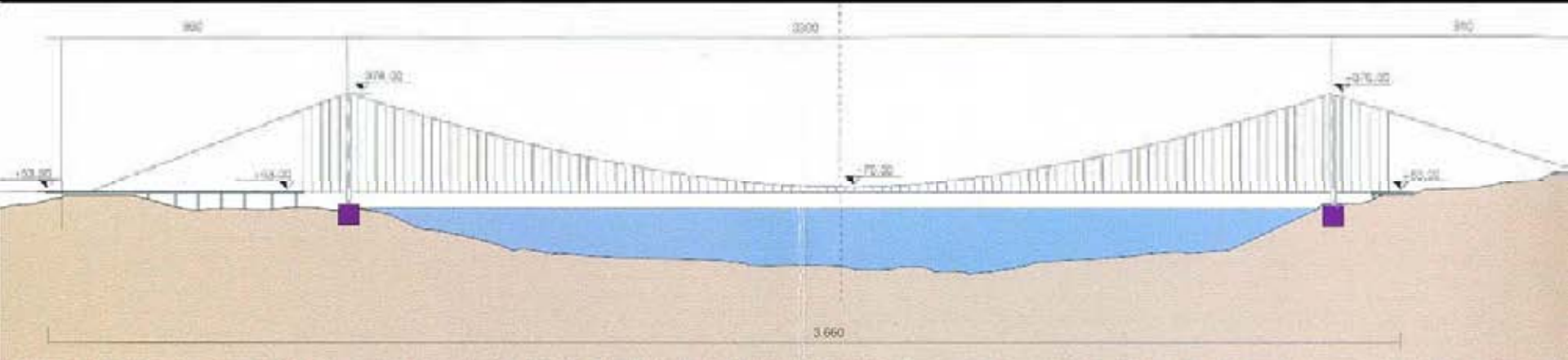
Puente	h (m)	L (m)	h/L
Verrazano-Narrows	7.4	1298	1/175
Forth Road	8.4	1006	1/120
Akashi-Kaikyo	14.0	1990	1/142
Severn	3.0	988	1/330
Gibraltar*	4.5	3500	1/777

▪ Tablero celular de los tres *puentes de Kurishima-Kaikyo*, entre las islas Oshima, Umashima y Shikoku (eje Onomichi-Imabari)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

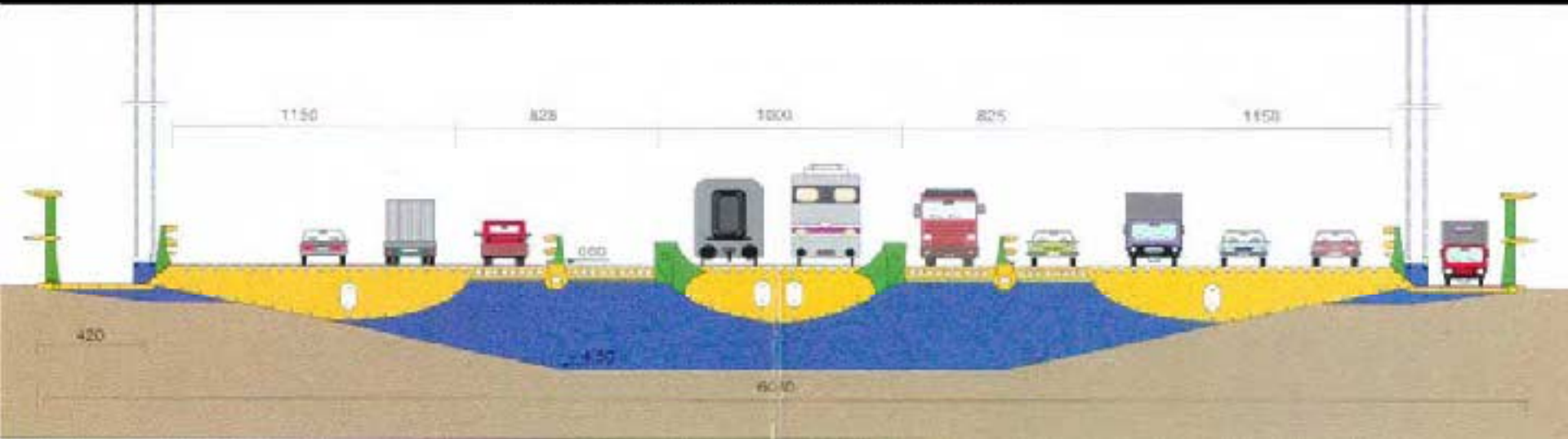


■ Proyecto del *punte del estrecho de Messina*, entre Calabria y Sicilia (vano colgante de 3300 m)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

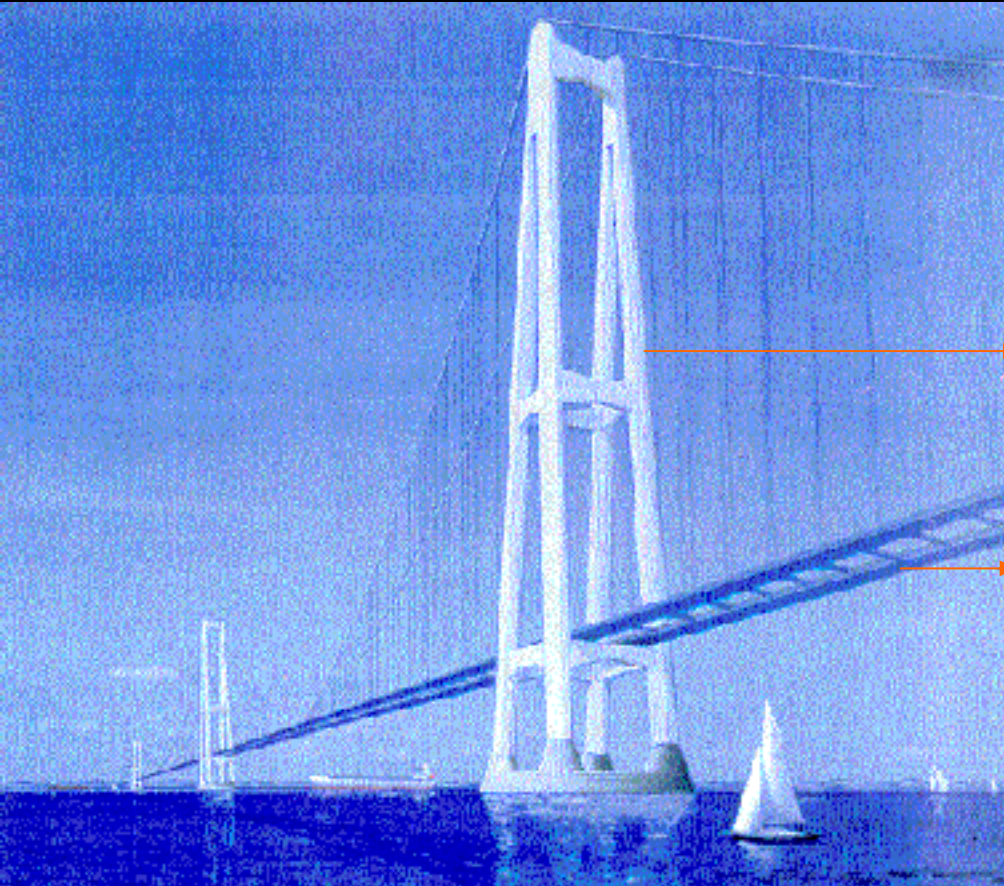


▪ Proyecto del *ponte del estrecho de Messina*, sección transversal

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



▪ Anteproyecto del *puente sobre el estrecho de Gibraltar*, entre España y Marruecos (3 vanos de 3500 m. Longitud total: 28 km, de los cuales 14 van colgados) CFCSL

▪ **Torres rígidas**, de 800 m de altura total (420 m sobre tablero, 80 m sobre el nivel del mar y 300 m sumergidos)

▪ **Doble tablero celular** sobre riostras transversales



<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

Puente	situación	país	año	luz
Puente de Gibraltar	estrecho de Gibraltar	España-Marruecos	*	3×3500 m
Estrecho de Messina	Calabria-Sicilia	Italia	*	3300 m
Akashi-Kaikyo	Kobe-Naruto	Japón	1999	1990 m
Gran Belt	Fünen-Zealand	Dinamarca	1999	1624 m
Humber	Hull	Inglaterra	1979	1410 m
Jiangrin	río Yangtze	China	1998	1385 m
Tsing Ma	Hong Kong	China	1997	1377 m
Höga Kusten	Veda	Suecia	1997	1210 m
Minami Bisan-Seto	Kojima-Sakaide	Japón	1988	1100 m
Fatih Sultan Mehmet	Estambul	Turquía	1988	1090 m
Bósforo I	Estambul	Turquía	1973	1074 m
Kurushima III	Onomichi-Imabari	Japón	1999	1030 m
Kurushima II	Onomichi-Imabari	Japón	1999	1020 m
Ponte 25 de Abril	Lisboa	Portugal	1966	1013 m
Forth Road	Queensferry	Escocia	1964	1006 m
Severn	Bristol	Inglaterra	1966	988 m

■Grandes puentes colgantes contemporáneos

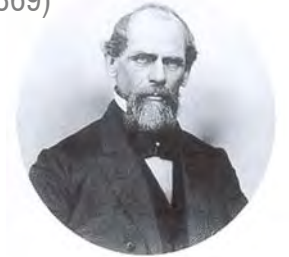
<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪ John A. Roebling (1806-1869)



▪ Washington A. Roebling (1837-1926)



▪ Emily Warren Roebling (1843-1903)



▪ Obras: el *punte de Brooklyn*, sobre el East river (NYC, 1883, 468 m, J.A. & W.A. Roebling)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *puente de Brooklyn*, sobre el East river (vista nocturna y detalle de collares y péndolas)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■El *punte de Brooklyn* (óleo de Richard Estes, 1932)



■Vistas en octubre de 1996

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■ Othmar H. Ammann
(1879-1965)

■ Obras: el *punte George Washington*, sobre el Hudson (Manhattan Norte, 1931, vano principal de 1031 m, O.H. Ammann)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *puente George Washington*, sobre el Hudson (vista lateral)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *puente de Bronx-Whitestone*, sobre el East river (NYC, 1939, vano principal de 701 m, O.H. Ammann)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *puente de Verrazano Narrows* (entrada al puerto de NYC, 1964, vano principal de 1298 m, O.H. Ammann)

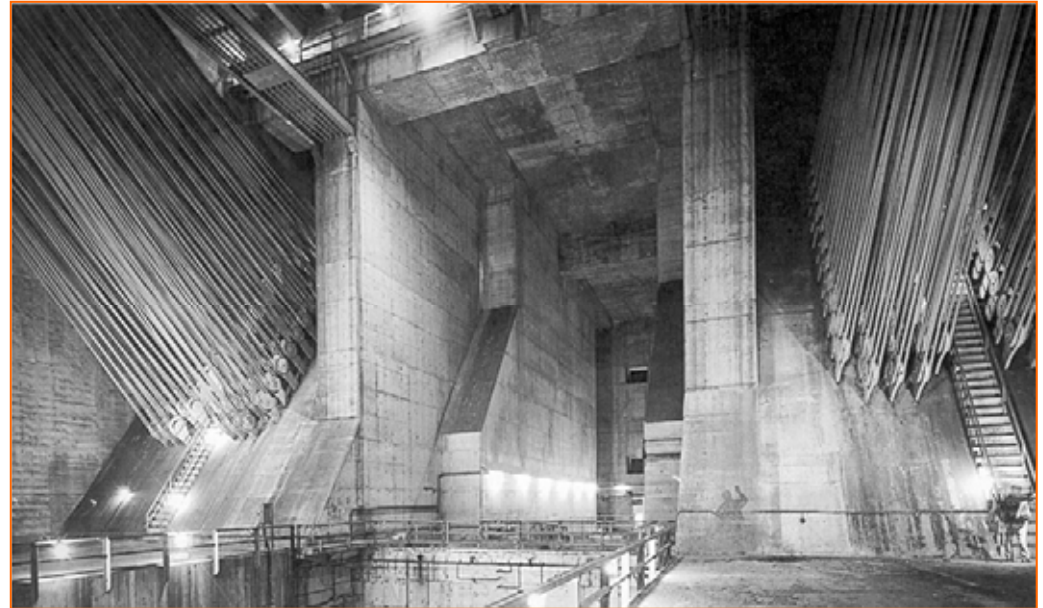
<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



- Al entrar en la galería de anclaje, se abren los haces de los cuatro cables portantes, anclando individualmente mediante bielas de ojales cada uno de los alambres

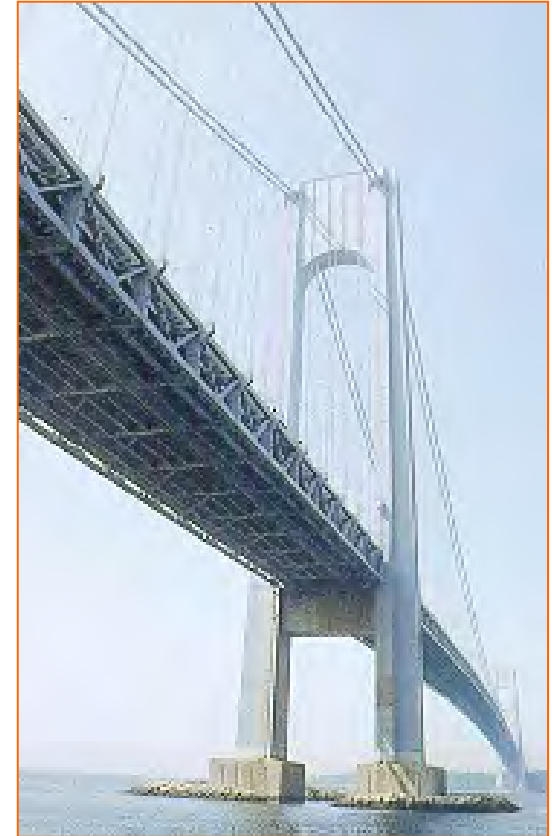
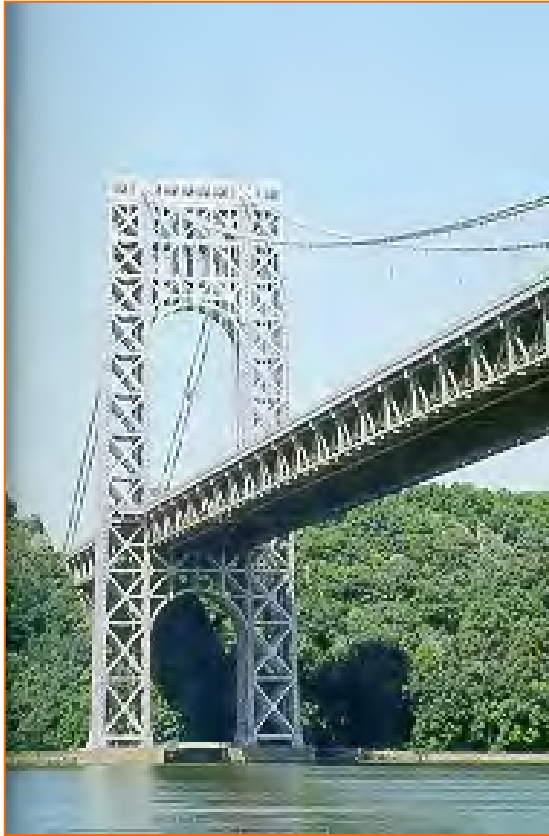


- Obras: el *punte George Washington* (vista del pilono e interior del macizo de anclaje)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪ Pilonos diseñados por O.H. Ammann (George Washington, Bronx-Whitestone y Verrazano Narrows)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



■ Joseph B. Strauss (1870-1938)

■ Obras: el *puente Golden Gate* (San Francisco, 1937, 1280 m, record de vano mundial hasta 1964, J.B. Strauss)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪ Acceso al *Golden Gate* desde San Francisco (lado sur, Presidio)



▪ Vista oblicua de la viga de rigidez



▪ El *Golden Gate* desde el tablero, vista de los cables y de las péndolas

▪ Obras: el *ponte Golden Gate* (vistas generales)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *punte Golden Gate* (vistas de las torres y detalles del roblonado y de los forros de las riostras y cartelas)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *punte Golden Gate* (detalles de la viga de rigidez y del anclaje de las péndolas)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *puente Transbay* (San Francisco-Oakland, 1936, vanos máximos de 704 m, Purcell, Modjeski & Moisseiff)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■El *Baybridge* desde los *piers* de San Francisco



■Pila-estribo para apoyo de la viga de rigidez y del viaducto de acceso al *Baybridge*



■Vista del *Baybridge* desde el distrito financiero de San Francisco

■Obras: el *punte Transbay*, o *Baybridge* (vistas desde San Francisco)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪David Barnard Steinman (1886-1960)



▪Obras: *puente St John*, US Route 30 sobre el río Willamette en Portland, Oregón (1931, 368 m, H. Robinson y D.B. Steinman)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *Forth Road Bridge* (Escocia, 1964, 1006 m, Mott, Hay & Anderson)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *Ponte 25 de Abril*, sobre el estuario del Tajo (Lisboa, 1966, 1013 m, Steinman & Brinton)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



■Obras: el **Severn Bridge** (cerca de Bristol, 1966, 988 m, Freeman, Fox & Partners)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos

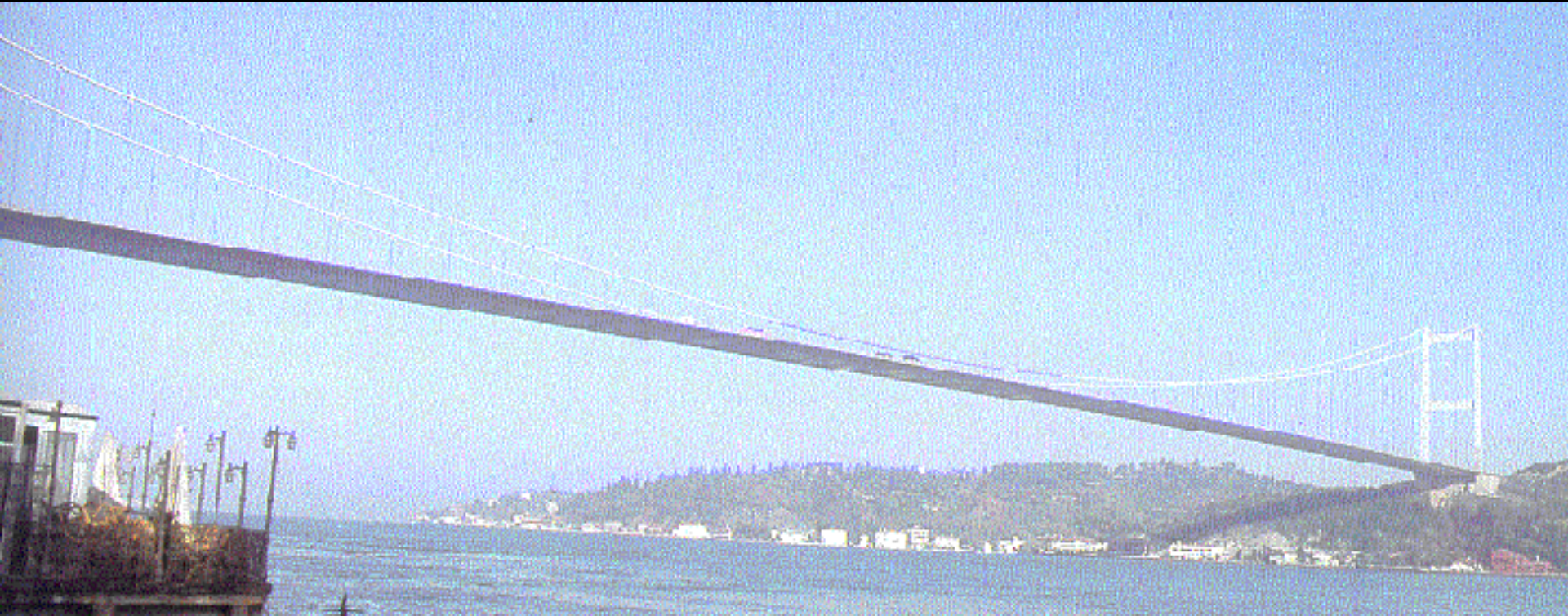


▪Obras: los *puentes sobre el Bósforo* (Estambul, 1973 y 1988, 1074 y 1090 m, Freeman, Fox & Partners)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪Obras: los *puentes sobre el Bósforo* (Estambul, 1973 y 1988, 1074 y 1090 m, Freeman, Fox & Partners)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪Obras: el *puente del Humber* (Hull, 1979, 1410 m, Freeman, Fox & Part.)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *puente Storebelt* (Dinamarca, 1999, 1624 m, Cowiconsult)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



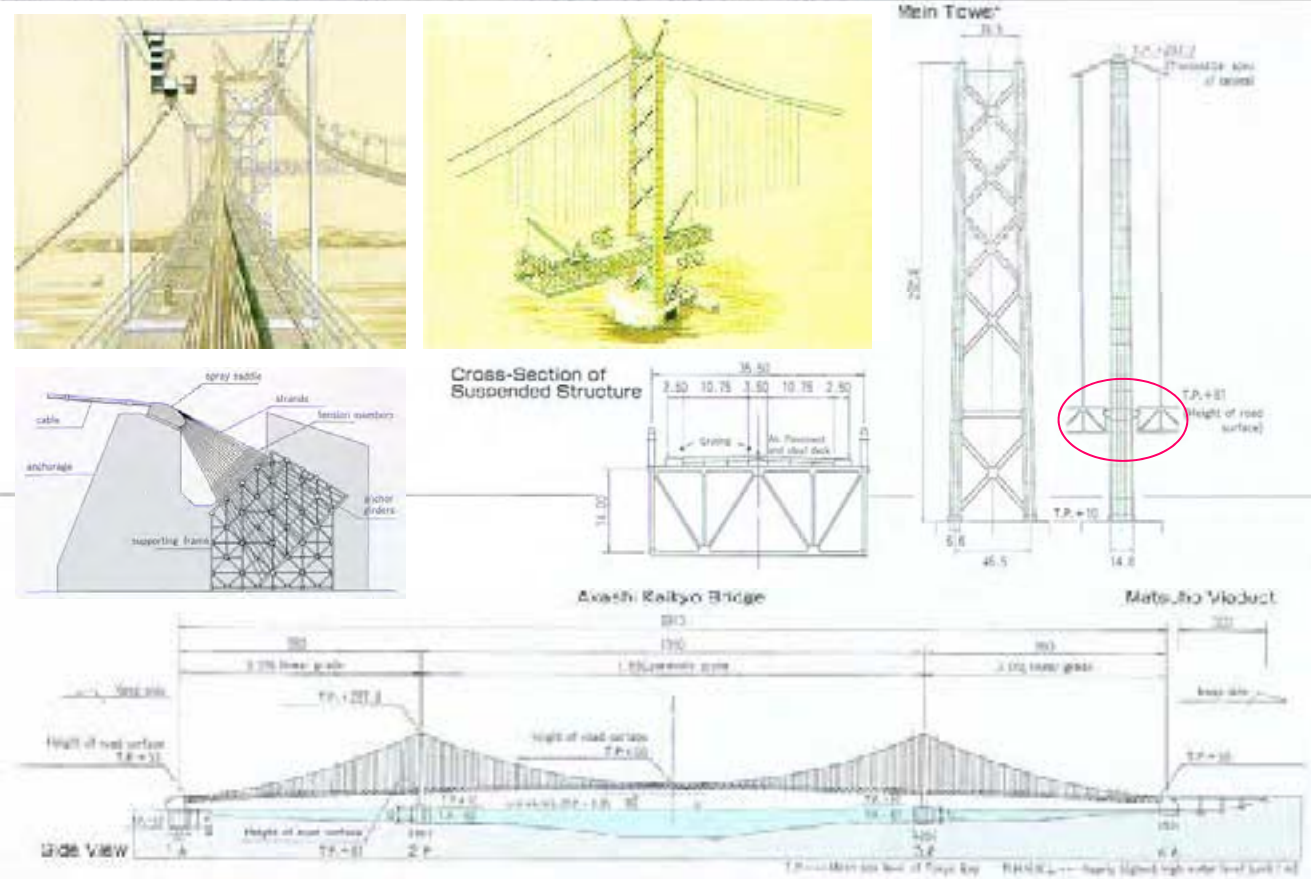
- Obras: el *puente Storebelt* (inicio de la construcción del tramo suspendido)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos

- Obras: el *Akashi-Kaikyo bridge*, entre Kobe y la isla de Awaji (panel general)



<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



- Obras: el *Akashi-Kaikyo bridge* (construcción; durante el terremoto de 1995 una de las islas de cimentación sufrió un desplazamiento de 1 m)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■Obras: el *Akashi-Kaikyo bridge* (1999, vano central de 1990 m)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de Acero>

03 Puentes metálicos



▀Obras: el *Akashi-Kaikyo bridge* (vista nocturna)

<3.3.1 Puentes colgantes>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos

❑ CAMPO DE APLICACIÓN: es la solución más usual para luces “*moderadas*” resueltas en acero

❑ DISPOSICIONES: en *tramos simples* o *continuos*

1) ALMA LLENA: pueden ser de canto constante o variable. Se disponen bajo calzada, múltiples o dos laterales (sección en π).

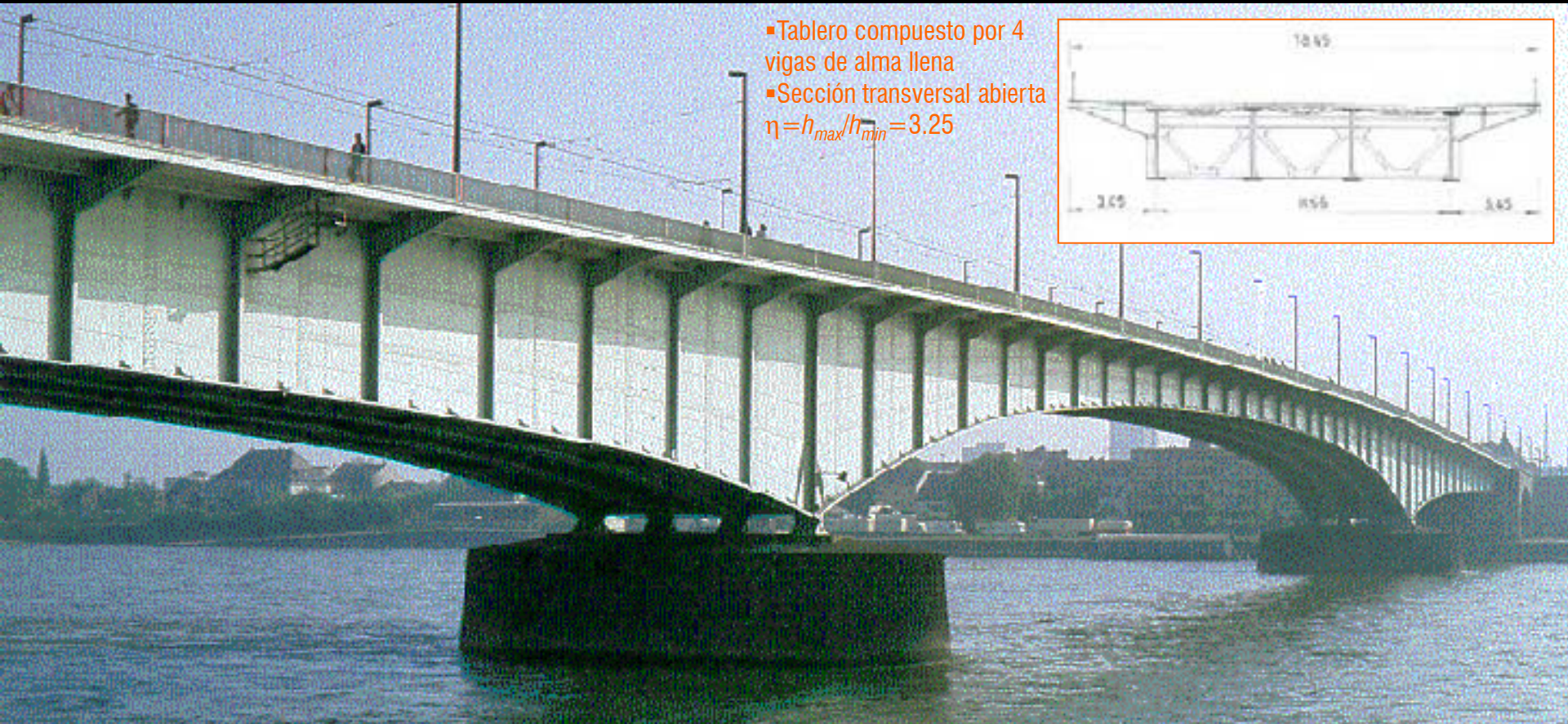
- *Geometría sencilla, luego coste de ejecución ↓*
- *Mantenimiento razonable*
- *Bajo aprovechamiento resistente de las almas*
- *Estética aceptable*



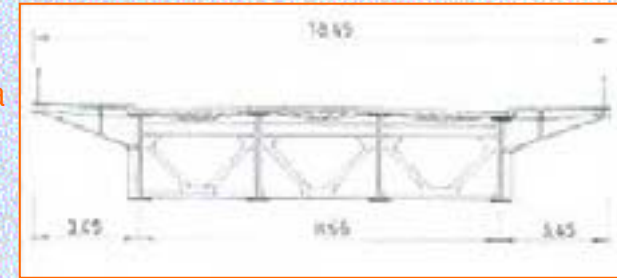
<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



- Tablero compuesto por 4 vigas de alma llena
- Sección transversal abierta
 $\eta = h_{max}/h_{min} = 3.25$

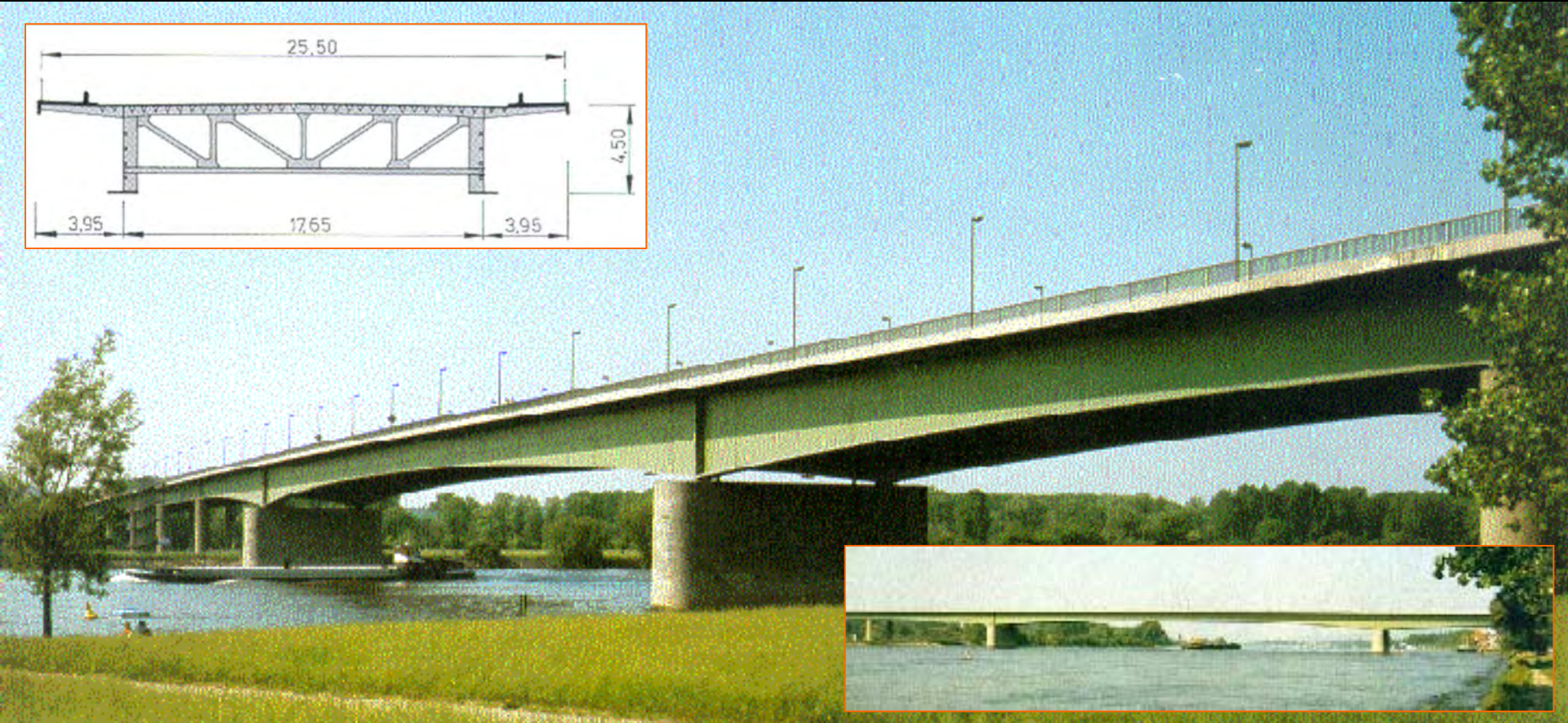
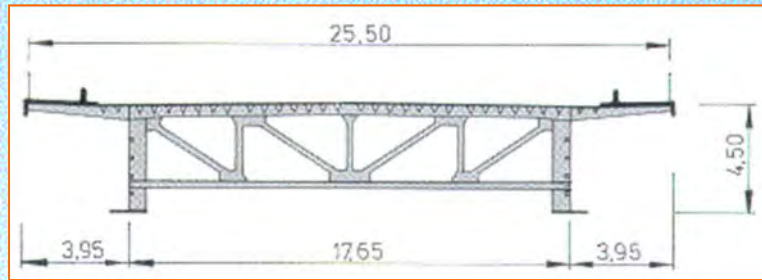


▪ Obras: el *punte Beuel*, en Bonn sobre el Rin (1949, vanos de 99+196+99 m, A. Kramer)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■Obras: el *punte Schierstein*, sobre el Rin (1961, vano principal de 205 m, Leonhardt & Andrä)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

- 2) TRIANGULADAS: pueden ser de canto constante o variable, dispuestas bajo calzada, a media altura (sección en H) o bien por encima del tablero.
- Buen aprovechamiento del material
 - Mantenimiento costoso
 - Estética singular (*industrial*)



<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



- Los *puentes del Forth*, para ferrocarril (cantilever de 1890) y carretera (colgante de 1964)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 Puentes de Acero>

03 Puentes metálicos



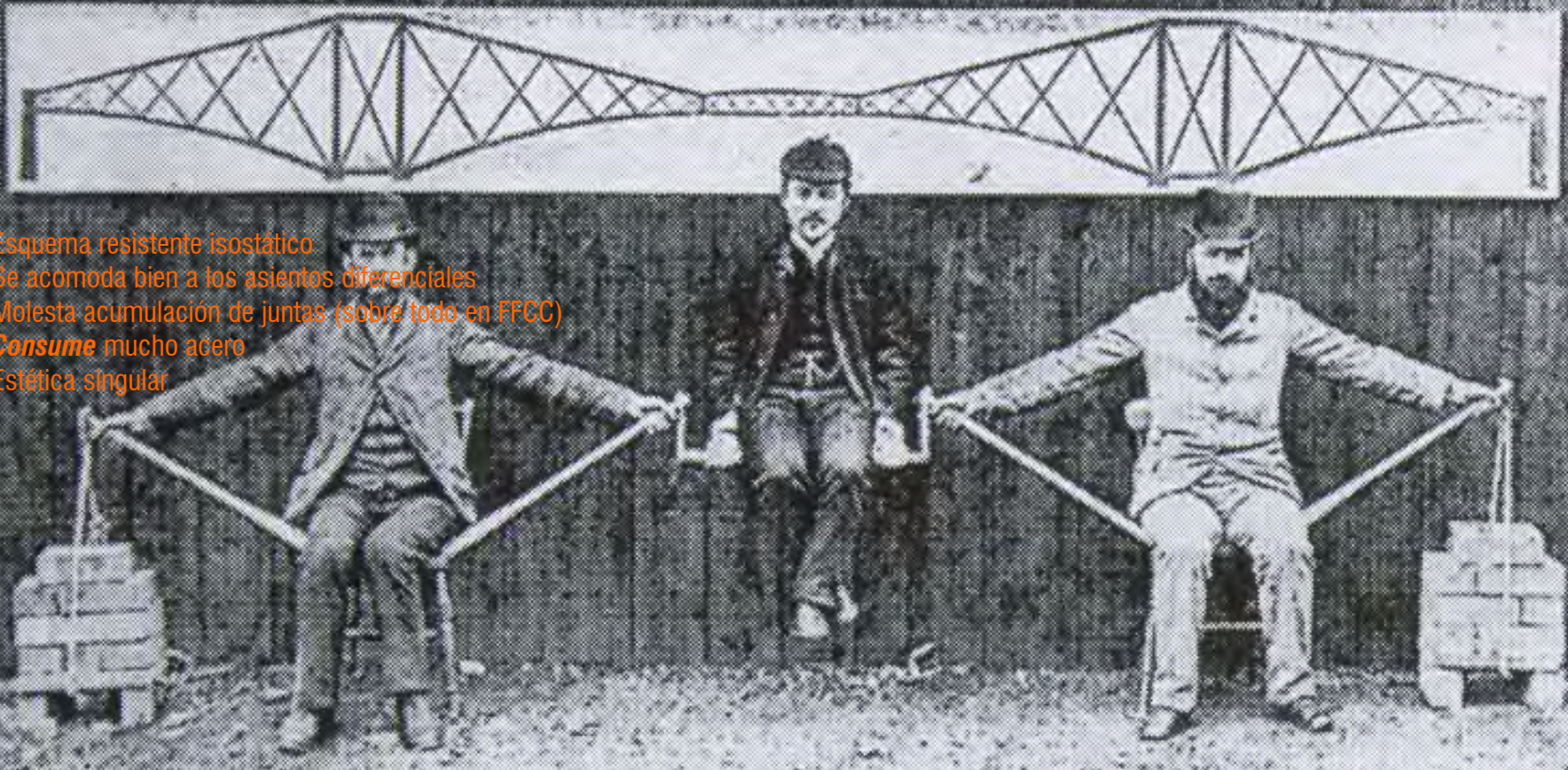
▪Obras: el *puente del Firth of Forth* (FC en Escocia, 1890, cantilever de acero de 521 m, Baker & Fowler)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

- Esquema resistente isostático
- Se acomoda bien a los asientos diferenciales
- Molesta acumulación de juntas (sobre todo en FFCC)
- **Consume** mucho acero
- Estética singular

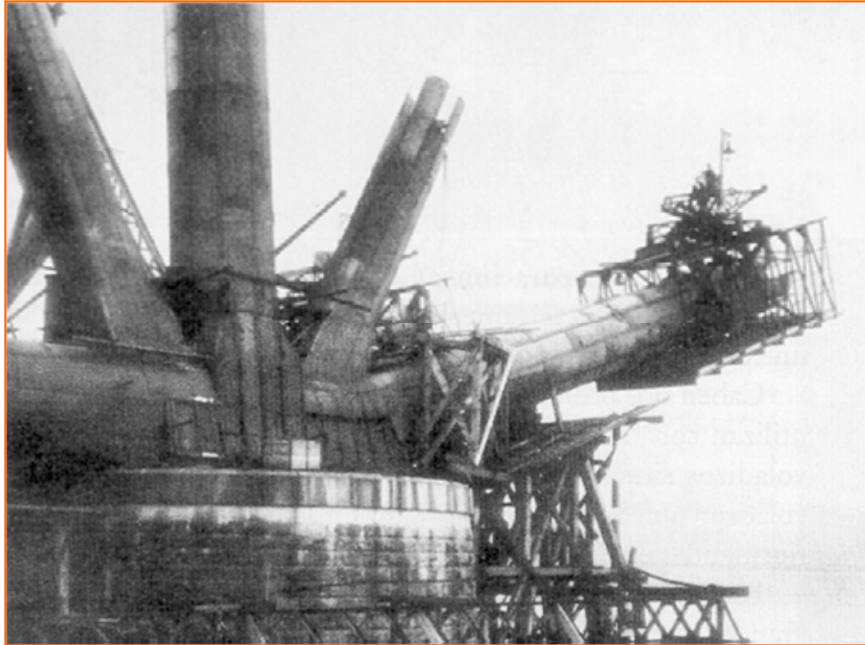


▪ *Baker & Fowler* ilustrando el esquema estático del puente del Firth of Forth

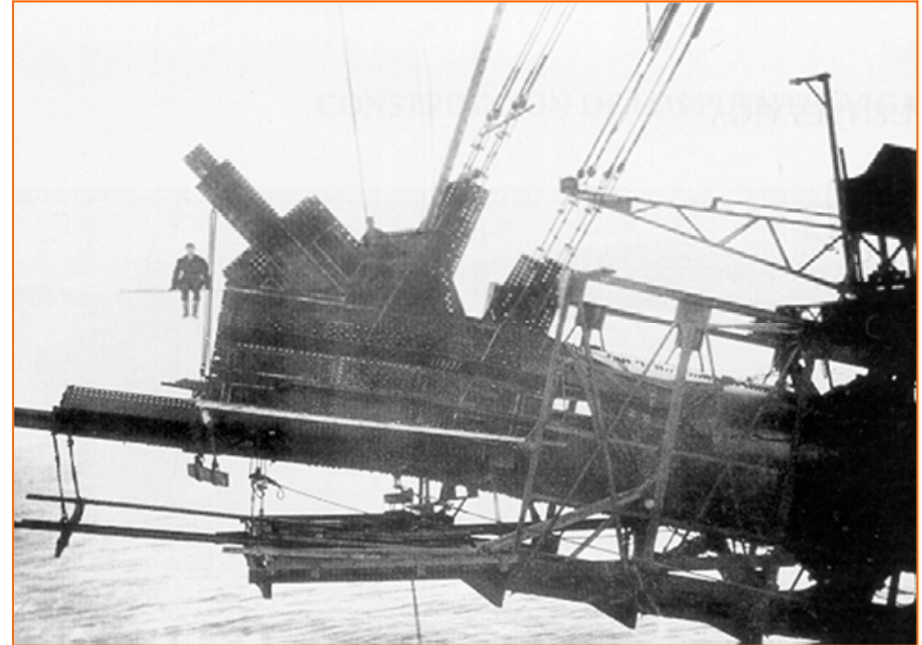
<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪nudo en estrella sobre apoyo

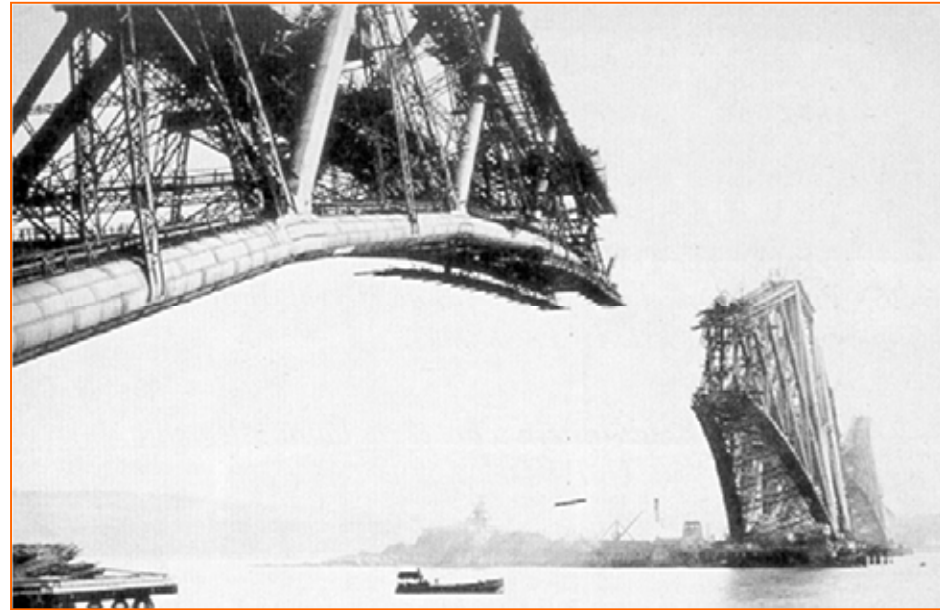
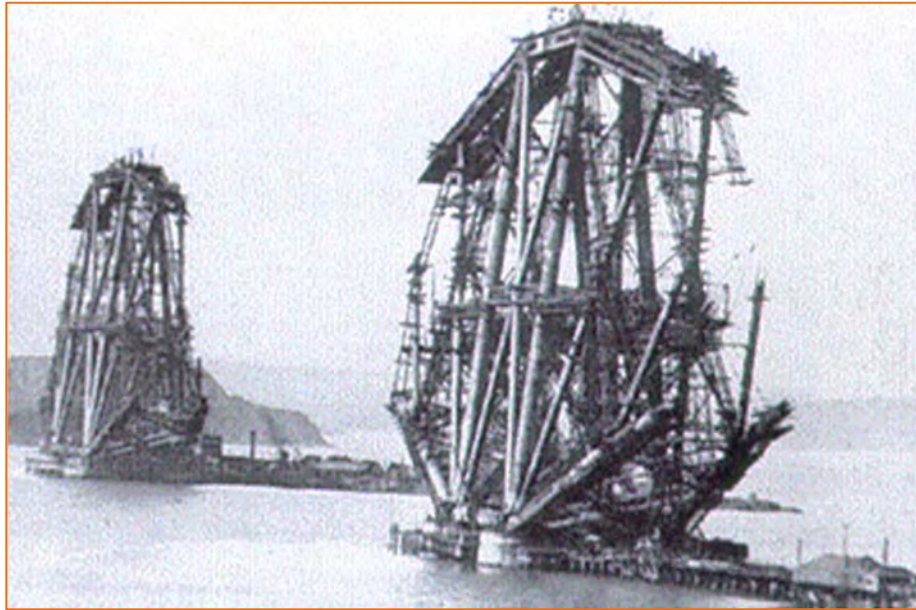


▪nudo del cordón comprimido, con los taladros de los roblones

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

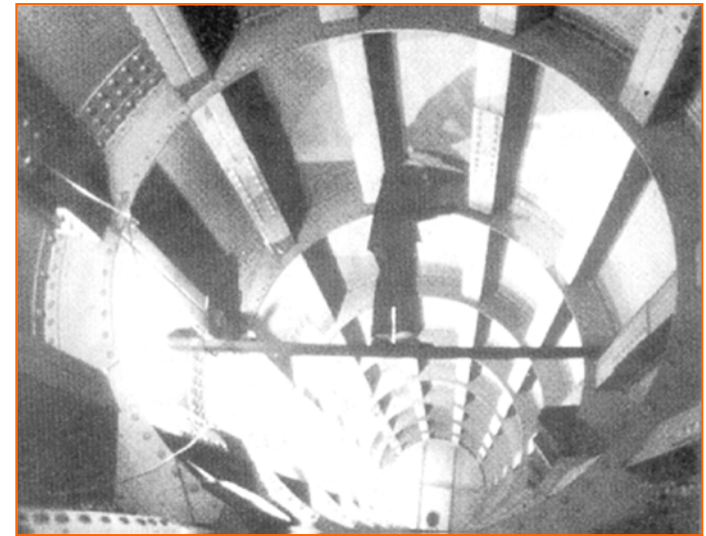
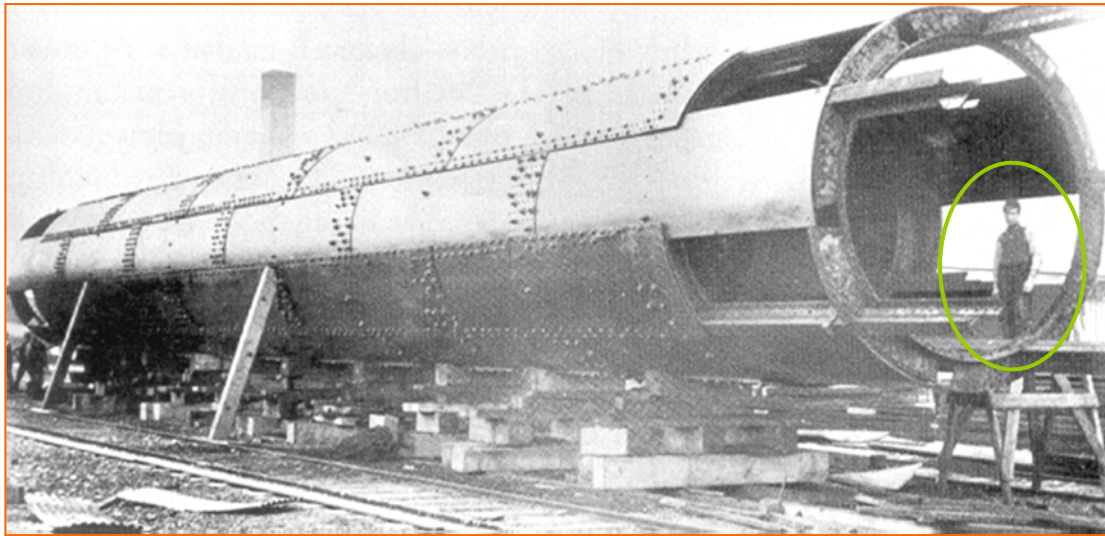


▀ Obras: el *punte del Firth of Forth* (diferentes fases de la construcción de los voladizos)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

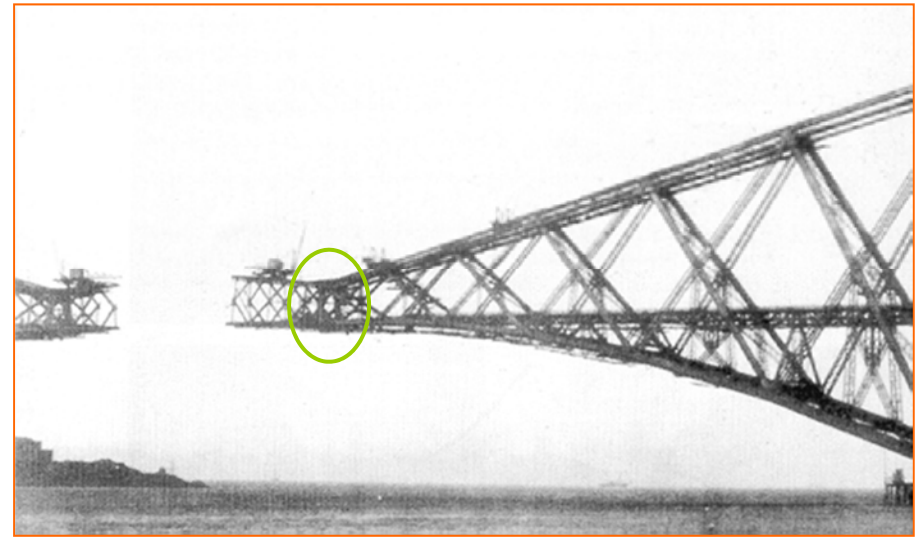
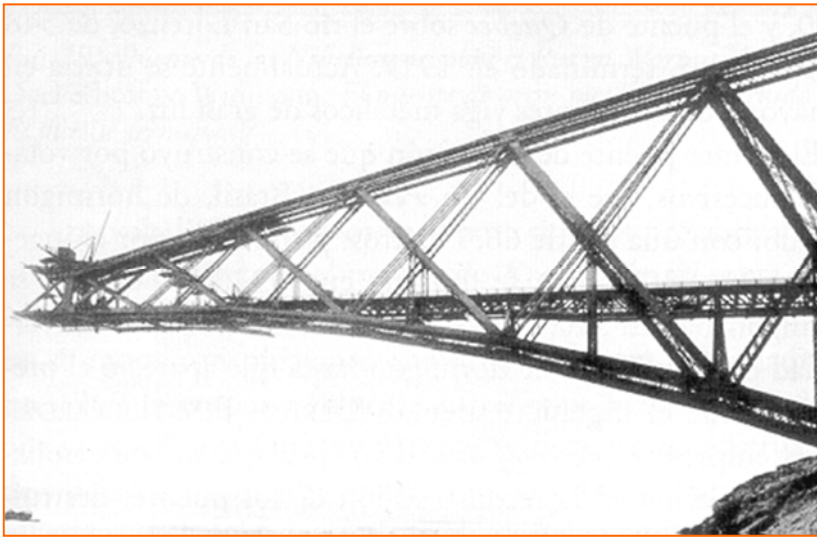


■Obras: el *punte del Firth of Forth* (estructura de los tubos para los elementos comprimidos del puente)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■Obras: el *ponte del Firth of Forth* (construcción de la viga central en voladizo, bloqueando la junta durante todo el avance)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪El *punte de Quebec*, sobre el San Lorenzo (cantilever finalizado en 1917, 548 m, Cooper & Modjesky)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 Puentes de Acero>

03 Puentes metálicos



(1)

(2)

- (1) Primer accidente del *puente de Quebec*: **pandeo del cordón inferior del vano en voladizo**
- (2) Segundo accidente con otro diseño: **caída del tramo central**. Balance final: 95 víctimas

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪El *punte de Queensborough* (óleo de Edward Hopper, 1913)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos

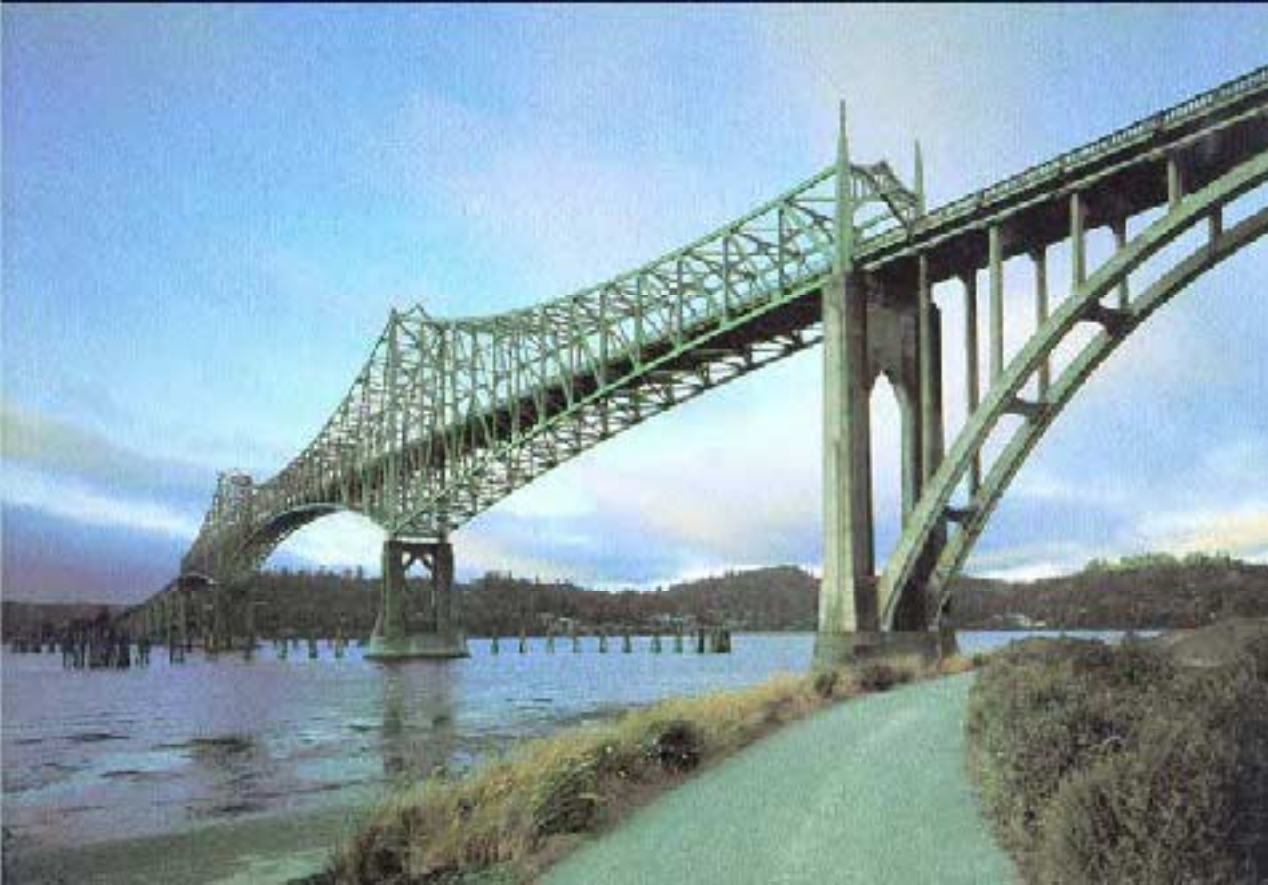


■Obras: el *punte de Queensborough*, sobre el East River (calle 59 de Nueva York, 1908 , Gustav Lidenthal, vanos de 124.8+360.5+192+300+140 m)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪El *punte de Coos Bay* (North Bend, Oregon, 1936, US Route 101, Conde B. Mc Cullough)



▪Conde Balcom Mc Cullough
(1887-1946)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪El *punte de Nautenbach*, sobre el río Main (1994, 208 m, Leonhardt & Andrä)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 Puentes de acero>

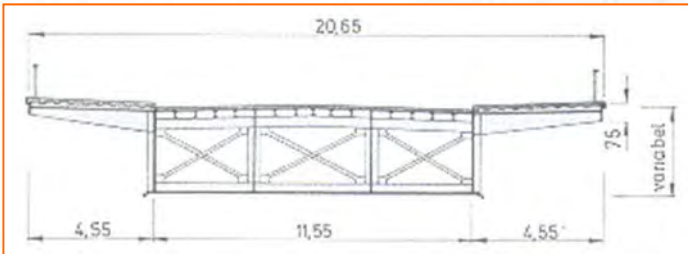
03 Puentes metálicos

- 3) Puentes EN CAJÓN: utilizada por primera vez en el puente Britannia, esta morfología posee numerosas ventajas.
- Buena estética
 - Bajo mantenimiento
 - Mayores esbelteces
 - Excelente comportamiento torsional, resultando particularmente adecuada para trazados curvos o secciones anchas con apoyo central
 - Rigidización compleja y cara

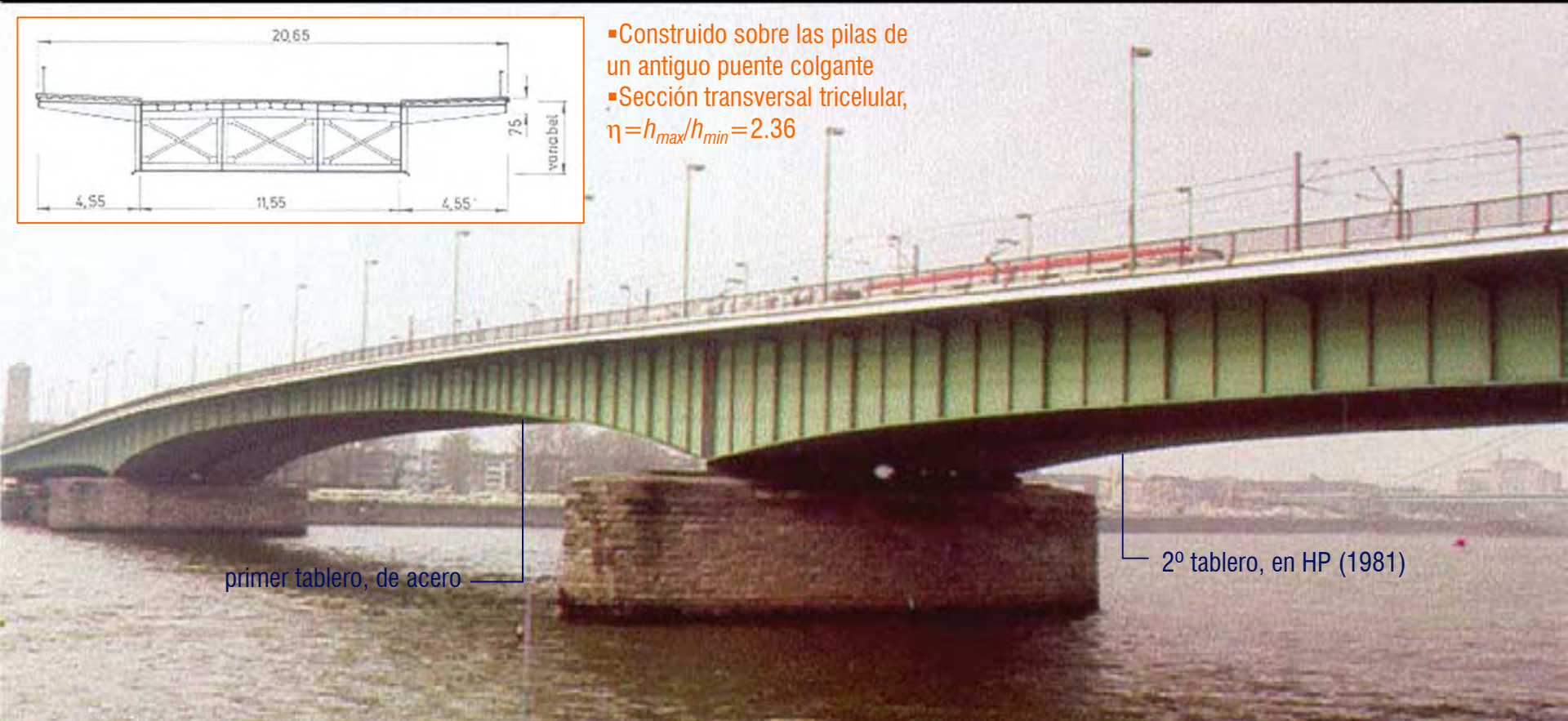


Aspecto general de esta tipología

03 Puentes metálicos



- Construido sobre las pilas de un antiguo puente colgante
- Sección transversal tricelular,
 $\eta = h_{max}/h_{min} = 2.36$

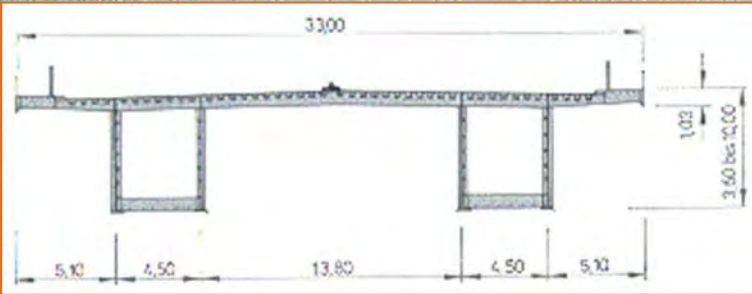


▪ Obras: el *punte Deutz*, en Colonia sobre el Rin (1948, vanos de 132+184+121 m, Leonhardt & Andrä. G. Lohmer)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



- Sección formada por dos cajones laterales
- esbeltos de 25.9 a 42.5,
 $\eta = h_{max}/h_{min} = 2.08$



▪ Obras: el *punte Zoo*, en Colonia sobre el Rin (1962, vanos principales de 259+145 m, Leonhardt & Andrä. G. Lohmer)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

• Sección formada por dos cajones laterales, análoga a la del puente del Zoo



▪ Obras: el *puente Sur*, en Bonn sobre el Rin (1967, vanos de 125+230+125 m, G. Lohmer)

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

❑ CAMPO DE APLICACIÓN: el arco de acero parecía adecuado para las *grandes luces*, intercalándose entre las vigas de acero y el puente colgante, pero se vio desplazado a finales de los 50 por los atirantados, además de tener que competir con los arcos de hormigón, para los cuales se fueron desarrollando procedimientos constructivos más económicos

❑ DISPOSICIONES:

- Estos puentes pueden ser de tablero *superior*, *intermedio* o *inferior*
- El arco puede diseñarse *de alma llena*, *tubular* o *triangulado*

<3.3.2 Puentes viga>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

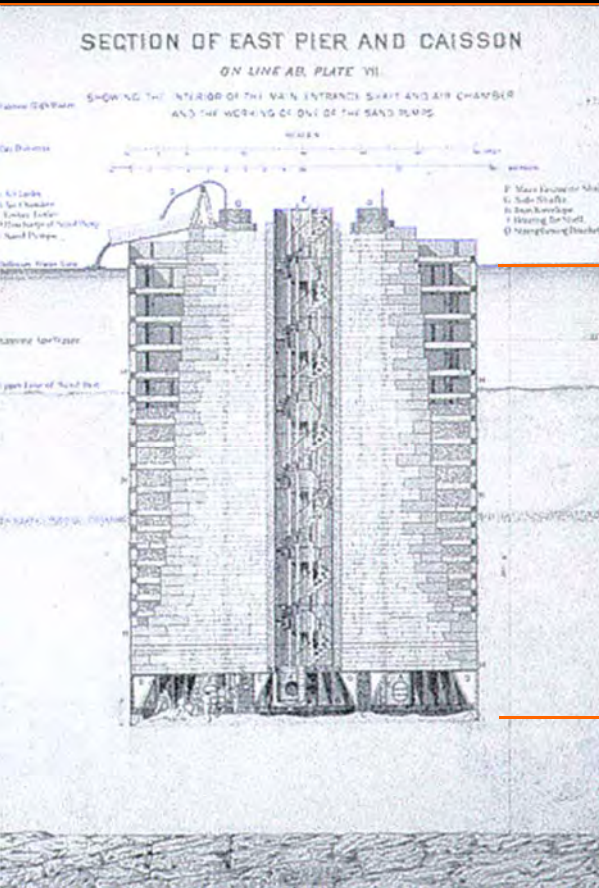


■Obras: el *punte de San Luís*, sobre el Mississippi (1874, vanos formados por cuatro arcos de acero de 153+159+153 m, James B. Eads)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



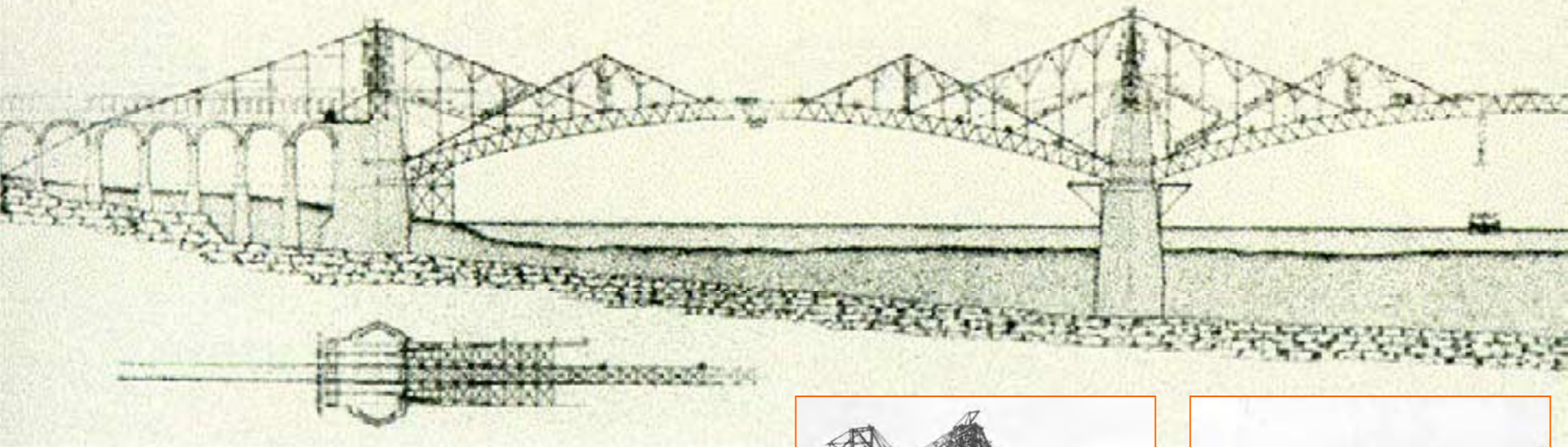
- Estos cajones se hincan en el terreno, pero al ser campanas estancas, se puede insuflar aire comprimido en su interior a mayor presión que el agua exterior. Esto permite expulsar el agua y así trabajar en seco. El desconocimiento de los efectos de los ciclos de compresión y descompresión acarrió numerosas muertes en sus primeras aplicaciones

- Sección de un cajón de aire comprimido empleado para la cimentación del puente de San Luis (1867-1874)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪ OBRAS: *punte de San Luís*, sobre el Mississippi (construcción por voladizos sucesivos atirantados)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos

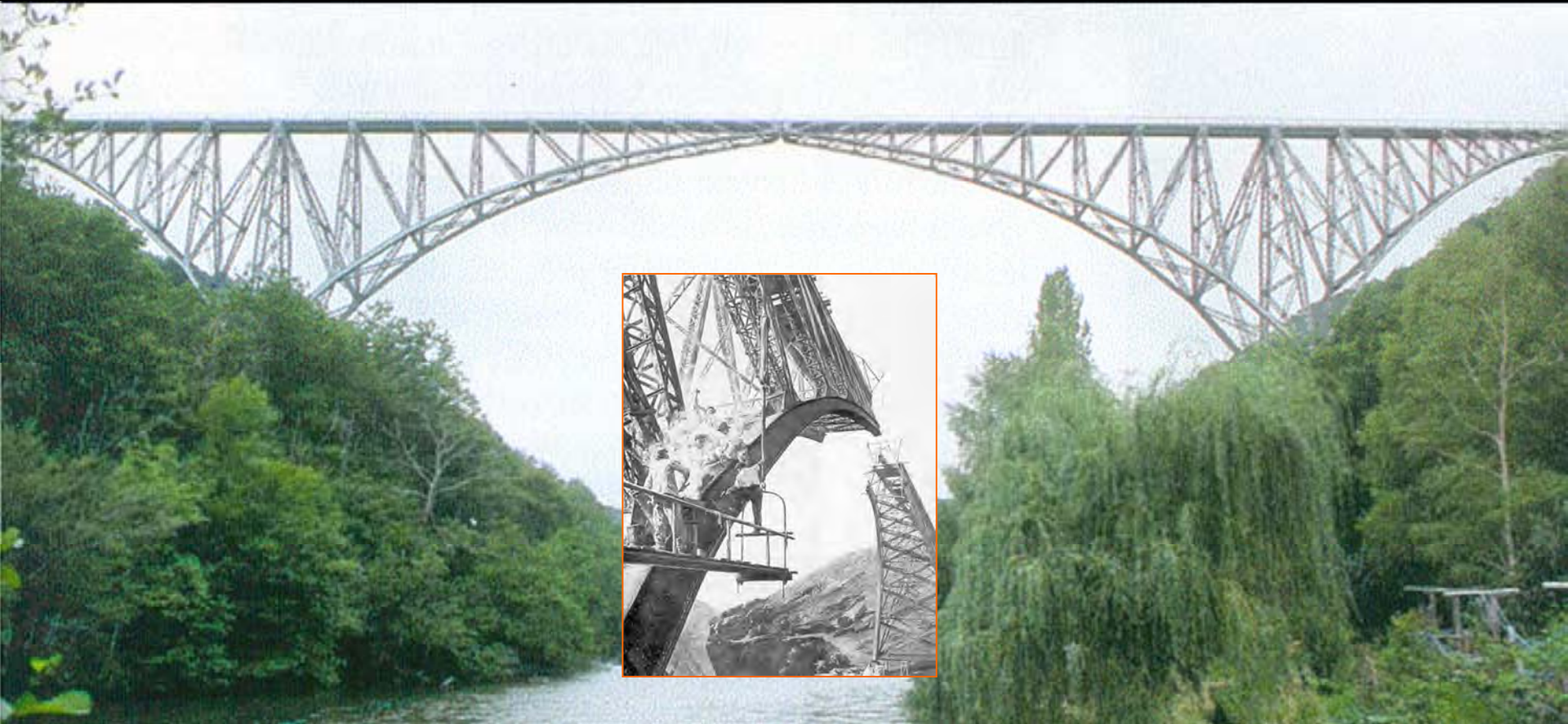


▪OBRAS: *Viaduc du Viaur*, en la línea Rodez-Albi (1902, arco compensado de 220 m de luz, P. Bodin. Batignolles)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■Obras: el *Viaduc du Viaur*, alzado de la estructura y óleo de H.M. Magne sobre la construcción de la obra

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■Obras: el *Hell Gate Bridge*, sobre el East River, entre Queens y el Bronx (1916, vano biarticulado de 298 m, G. Lidenthal)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪Obras: el *Sydney Harbour Bridge*, en la bahía de Sydney (1932, arco biarticulado de 503 m, J. Bradfield y R. Freeman)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪ Vista del puente y del palacio de la ópera de la *bahía de Sydney*

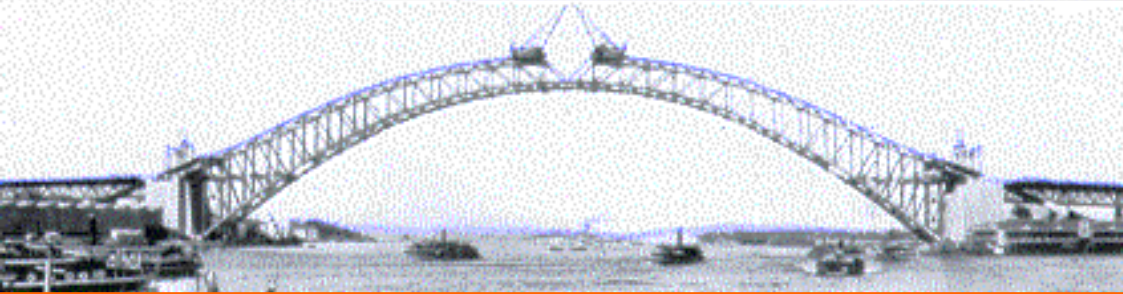
<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

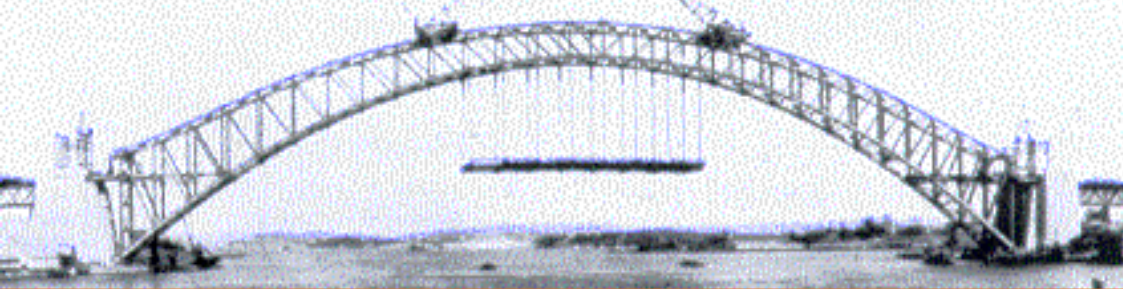
03 Puentes metálicos



- Construcción por voladizos del puente de la bahía de Sydney (con empotramiento provisional en la base de los pilonos de acceso)



- Cierre del arco, todavía empotrado en arranques



- Construcción del tablero, con el arco biarticulado. Se procede desde la clave, descolgando primero las péndolas

- Obras: el *Sydney Harbour Bridge*, en la bahía de Sydney (construcción del arco y del tablero)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■Obras: el *puente Bayonne*, sobre el Kill van Kull (State Route 440, entre Staten Island y New Jersey, 1932, 504 m, O.H. Ammann)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

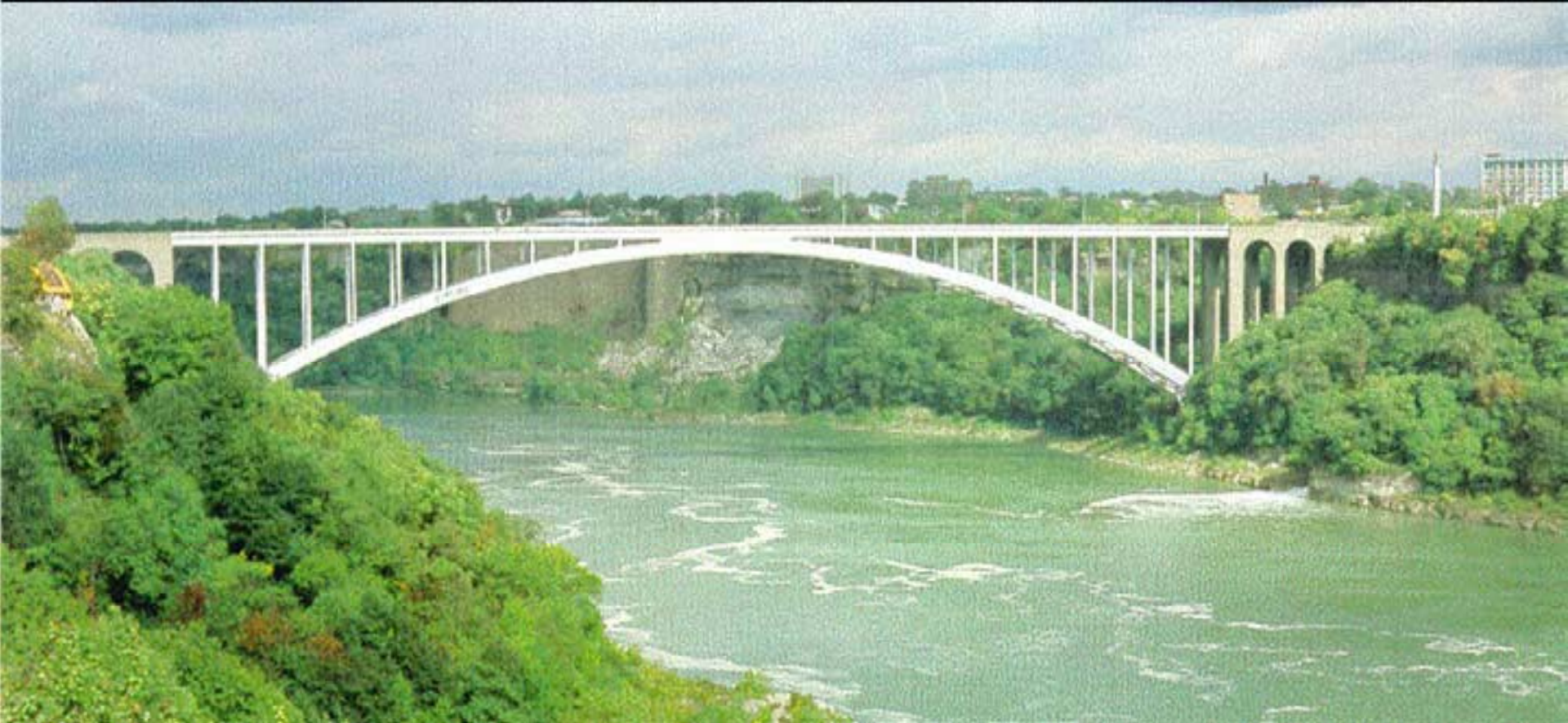


▪Obras: el *punte de New River Gorge* (Fayetteville, West Virginia, 1978, arco de acero triangulado de 518 m)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 Puentes DE ACERO>

03 Puentes metálicos

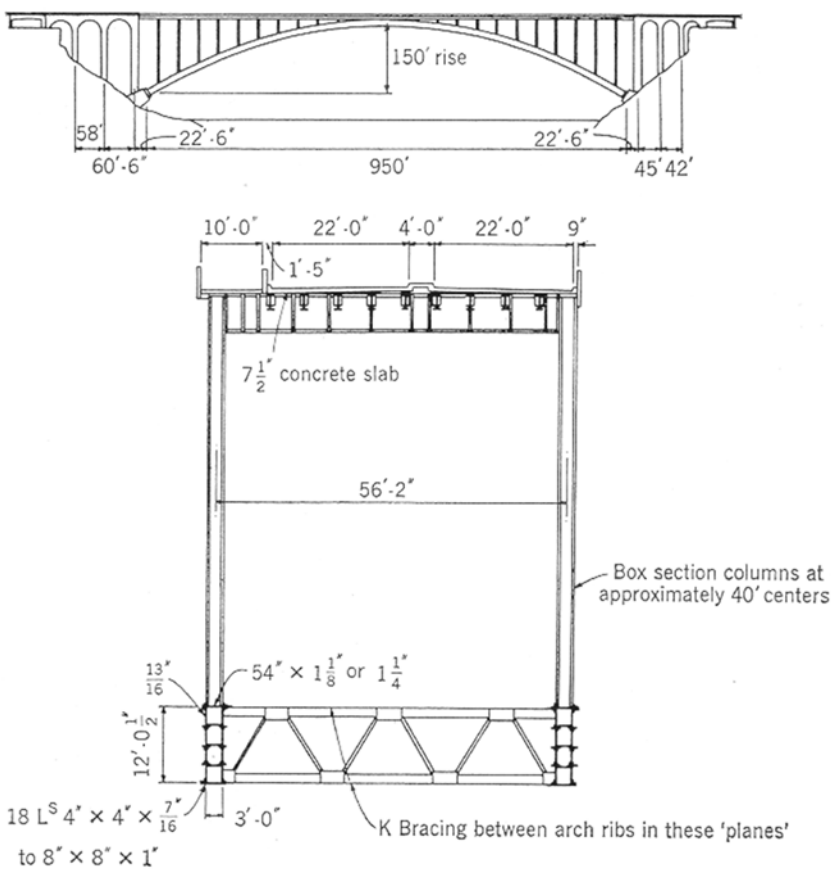


▪Obras: el *Rainbow Bridge*, sobre el Niágara, entre EEUU y Canada (1941, vano de 290 m, Wadley y Hardesty)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



- Estructura resistente del **Rainbow Bridge**: arco biempotrado de tablero superior, formado por dos nervios laterales celulares muy estrechos, arriostrados transversalmente por una doble triangulación en **K**

- Obras: el **Rainbow Bridge** (esquema general y sección transversal)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



* Falleció el día del cierre del arco, en accidente de tráfico

** Al colisionar un petrolero

■Obras: el *Tjörn Bridge*, sobre el Askeröfjord (1970, vano de 288.5 m, Lindenberger*. El puente fue destruido en 1980**)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

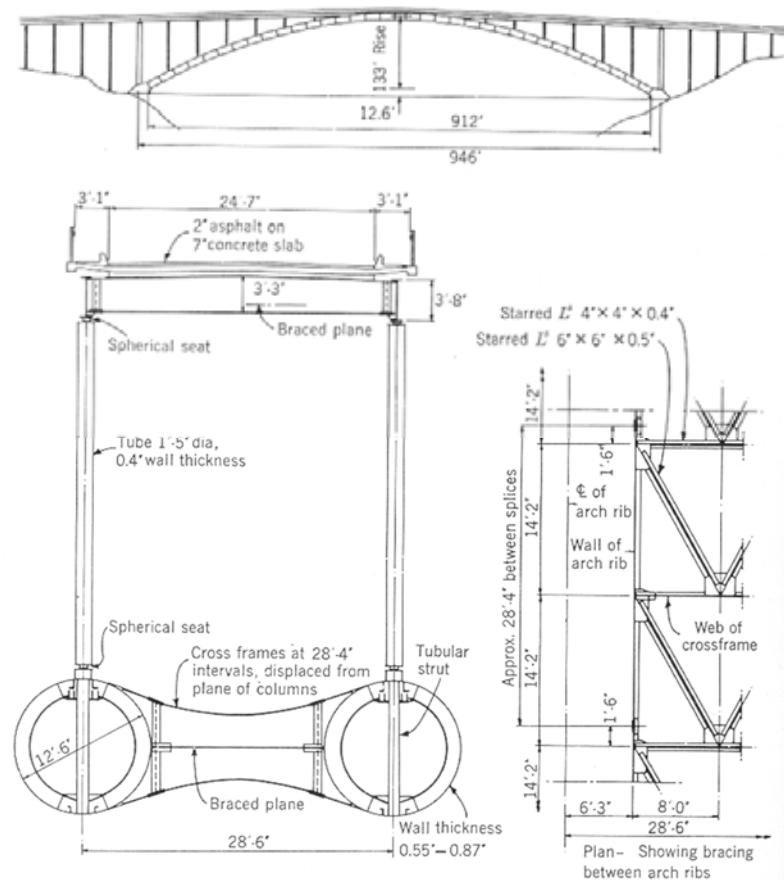


▪Obras: el *punte Matsushima* (réplica de 126 m del puente de Tjörn)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 Puentes DE ACERO>

03 Puentes metálicos



- Estructura resistente del *Tjörn Bridge*: arco biempotrado de tablero superior, formado por dos tubos, arriostrados transversalmente por diafragmas con forma de “hueso” a 8.636 m y una triangulación en *K* modulada a 4.318 m

- Obras: el *Tjörn Bridge* (esquema general y sección transversal)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

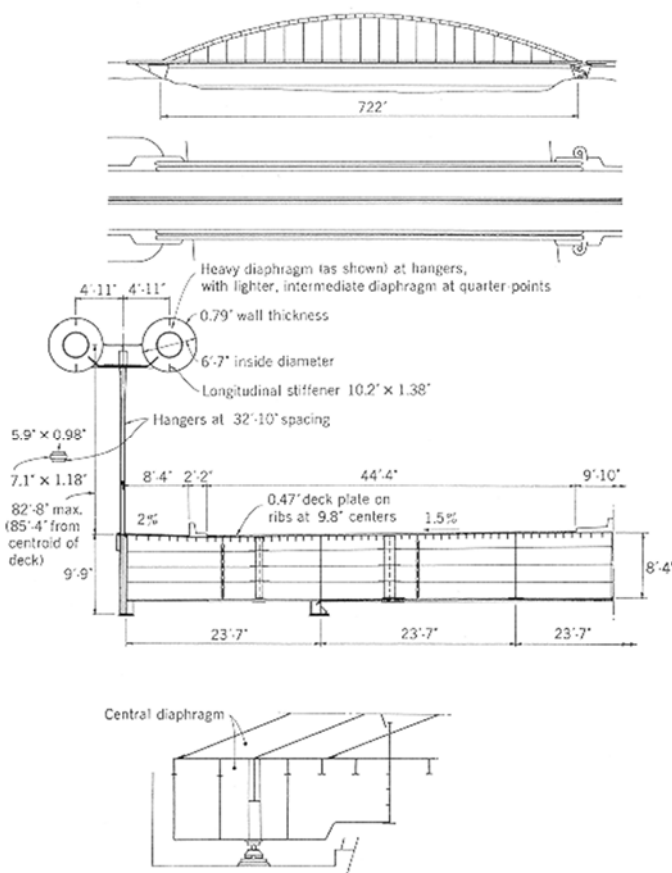


■Obras: el *punte de Kaiserlei*, sobre el Main cerca de Offenbach (1964, vano de 220 m, H. Homberg)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



- Estructura resistente del **Kaiserlei-brücke**: bow-string formado por arcos laterales verticales exentos (sin arriostramiento transversal) constituidos por dos tubos unidos por una pletina continua

- Obras: el **ponte de Kaiserlei** (esquema general y sección transversal)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

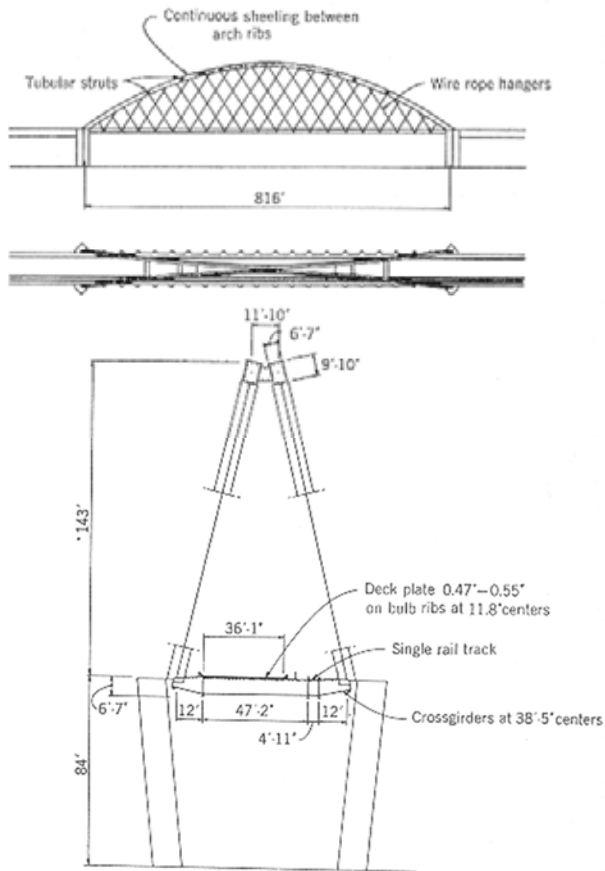


■Obras: el *punte de Fehmarnsund*, sobre el Báltico (1963, vano de 249 m, T. Jahnke, P. Stein y G. Lohmer)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



- Estructura resistente del **puente de Fehmarnsund**: bow-string formado por dos arcos inclinados tangentes en clave, de sección rectangular hueca. Péndolas reticuladas (sistema Nielsen)

- Obras: el **puente de Fehmarnsund** (esquema general y sección transversal)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

□ UN CASO PARTICULAR: *los puentes arco dentro de las ciudades*



▪Obras: el *ponte de la Barqueta*, sobre el antiguo cauce del Guadalquivir en Sevilla (1989, 168 m, Apia XXI)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



▪ Estructura resistente del **puente de la Barqueta**: bow-string con arco único que bifurca en arranques. Se construyó completamente en una orilla

▪ Rotación sobre un apoyo, desplazando el apoyo opuesto sobre barcazas

▪ Obras: el **puente de la Barqueta** (fases constructivas)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■Obras: *puente del acceso sur a Cullera*, sobre el Jucar (Diciembre 2007, vano central de 90 m, S. Monleón y CMD ingenieros)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■Obras: *puente del acceso sur a Cullera*, sobre el Jucar (Diciembre 2007, vano central de 90 m, S. Monleón y CMD ingenieros)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



■Obras: el *Pont Mirabeau*, sobre el Sena (París, 1896, arcos compensados de acero de 93 m, Jean Résal)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



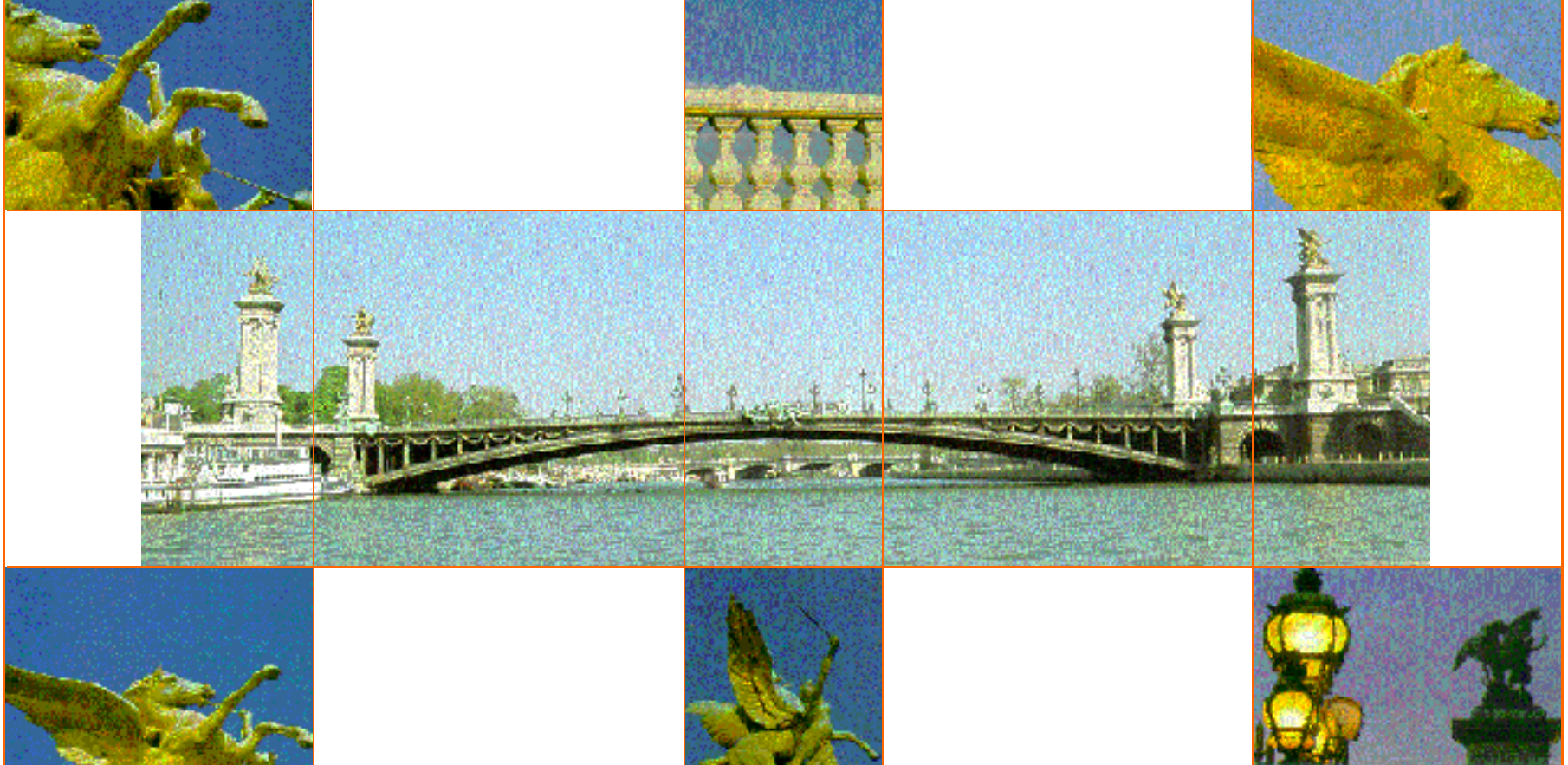
■ El Zar Nicolas II puso la primera piedra el 7 de octubre de 1896 en memoria de su padre, Alejandro III

■ Obras: el *Pont Alexandre III*, sobre el Sena (París, 1900, 15 arcos triarticulados de acero de 107 m, Jean Résal)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

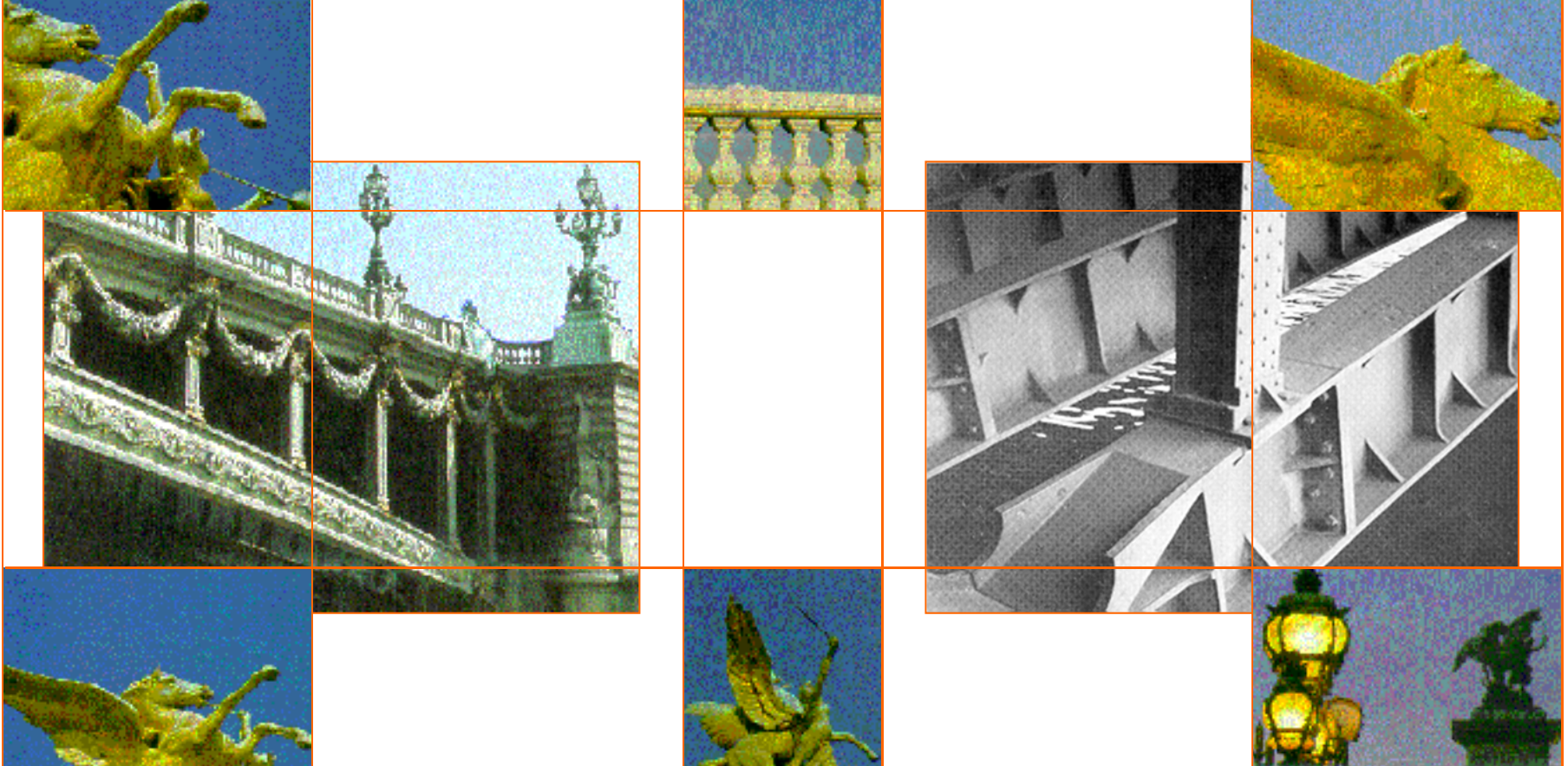


■Obras: el *Pont Alexandre III* (alzado y detalles)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■Obras: el *Pont Alexandre III* (alzado y detalles)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 Puentes de acero>

03 Puentes metálicos



▪Obras: la *nueva pasarela Solferino*, sobre el Sena (París, 2000, Marc Mimram)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



▪detalle de las vigas de piso, de canto variable

▪Acceso desde la margen izquierda del Sena, lado Quai d'Orsay

▪Obras: la *nueva pasarela Solférino* (la obra en Mayo de 1999: la estructura metálica está totalmente ejecutada)

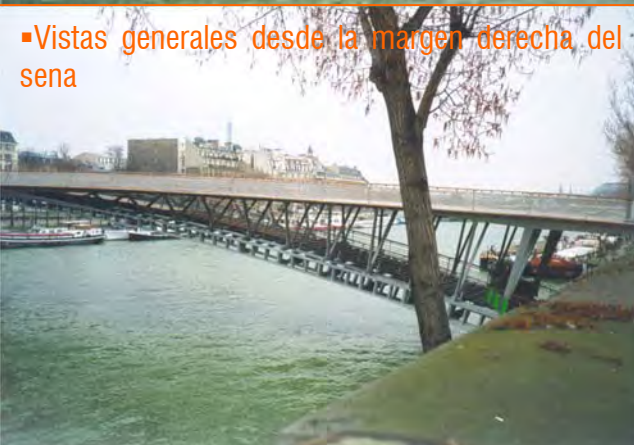
<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



■ Vistas generales desde la margen derecha del sena



■ Obsérvese la mayor potencia de la primera péndola triangular

■ Obras: la *nueva pasarela Solférino* (la obra en febrero de 2001, totalmente terminada pero de acceso prohibido)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

■ Vistas del arco y de las péndolas inclinadas



■ Detalle del empotramiento y del alma reticulada del arco



■ Barandilla, pavimento y junta de dilatación en acceso, con abundante uso de madera

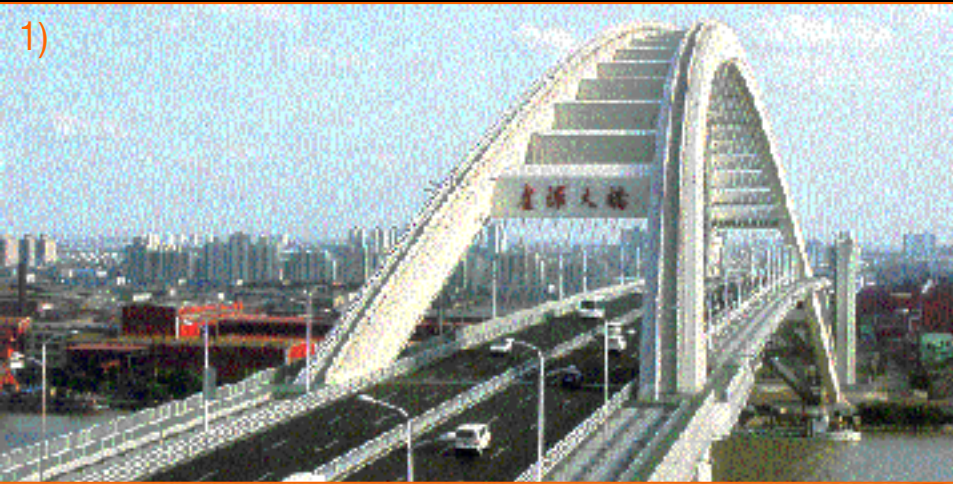


■ Obras: la *nueva pasarela Solférino* (la obra en febrero de 2001, totalmente terminada pero de acceso prohibido)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos



- 1) La obra en servicio
- 2) Construcción del arco mediante atirantamiento provisional
- 3) Ejecución del tablero



■Obras: el *Puente Lupu*, sobre el río Huangpu (Shangai-China, 2003, vano central de 550 m)

<3.3.3 Puentes arco>

<3.3 PUENTES DE ACERO>

03 Puentes metálicos

- ❑ EFICIENCIA ESTRUCTURAL: en los años 60 se extiende el uso del **A-52**, acero al manganeso-silicio de 353 Mpa (en Alemania, ya se empleaba el ST-52 desde los años 40):

con el consiguiente ahorro de peso propio

$\Delta\sigma_u > 40\%$

- ❑ MEDIOS DE UNIÓN: del tradicional **roblonado** se pasó al **bulonado** y posteriormente a la **soldadura**, sistema de unión universalmente aceptado en la actualidad (excepción: los **tornillos de alta resistencia**)

- ❑ PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

- **Protección pasiva:** la pintura
- **Aceros patinables** | (manuales ENSIDESA, tomo 3)

- ❑ MONTAJE: extraordinariamente versátil para estas construcciones

- **Por elevación**
- **Por empuje**
- **En voladizo** | (manuales ENSIDESA, tomo 3)

<3.4.1 Materiales y procedimientos constructivos>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

☐ **Puentes de aluminio.** El aluminio es un metal ligero y resistente a la corrosión, con buen comportamiento a rotura y fatiga, duradero y se puede conformar a voluntad por extrusión. Además, su ductilidad lo hace especialmente apto para el diseño sísmico y es totalmente reciclable, pero... **es caro**



▪Obras: el **puente sobre el río Forsmo**: el primer puente de carretera en aluminio construido en Noruega (1995, tablero en cajón de 39 m de longitud para 7.4 m de ancho)

<3.4.1 Materiales y procedimientos constructivos>

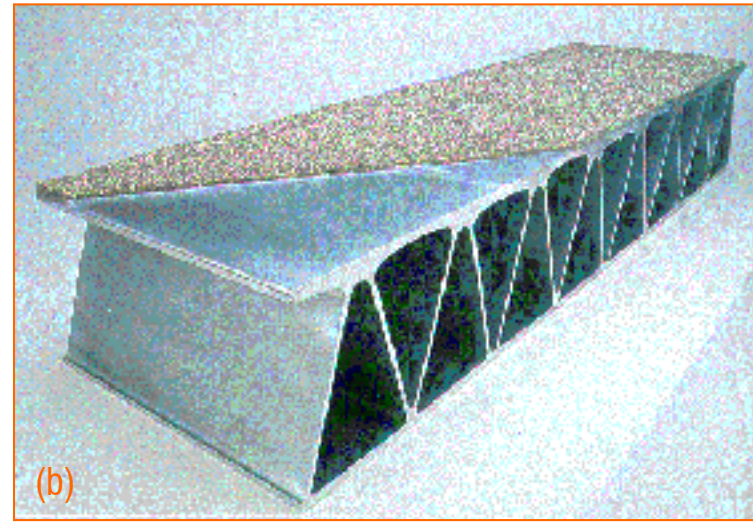
<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

- ❑ Las principales experiencias en este campo se han llevado a cabo en EEUU y en los países nórdicos (Suecia en particular), mientras que en España, se presentó un proyecto de pasarela para la ciudad de Bilbao a principios de los noventa
- ❑ Su aplicación a la sustitución de pisos de tableros mediante paneles es particularmente interesante y comenzó de la mano de la firma Reynolds Metals Company hace ya más de 60 años



(a) Ensayo de un panel de tablero de puente



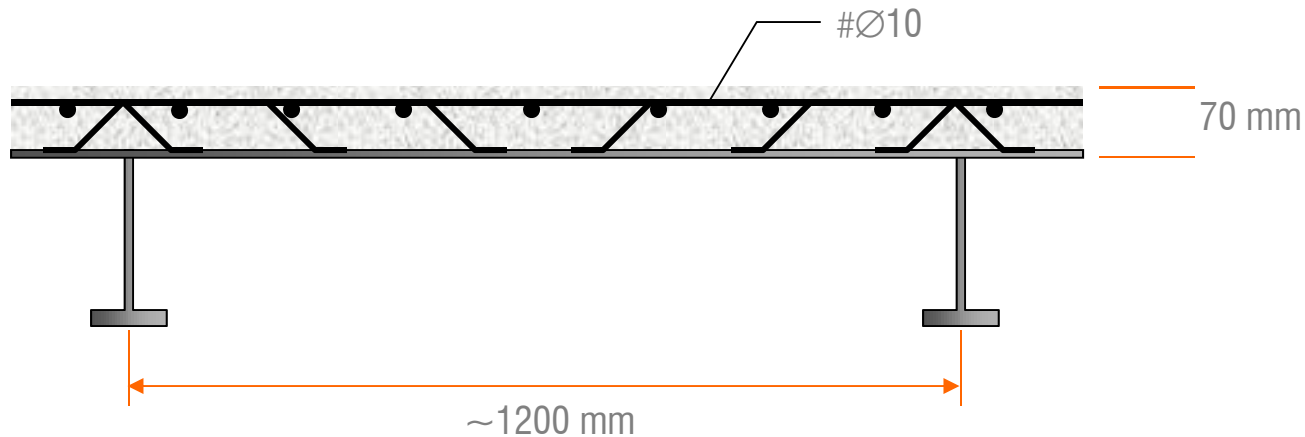
(b) aspecto del "Alumadeck" de Reynolds

<3.4.1 Materiales y procedimientos constructivos>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

- ❑ En la selección del tipo de piso, interviene principalmente la luz de vano L , debiendo asociar a valores crecientes de esta ***soluciones más ligeras***
- ❑ LOSA DE HORMIGÓN ARMADO, con espesores generalmente comprendidos entre 18 y 25 cm ($G > 5 \text{ kN/m}^2$)
- ❑ LOSA MIXTA ROBINSON ($G > 3 \text{ kN/m}^2$)



<3.4.2 Pisos de los tableros>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- LOSA NERVADA mediante chapa grecada ($G > 4 \text{ kN/m}^2$)

<3.4.2 Pisos de los tableros>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



rigidizadores longitudinales cerrados

vigas de piso



▪PISO ORTÓTROPO ($G > 2 \text{ kN/m}^2$)

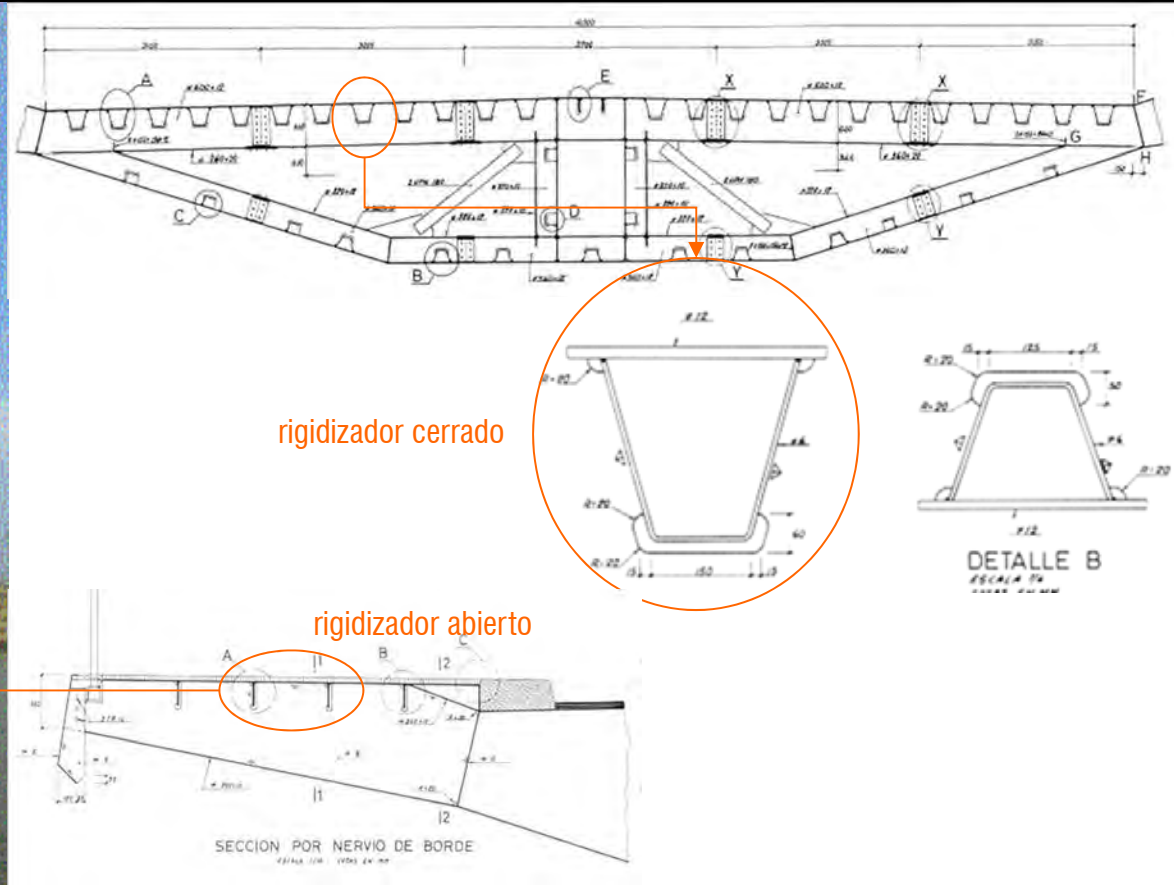
rigidizadores longitudinales abiertos

vigas de piso

<3.4.2 Pisos de los tableros>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



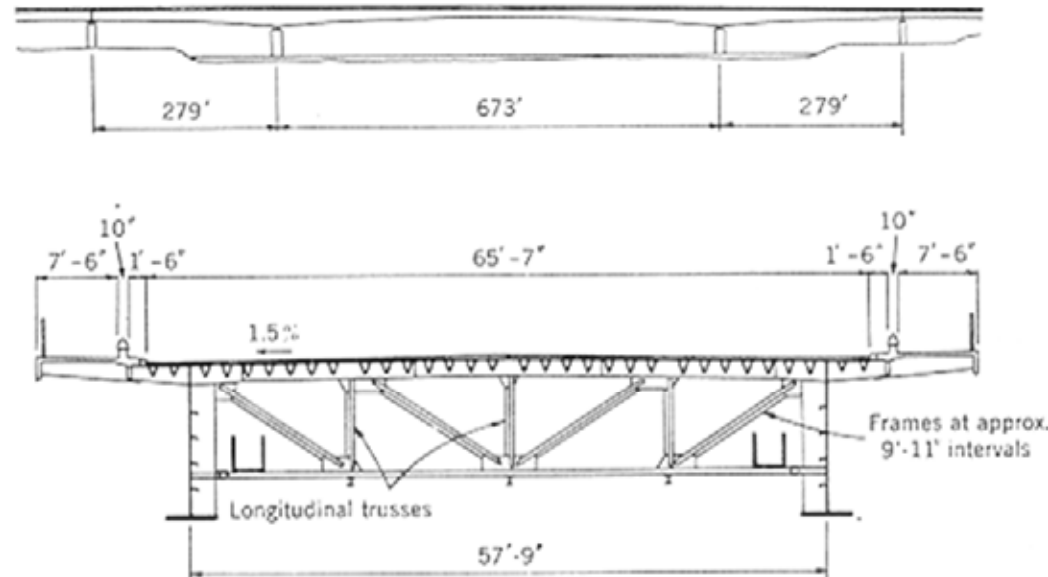
El puente de la Barqueta, en Sevilla (1989, 168 m, Apia XXI)

<3.4.2 Pisos de los tableros>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

- En su concepción interviene tanto la luz L como el ancho B (selección del piso, disposición de arriostramientos internos, número de vigas longitudinales o número de tableros...). En la actualidad, al reservar el acero para luces importantes, las secciones transversales preferidas corresponden a **puentes de dos vigas laterales** (sección en π) y **puentes en cajón**

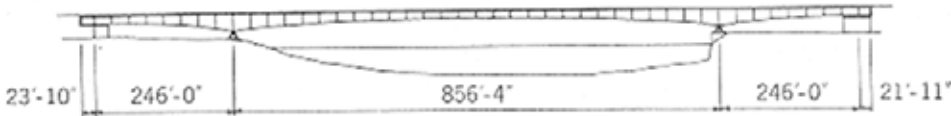


▪El *ponte de Schierstein* (1961, Leonhardt & Andrä)

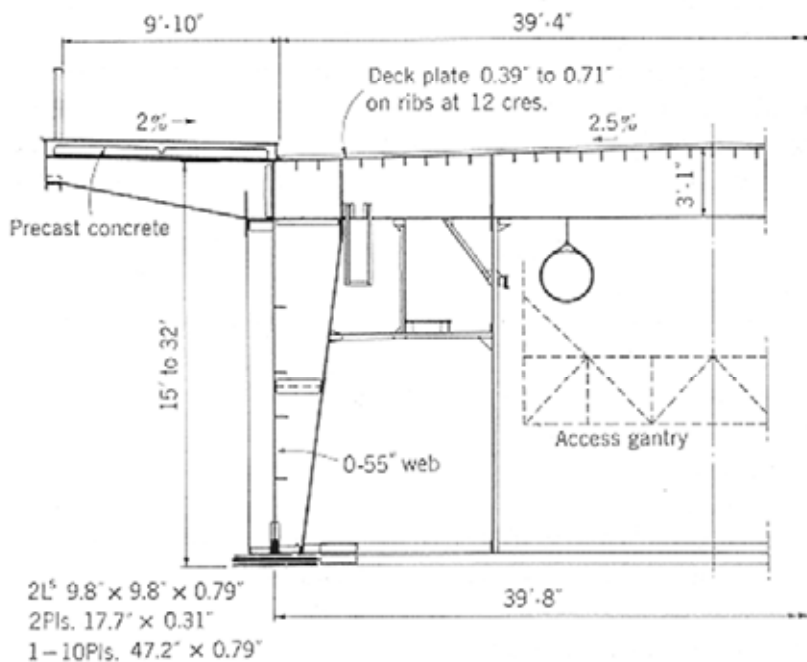
<3.4.3 Secciones transversales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- Dos vigas laterales de canto variable entre 4572 y 9754 mm
- Luz máxima de 261 m
- $h/L = 1/27$ a $1/57$

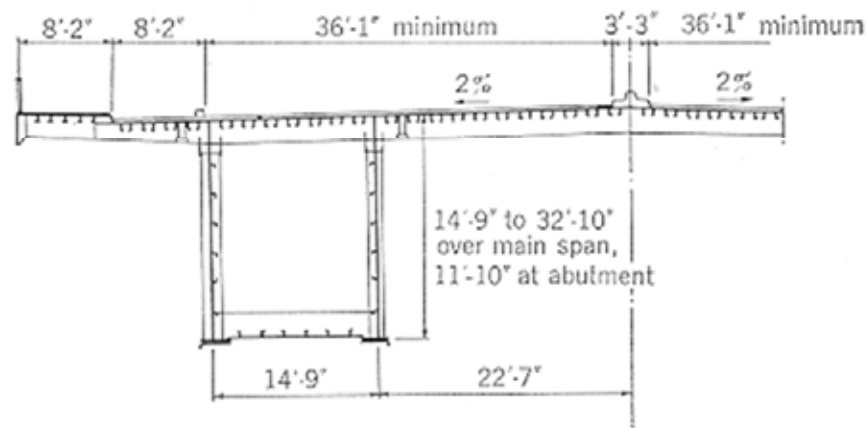
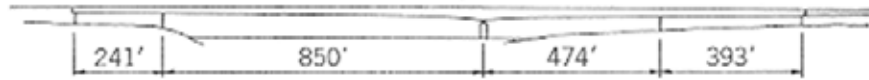


▪ El *puente Sava I*, en Belgrado (1956, vanos de 75+261+75 m)

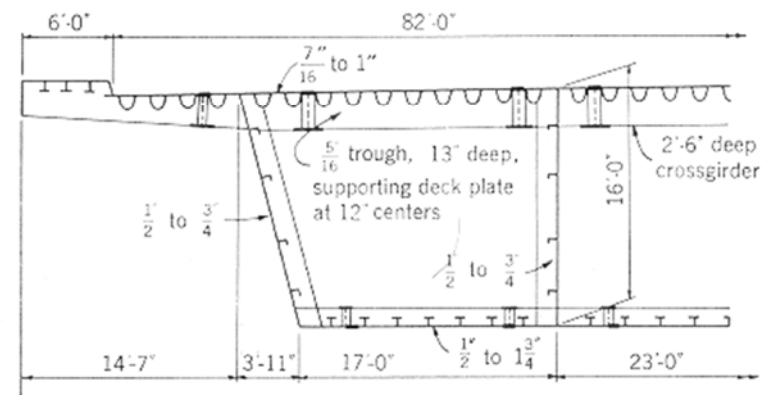
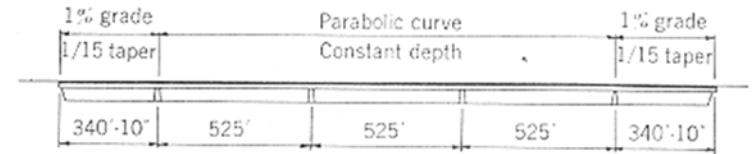
<3.4.3 Secciones transversales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- **Puente del Zoo**, en Colonia (1966, Leonhard & Andrä)
- Dos cajones laterales de canto variable entre 4.80 y 10.00 m
- Luz máxima de 259 m
- $h/L = 1/26$ a $1/54$

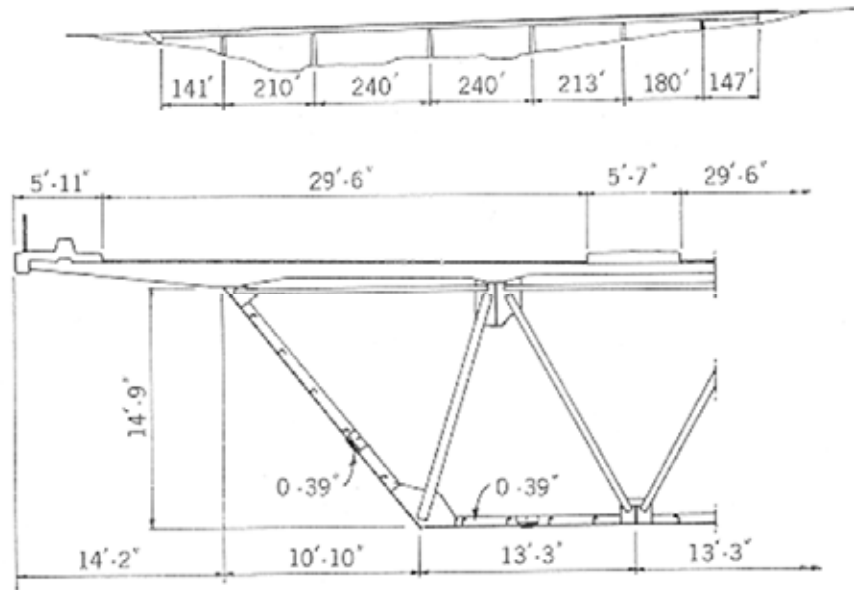


- **Concordia Bridge**, en Montreal (1967)
- Viga cajón bicelular de canto constante igual a 4877 mm
- Luz máxima de 160 m
- $h/L = 1/33$

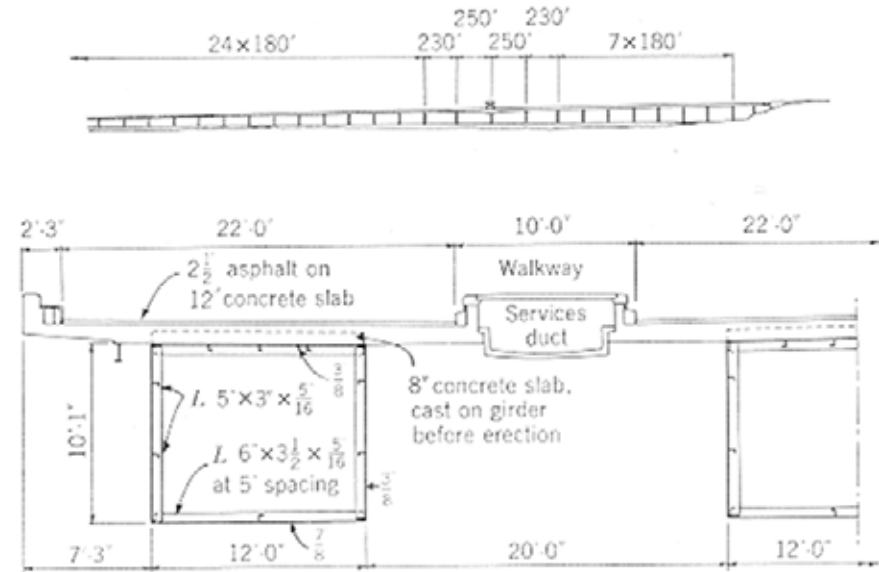
<3.4.3 Secciones transversales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- **Puente de Wuppertal**, cerca de Ohede (Alemania)
- Cajón de canto constante igual a 4.5 m
- Piso de hormigón armado apoyado sobre 4 almas (las de la artesa metálica y dos perfiles interiores)
- Luz máxima de 73 m
- $h/L = 1/16$

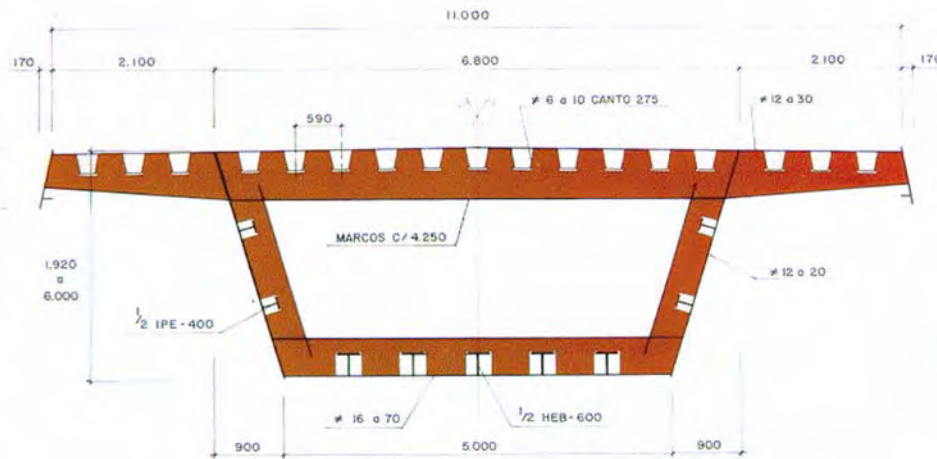
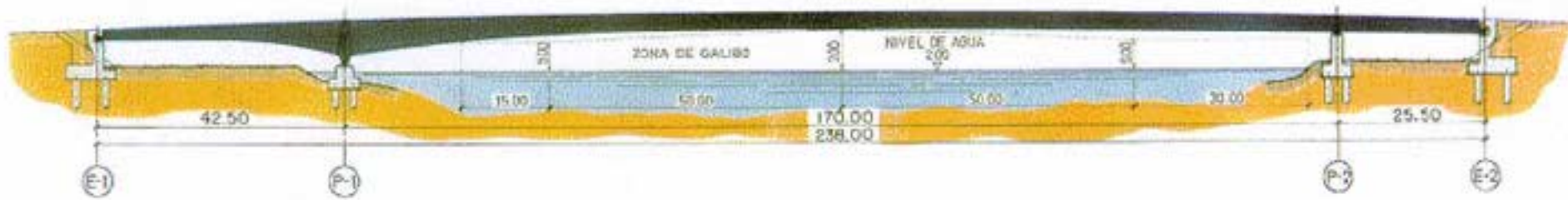


- **Puente de carretera del Tay**, cerca de Dundee (Escocia)
- Dos cajones independientes de canto constante igual a 3.07 m
- Piso de hormigón armado ejecutado en parte sobre la chapa superior del cajón metálico
- Luz máxima de 76.20 m
- $h/L = 1/25$

<3.4.3 Secciones transversales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- **Puente de la cartuja**, sobre el antiguo cauce del Guadalquivir, en Sevilla (1991, Leonhardt & Andrä, L. Viñuela)
- Un cajón metálico de canto variable entre 3.012 y 6.010 m en el vano principal
- Piso ortótropo
- Luz máxima de 170 m
- $h/L = 1/28$ a $1/56$

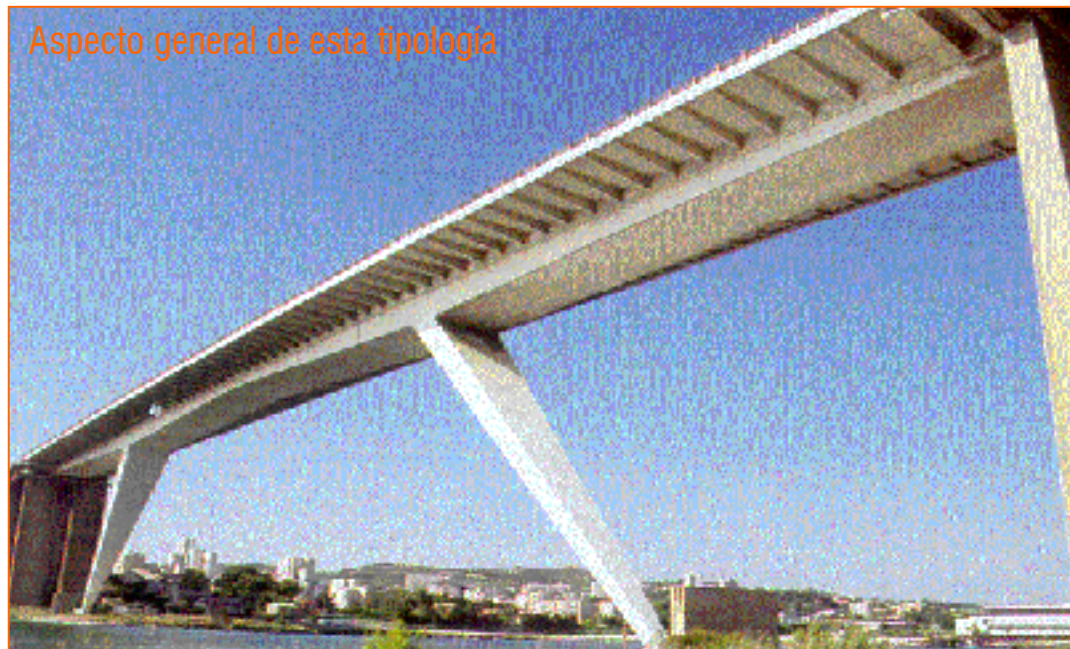
<3.4.3 Secciones transversales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

(a) Puentes pórtico de apoyos inclinados

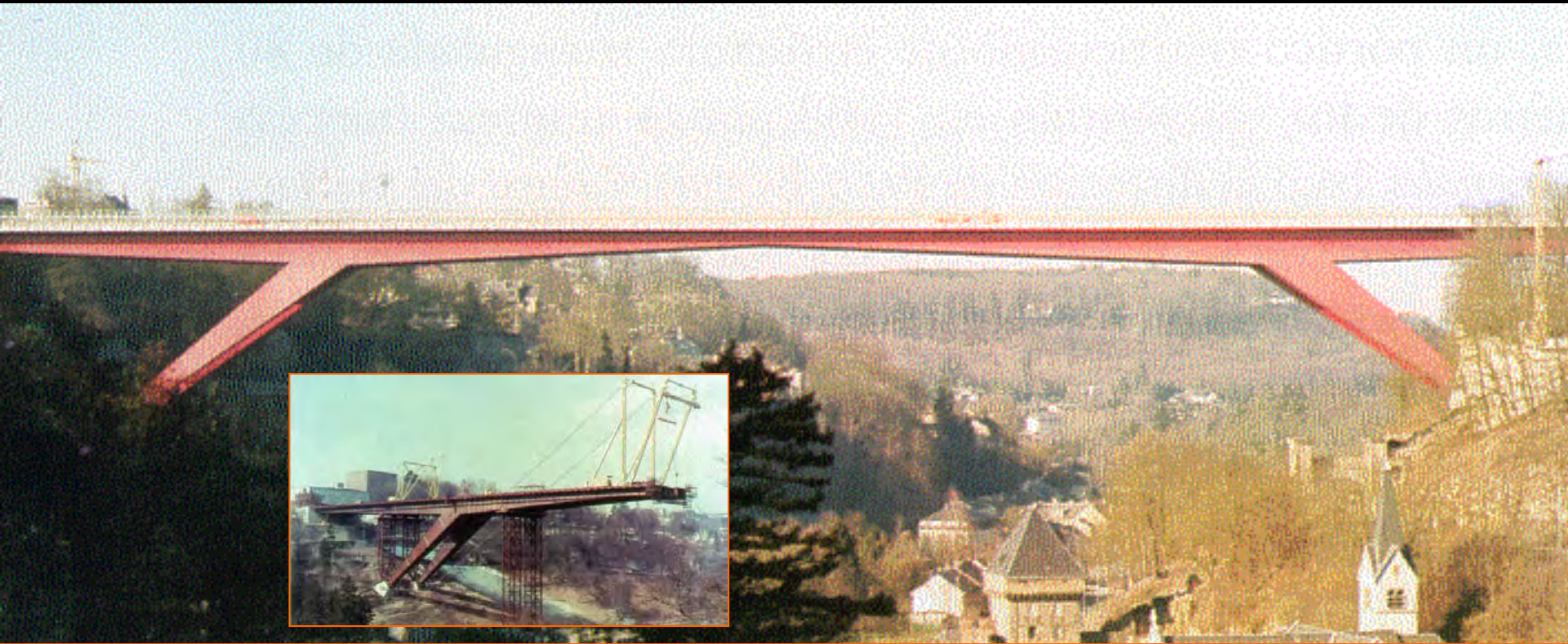
- En general, los puentes pórtico metálicos se diseñan con *apoyos inclinados*, para proporcionar menores flexiones en el tablero a igualdad de vano. En tal caso, su comportamiento se aproxima al de un arco de directriz poligonal



<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- Dos cajones de canto variable linealmente y piso ortótropo
- Luz máxima de 234 m

▪ Obras: el *ponte de la Gran Duquesa María Carlota*, sobre el río Alzette (Luxemburgo, 1965)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- Un cajón de canto variable linealmente y piso ortótropo
- Luz máxima de 210 m
- J. Roret (C.F.M.E.)

▪ Obras: el *Viaduc des Martigues*, sobre el canal de Caronte, próximo a Marsella (Francia, 1972)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



▪Obras: el *Viaducto del barranco de Sfalassa* (Italia, 1973, vano porticado de 376 m, S. Zorzi, L. Lonardo y S. Procaccia)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



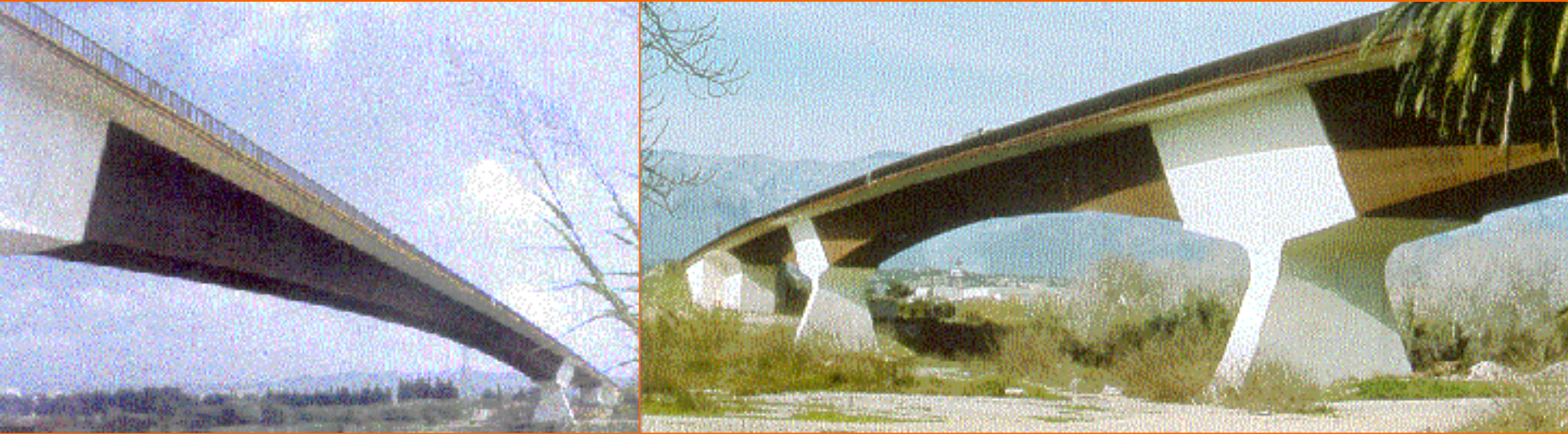
▪ **Nou pont del Diable**, sobre el río Llobregat en Martorell (1974, 100 m)

▪ **Puentes pórtico mixtos de J. Martínez Calzón y J.A. Fernández Ordóñez**: las pilas de hormigón blanco actúan como nudos de dimensión finita por su elevada rigidez (a su vez, están apoyadas sobre los cimientos)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



▪ *Puente de Tortosa*, sobre el río Ebro (1988, 180 m)

▪ *Puentes pórtico mixtos de J. Martínez Calzón y J.A. Fernández Ordóñez*: las pilas de hormigón blanco actúan como nudos de dimensión finita por su elevada rigidez (a su vez, están apoyadas sobre los cimientos)

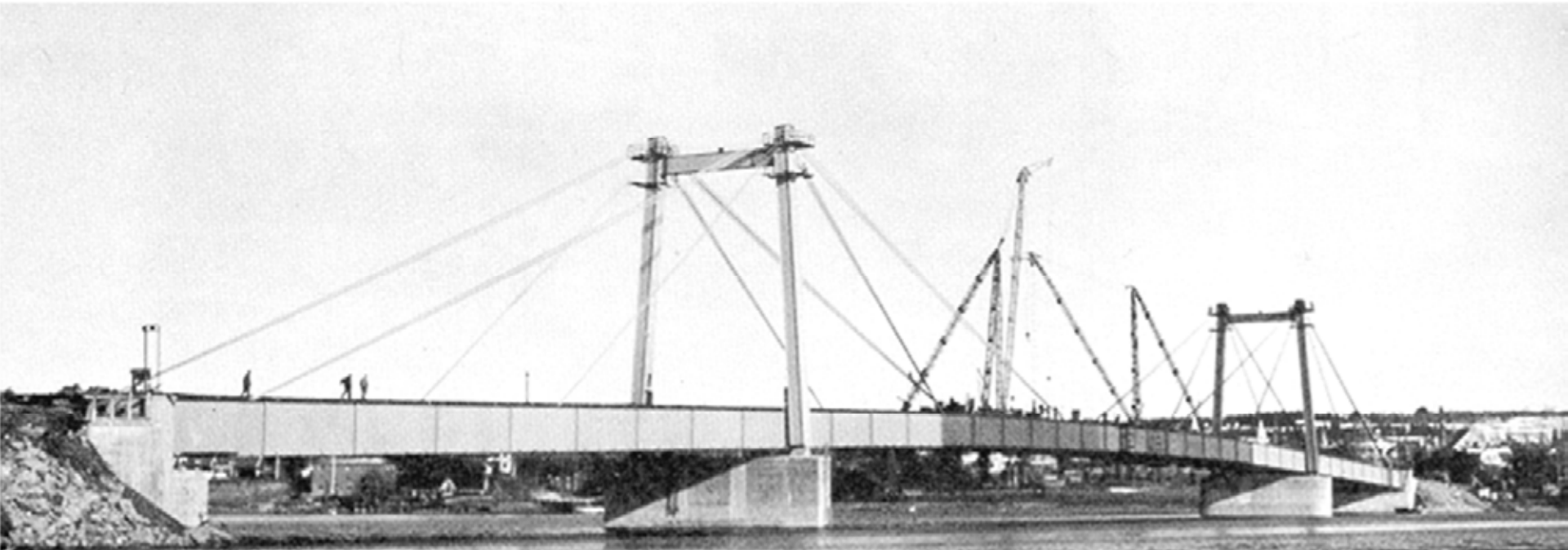
<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

(b) Puentes atirantados

- ❑ Los puentes atirantados han desplazado a los puentes arco en el segmento de las **grandes luces**



▪ **Puente de Strömsund:** el primer puente atirantado moderno (Suecia, 1955, 183 m de luz. F. Dischinger)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

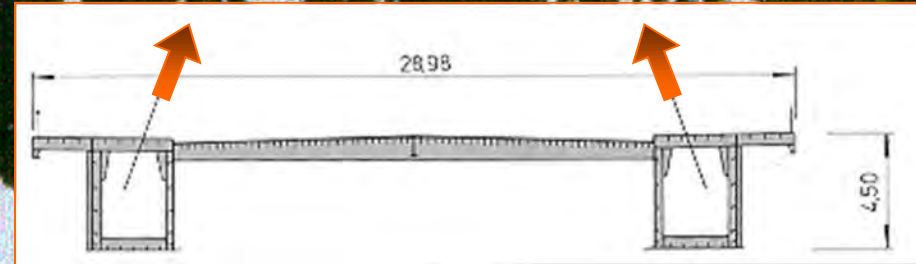
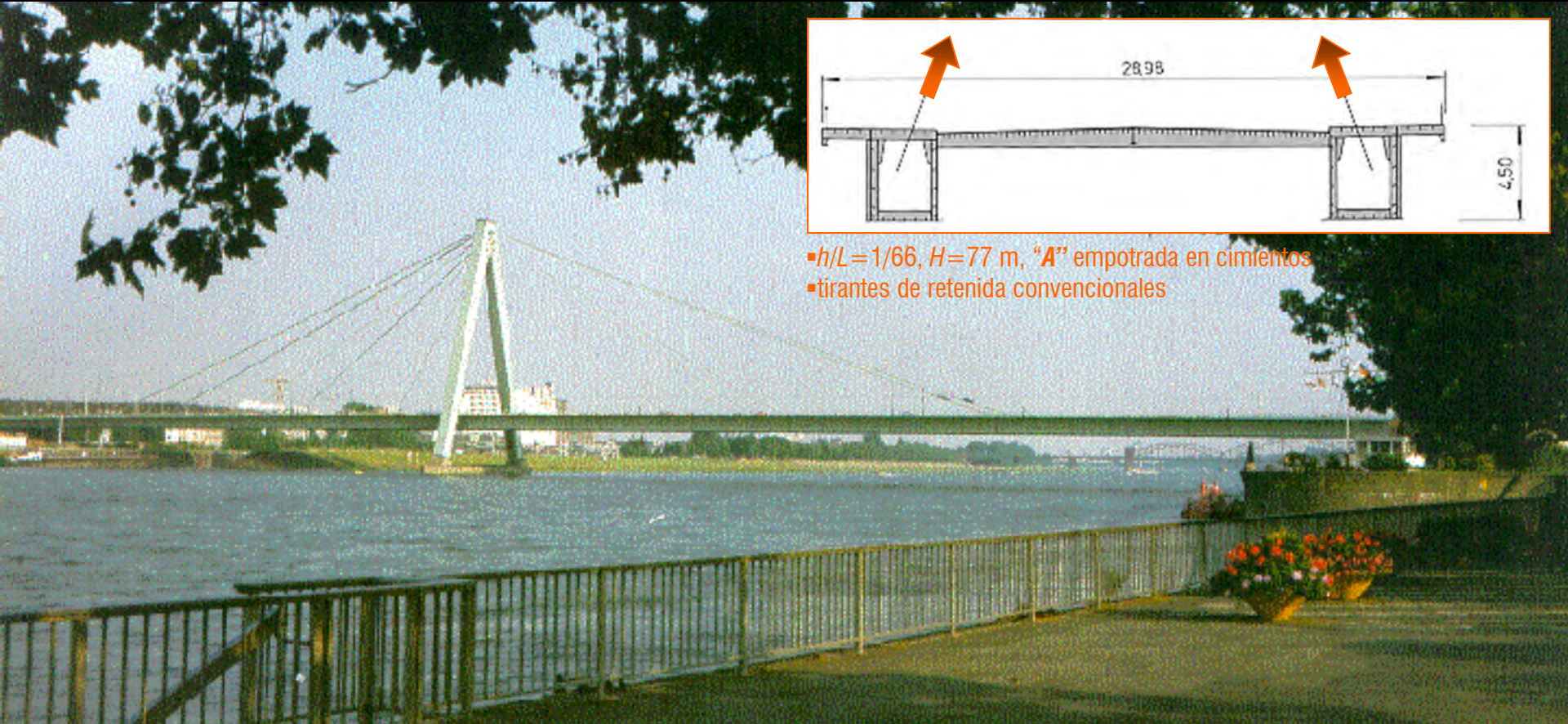
03 Puentes metálicos

- ASPECTOS CARACTERÍSTICOS. Aunque todo puente atirantado posee tres figuras distintivas, **su concepción estructural es enormemente interactiva**
 - **Atirantamiento:** en uno o dos planos (en general), con disposición en **abanico, arpa o mixta** [evolución de la separación, función de los tirantes de retenida]
 - **Pilonos o torres:** en ménsula o porticados (recto, en A, en Y invertida...)
 - **Tablero:** con vigas de alma llena, en cajón o incluso trianguladas, dispuestas en general según las líneas de anclaje de los tirantes [conexión pilono-tablero]

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



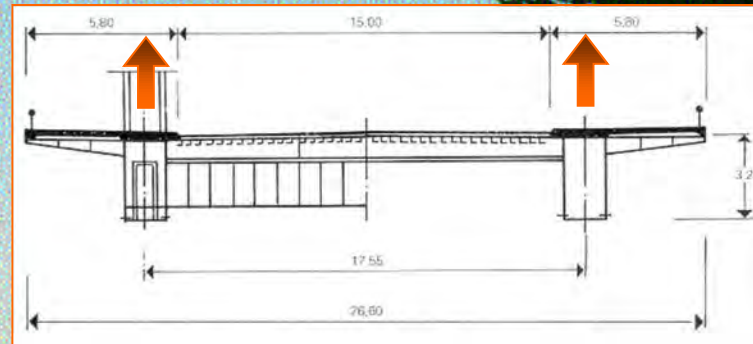
- $h/L = 1/66$, $H = 77$ m, "A" empotrada en cimientos
- tirantes de retenida convencionales

▪ Obras: el *punte Severin* sobre el Rin, en Colonia (1962, vano principal de 302 m, Gutehoffnungshutte Sterkrade A.G. y G. Lohmer)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- $h/L = 1/77$, $H = 41$ m, ménsulas empotradas en tablero
- tirantes de retenida convencionales

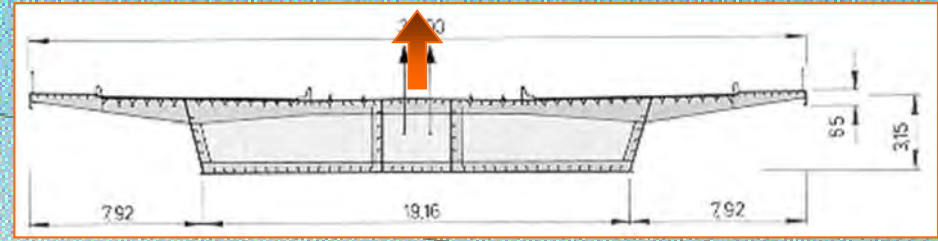


▪ Obras: el *Nordbrücke*, o *punte Theodor Heuss* (1958, 260 m de luz. Hein Lehmann, Leonhardt & Andrä y F. Tamms)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



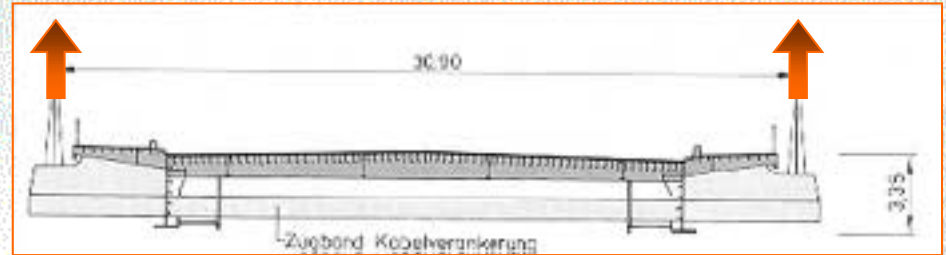
- $h/L = 1/83$, $H = 100$ m, ménsula empotrada en tablero
- tirantes de retenida a pilas

▪ Obras: el *punte Oberkassel* (1972, 257.5 m de luz. Hein Lehmann, Leonhardt & Andrä y F. Tamms)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- $h/L = 1/94$, $H = 114$ m, ménsulas empotradas en cimientos
- tirantes de retenida a pilas

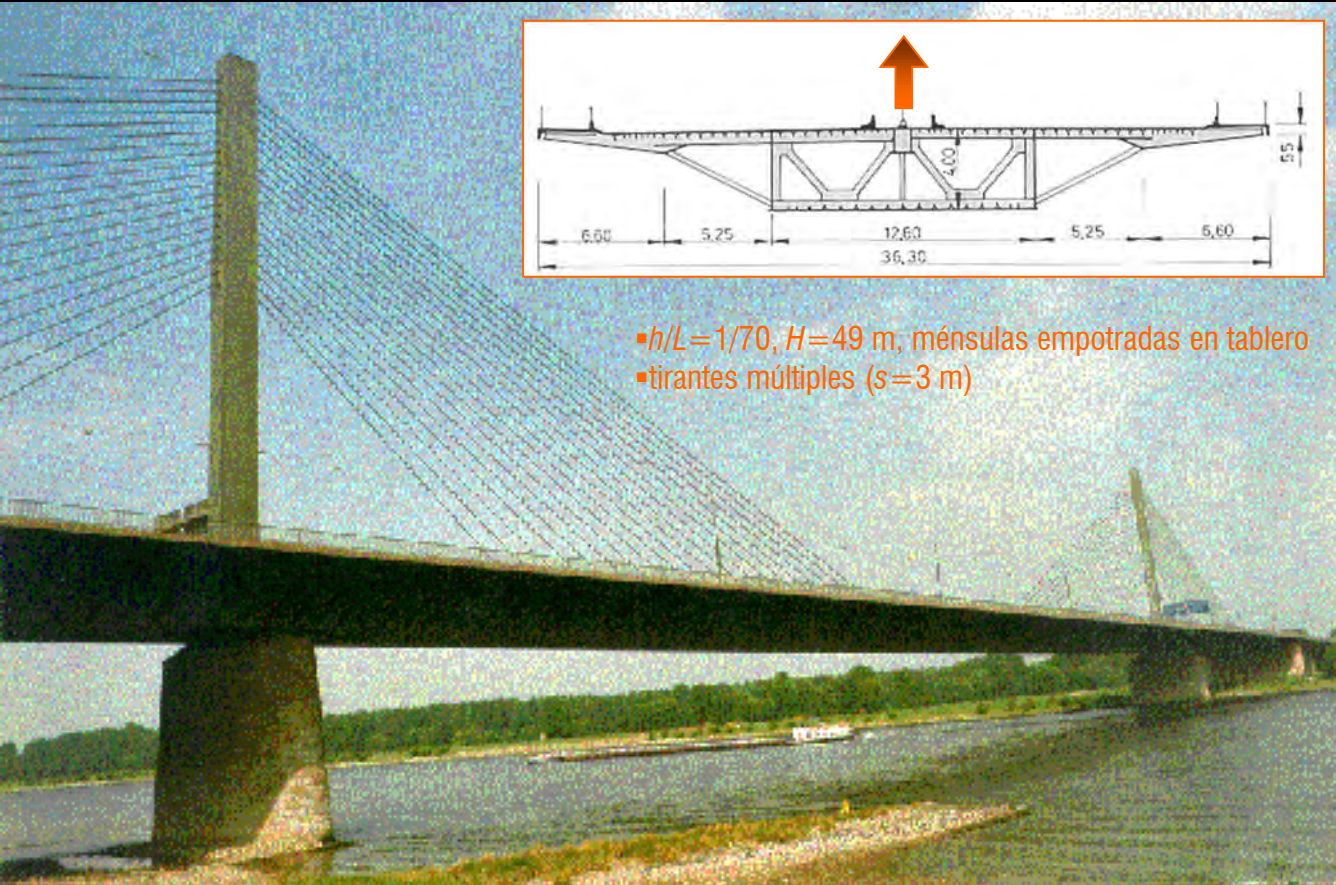


▪ Obras: el *Kniebrücke* (1969, 319 m de luz. **Hein Lehmann**, Leonhardt & Andrä y F. Tamms)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



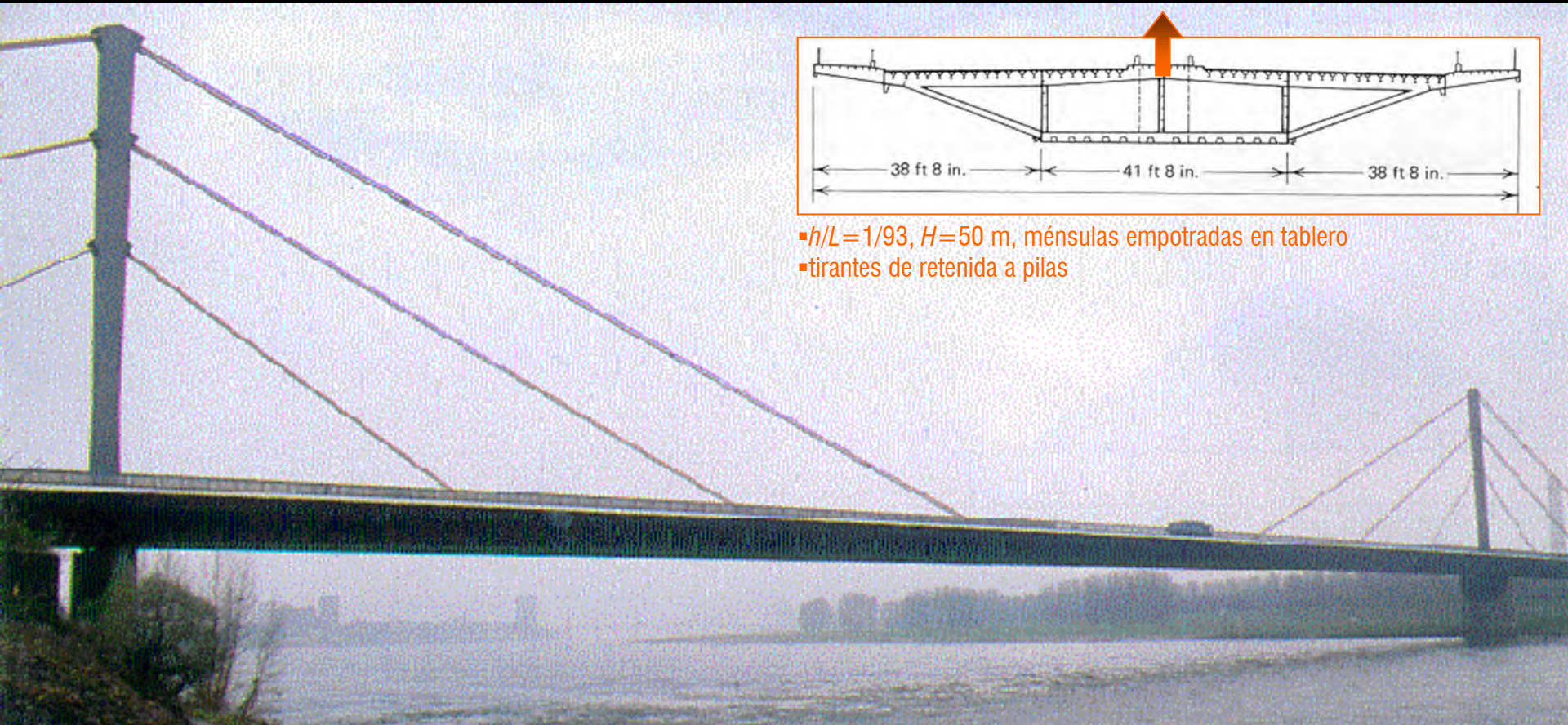
■Obras: el *ponte de Bonn-Norte*, o *ponte Friedrich-Hebert* sobre el Rin (1966, 280 m de luz. Hein Lehmann, H. Homberg)

- $h/L = 1/70$, $H = 49$ m, ménsulas empotradas en tablero
- tirantes múltiples ($s = 3$ m)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



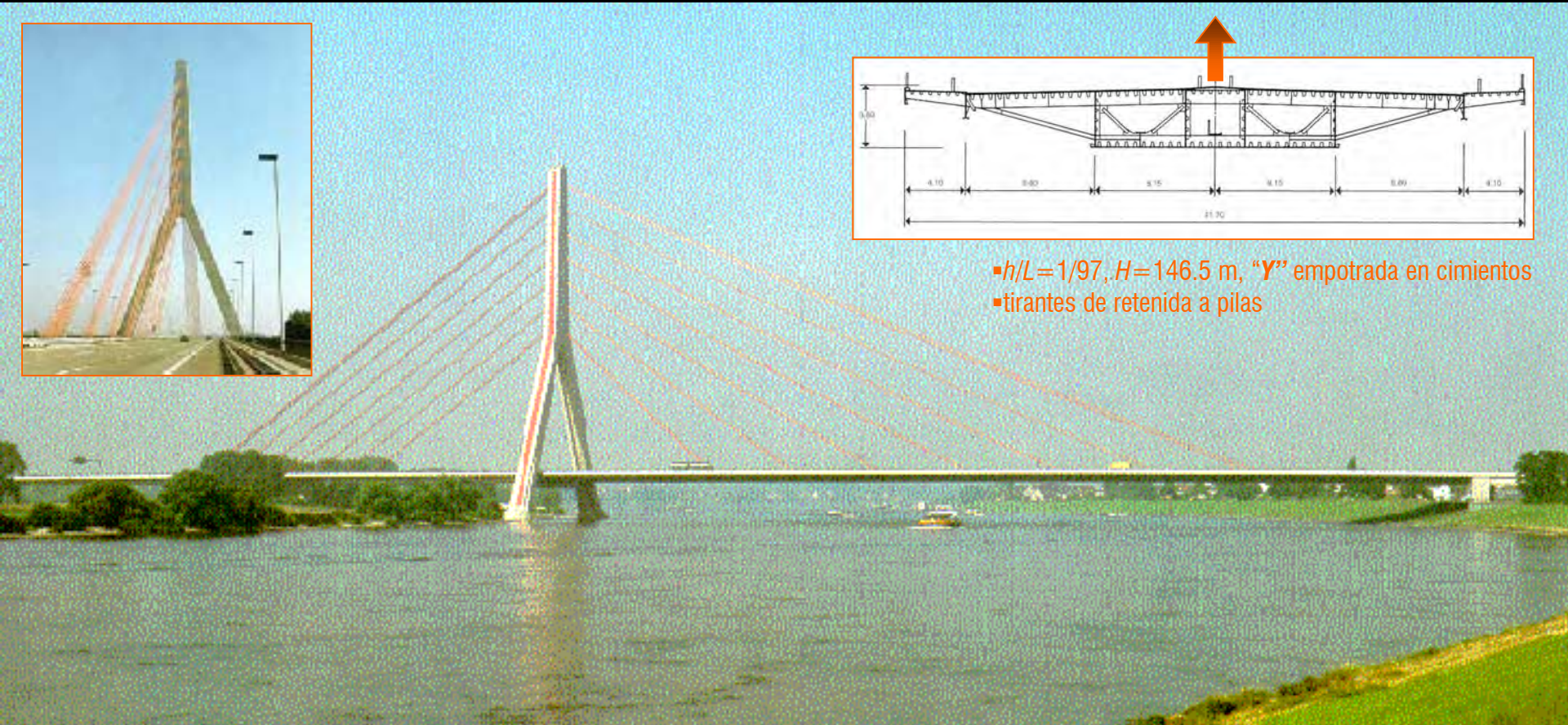
- $h/L = 1/93$, $H = 50$ m, ménsulas empotradas en tablero
- tirantes de retenida a pilas

▪ Obras: el *ponte de Duisburg-Neuenkamp*, sobre el Rin (1970, 350 m de luz)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- $h/L = 1/97$, $H = 146.5$ m, "Y" empotrada en cimientos
- tirantes de retenida a pilas

▪ Obras: el *punte de Flehe* sobre el Rin, en Düsseldorf (1979, 368 m de luz)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- $h/L = 1/200$, $H = 223$ m, “Y” empotradas en cimientos
- tirantes de retenida convencionales

▪ Obras: el *ponte de Yangpu* sobre el río Huang-pu, en Shangai (1993, tablero mixto de 602 m de luz y 3 m de canto)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- $h/L = 1/285$, $H = 203$ m, "Y" empotradas en cimientos
- tirantes de retención a pilas

▀ Obras: el *Pont de Normandie* (desembocadura del sena, 1995, tablero de acero en el tramo central, de 856 m, M. Virlogeux)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



▪Obras: el *Pont de Normandie* (construcción del tablero metálico por voladizos sucesivos aprovechando el atirantamiento)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



▪Obras: el *Pont de Normandie* (vista completa del puente con el vano metálico en construcción)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



▪Obras: el *Pont de Normandie* (cierre del tramo metálico)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



▪Obras: el **Viaducto de Millau** sobre el río Tarn (agosto 2004, vanos de $204+6\times 342+204$ m=2460 m de longitud total). Estudio inicial: SETRA. Equipo de proyecto: Sogelerg, Europe Etudes Gectj, Serf y Sir Norman Foster

▪**Video del Viaducto de Millau sobre el río Tarn**

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

Grandes puentes atirantados Japoneses

<i>Tatara</i> (ruta Onomichi-Imabari entre las islas Honshu y Shikoku, 2000)	890 m
<i>Meikoh central</i> (puerto de Nagoya, 2000)	590 m
<i>Tsurumi</i> (1994)	510 m
<i>Ikushi</i> (ruta Onomichi-Imabari entre las islas Honshu y Shikoku, 1991)	490 m
<i>Kobe Este</i> (1993)	485 m
<i>Yokohama</i> (1989)	460 m
<i>Iwakuro-jima</i> (ruta Kojima-Sakadie entre las islas Honshu y Shikoku, 1988)	420 m
<i>Itsuishi-jima</i> (ruta Kojima-Sakadie entre las islas Honshu y Shikoku, 1988)	420 m
<i>Meikoh Este</i> (puerto de Nagoya, 2000)	410 m
<i>Meikoh Nishi</i> (puente oeste del puerto de Nagoya, 1985)	405 m



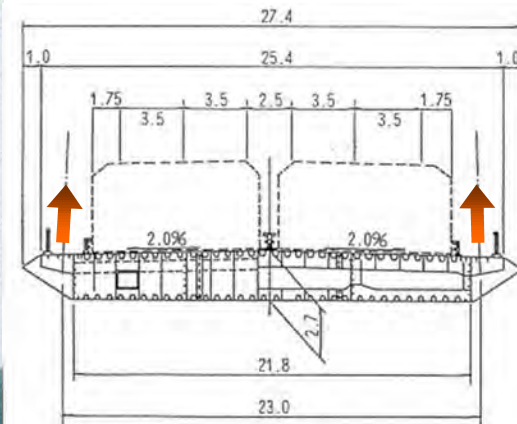
<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



- Obras: el *Puente de Tatara*, entre las islas Honshu y Shikoku (Japón, 1999, vano máximo de 890 m)



- $h/L = 1/330$, $H = 220$ m, "diamantes" empotrados en cimientos
- tirantes de retenida combinados

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

■ *El próximo record: en principio 1018 m para el 2008 (Stonecutters) 1088 m para el 2009 (Sutong)*

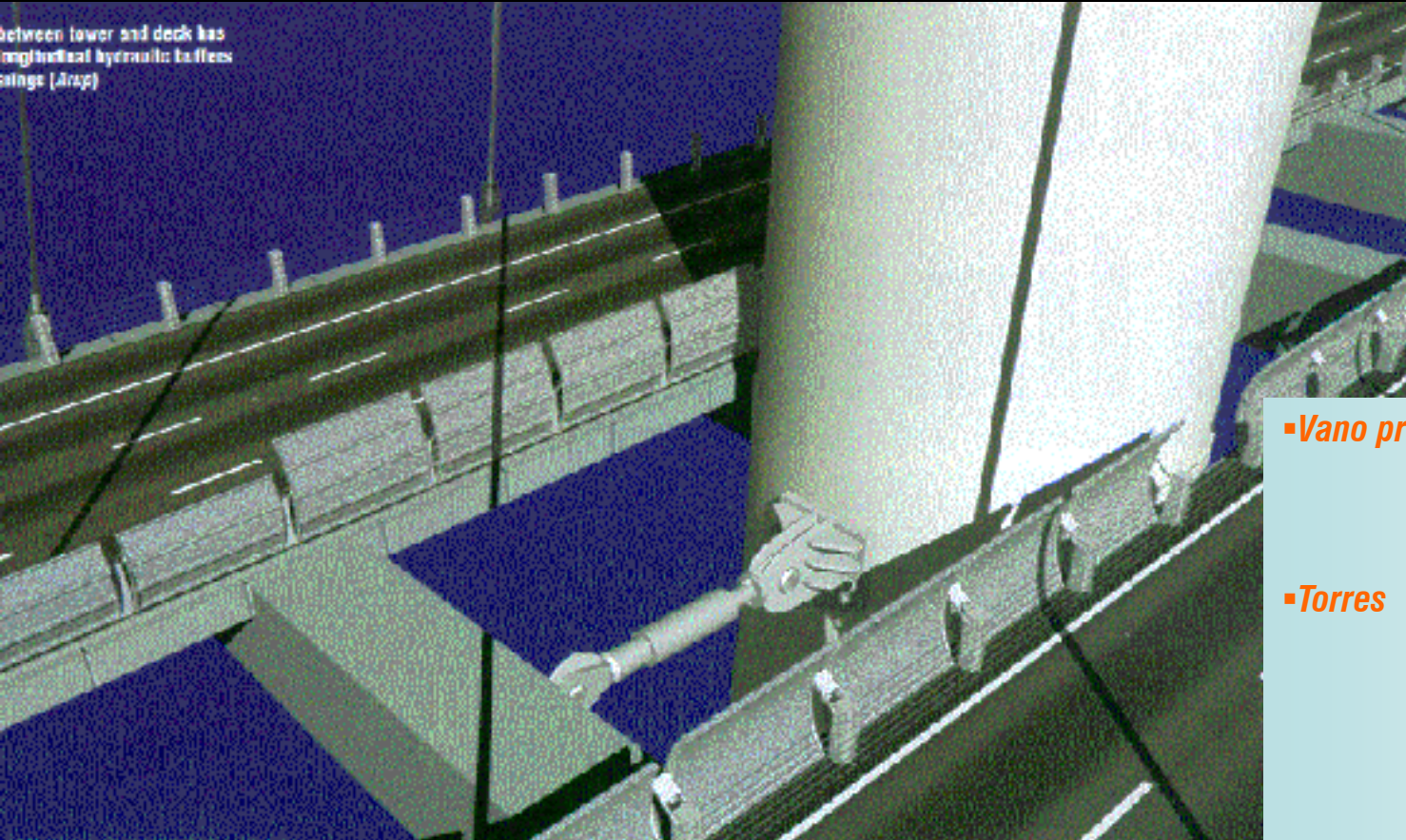


■ Obras: el *punte de Stonecutters* sobre la dársena del puerto de Hong-Kong. Propuesta ganadora: Halcrow, Flint & Neill, Dissing & Weitling, SMEDI. Adjudicatarios del proyecto de ejecución: Arup

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



between tower and deck has
longitudinal hydraulic buffers
(Arup)

▪Vano principal

longitud: 1018 m
ancho total: 51 m
canto: 3.2 m

▪Torres

altura: 290 m
diámetro: 14 a 7 m
base: 23×17 m
profundidad de
cimentación: 60 m

▪Obras: el *punte de Stonecutters*, amortiguador hidráulico longitudinal (Arup)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



▪Obras: el *punte de Stonecutters* en la actualidad (Hong Kong 20/12/2009, vano máximo de 1018 m)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



▪Obras: el *punte de Stonecutters* en la actualidad (Hong Kong 20/12/2009, vano máximo de 1018 m)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos



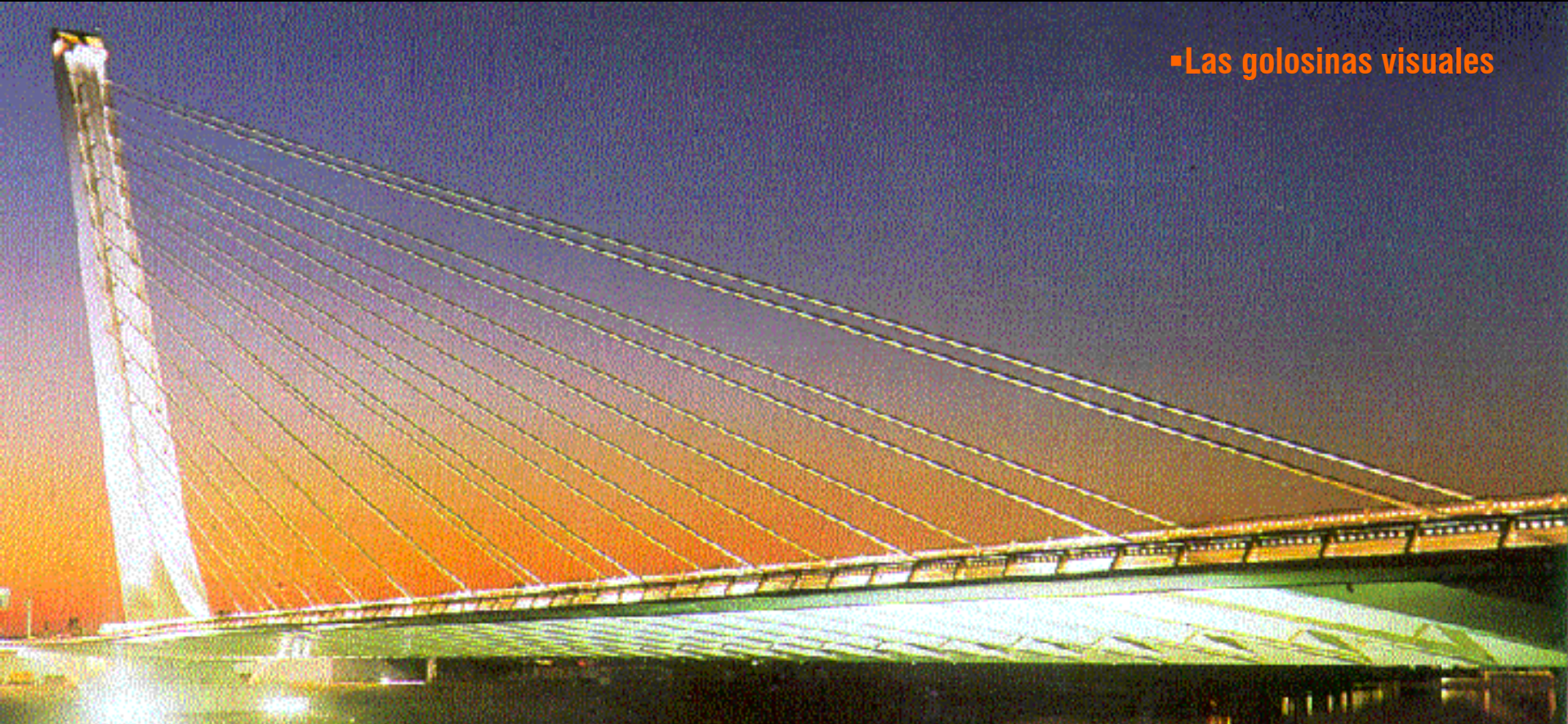
▪Obras: el *punte de Sutong*, sobre el Yangtze (25/05/2008, **vano máximo de 1088 m**)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE PUENTES METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

▪Las golosinas visuales



▪Obras: el *punte del Alamillo*, sobre el antiguo cauce del Guadalquivir (1991, **5.000 €/m²**, un vano de 200 m, Santiago Calatrava)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

03 Puentes metálicos

▪Las golosinas visuales



▪Obras: el *punte Erasmus*, sobre el Maas (Rotterdam, 1996, **12.000 €/m²**, vano atirantado de acero de 284 m, Ben van Berkel)

<3.4.4 Nuevas morfologías longitudinales>

<3.4 TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE Puentes METÁLICOS>

4.0 Motivación

4.1 Presentación histórica del nuevo material

4.2 Diversos tipos de puentes de hormigón armado

<Maillart, Freyssinet y otras obras>

4.3 Situación actual de la construcción de puentes de hormigón armado



04 Puentes de hormigón armado

“El hormigón armado supuso para los constructores de puentes mayor libertad, tanto en la puesta en obra de un material básicamente pétreo como en la búsqueda de formas resistentes óptimas”

❑ EL INICIO: en 1875 Joseph Monier construye la **pasarela de Chazelet**, de 16.5 m de luz, el primer puente de hormigón armado



❑ LA MADUREZ: **puente Albert Louppe** sobre el Elorn en Plougastel (1930, tres arcos de 186 m). Freyssinet lleva el hormigón armado a su cenit



❑ EL PRESENTE: la adaptación de técnicas de ejecución propias de la construcción metálica a la puesta en obra del hormigón aseguran cierta vigencia de los puentes arco



04 Puentes de hormigón armado

□ EL USO DE LOS CONGLOMERANTES HIDRÁULICOS

- Roma: empleo de morteros y hormigones (en revestimientos o bien en el relleno de tímpanos o encepados; cúpula del panteón de 43 m en hormigón...) utilizando como conglomerante la **cal** (argamasa, o *cal* y *canto*) o **cementos naturales** (ceniza de Pozzuoli)
- Siglo XVIII: se redescubre los cementos naturales a base de cenizas o de rocas arcilloso-calcáreas
- Siglo XIX: aparecen los **cementos artificiales** (1818: teoría de Vicat; 1824: Apsidin patenta el cemento Portland)

□ EL USO DE LAS ARMADURAS

- Orígenes: zunchados con madera de las construcciones de ladrillo Asírias y refuerzos con barras de hierro de los miembros traccionados de algunas esculturas

04 Puentes de hormigón armado



04 Puentes de hormigón armado

- Las armaduras de hierro de la *columnata del Louvre* de Claude Perrault (1613-1678)



- ❑ LOS PRIMEROS CONSTRUCTORES EN HORMIGÓN ARMADO: el *invento* del hormigón armado corresponde a la segunda mitad del siglo XIX, bajo forma de múltiples patentes

▪ **Joseph Monier**, horticultor en Versalles, comienza por patentar productos manufacturados desde 1867 (jardineras, tuberías, pasarelas, puentes y vigas). En Alemania, la empresa Wayss & Freytag adquiere sus patentes en 1885

04 Puentes de hormigón armado

▪ **François Hennebique**, verdadero impulsor de la construcción en H.A. en Francia, patenta la viga en T con cercos de cortante en 1892 y estará relacionado con la construcción de más de 700 obras en Europa (de las que percibía el 10%...)

❑ LAS PRIMERAS TEORÍAS: desde 1890 y motivados por las posibilidades del *Monierbau* de Wayss & Freytag (sus arcos armados eran tres veces más resistentes que los de hormigón en masa frente a cargas asimétricas), *Koenen* y *Mörsch* desarrollaron un primer modelo de comportamiento del material basado en la separación de funciones resistentes y proponiendo fórmulas para el dimensionamiento de la armadura

❑ LOS PRIMEROS REGLAMENTOS: ordenaron la práctica y por lo tanto favorecieron plenamente el desarrollo de la construcción en H.A.

▪ **1898**: se funda la *Deutsche-Beton-Verein* (Asociación Alemana del Hormigón), para la promoción de estudios e investigaciones sobre el H.A.

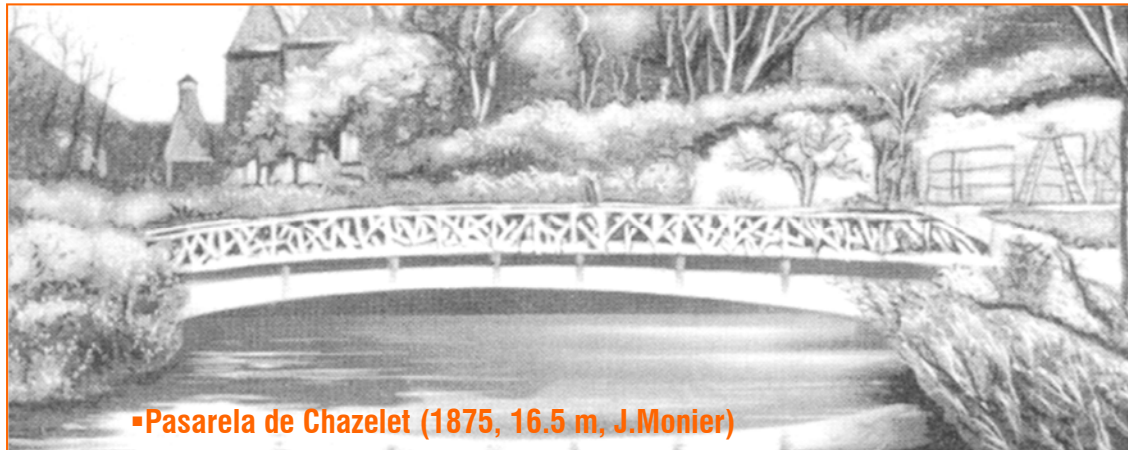
▪ **16 de Abril de 1904**: el Ministerio de O.P. Alemán publica las “*Disposiciones para la Ejecución de Obras de Hormigón Armado en la Construcción*”, basadas en los trabajos y recomendaciones de la *D.B.V.*

▪ **20 de Octubre de 1906**: En Francia se aprueba las “*Instrucciones relativas al empleo del hormigón armado*”

04 Puentes de hormigón armado

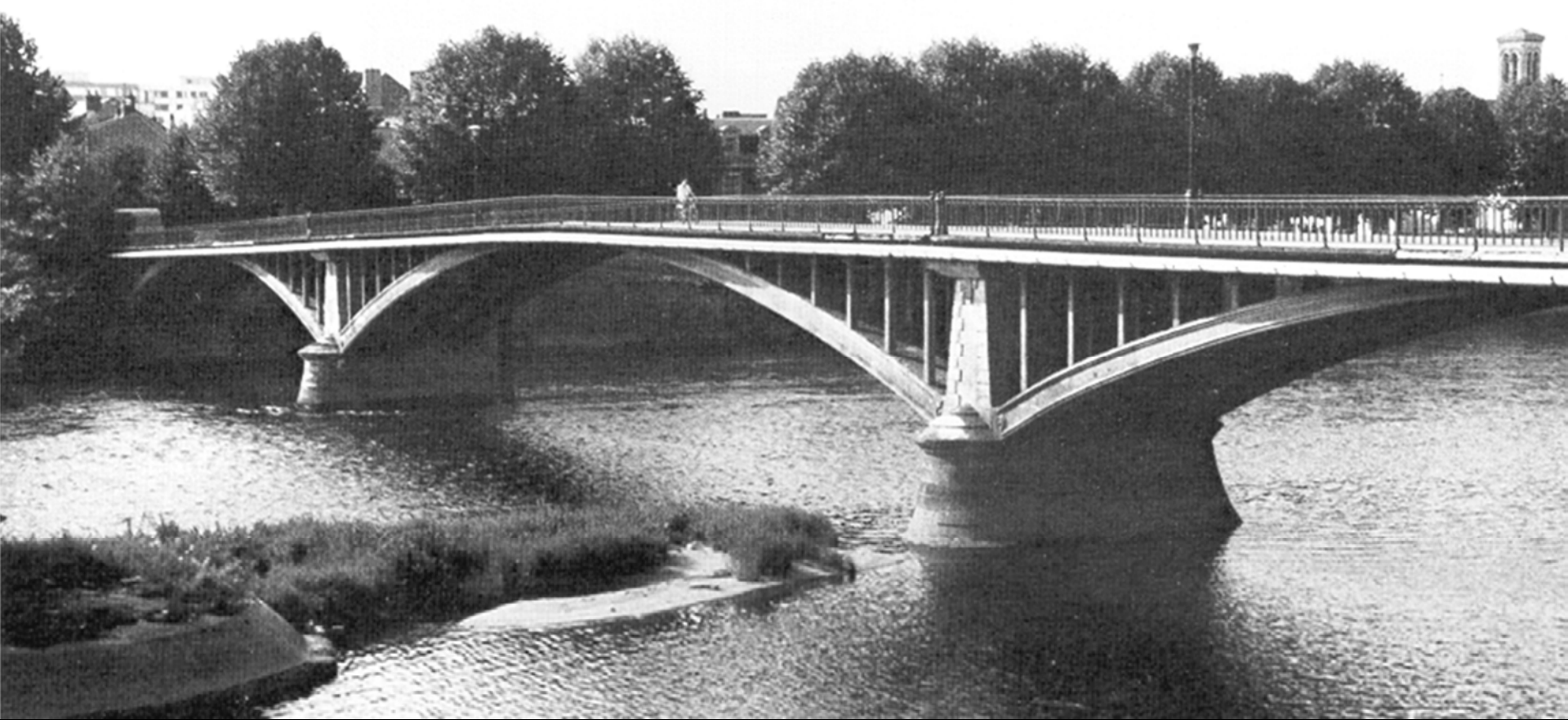
□ **Puentes ARCO:** los grandes puentes de hormigón armado fueron puentes arco

- Directos herederos de la construcción en piedra, sus primeras disposiciones longitudinales fueron **trarticuladas** y de **tablero superior**
- Al crecer los vanos y los rebajamientos, se apreció las ventajas de un mayor hiperestatismo, llegando así a los arcos **biempotrados**
- La moldeabilidad del hormigón permitió también disposiciones de **tablero intermedio o inferior**, como en los puentes metálicos



▪ Pasarela de Chazelet (1875, 16.5 m, J.Monier)

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *pont de Châtellerault* (1899, arcos de 40+50+40 m, F. Hennebique)

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *puente de Golbarde*, sobre el río Saja en Barcenaciones (1900, 30 m, E. Ribera. Sistema Hennebique)



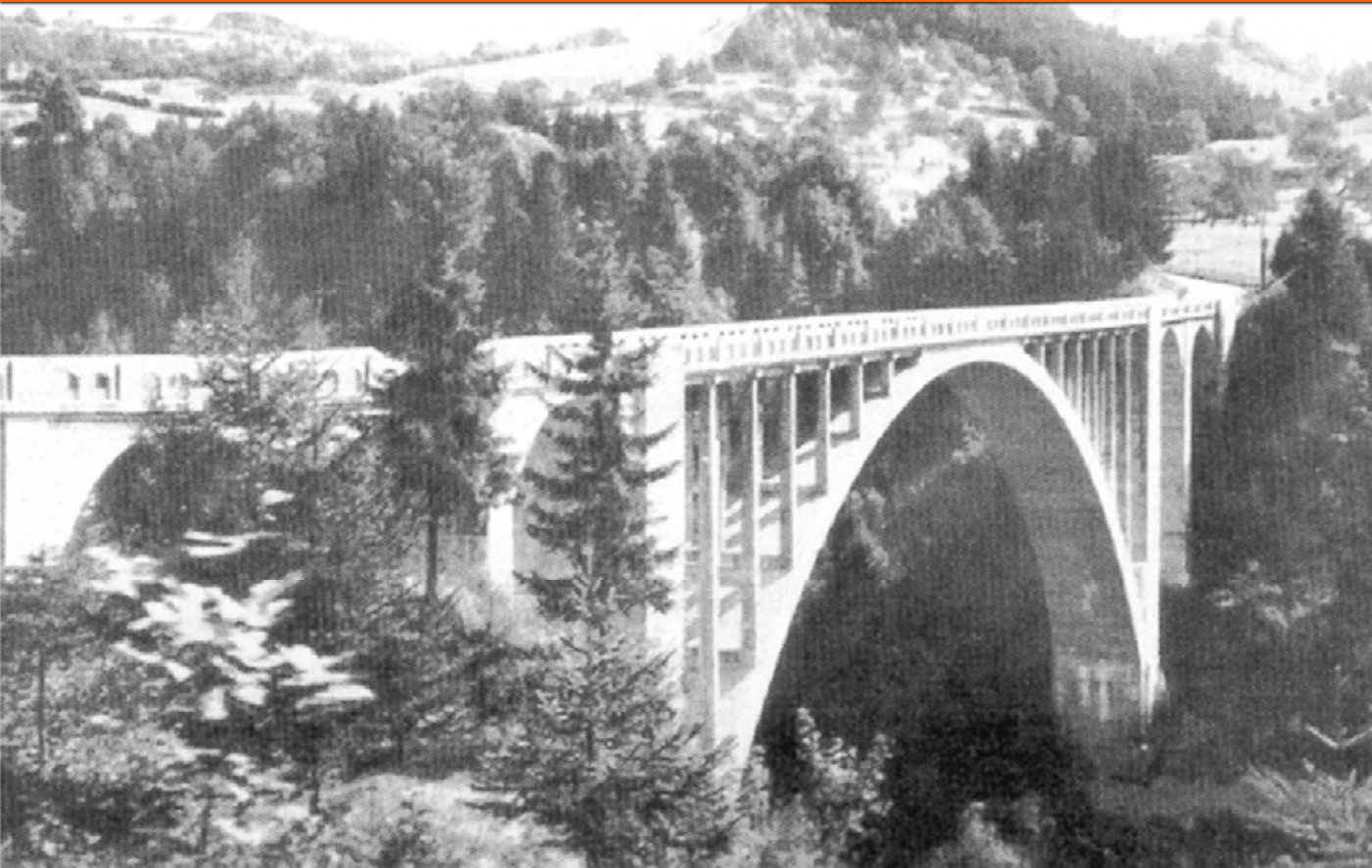
▪J. Eugenio Ribera (1864-1936)

04 Puentes de hormigón armado



■ Obras: el *punte de Golbaro* (distintas vistas)

04 Puentes de hormigón armado



■Obras: el *puente de Gmünder Tobel*, sobre el río Sitter cerca de St. Gallen (1908, 79 m, E. Mörsch, prof. ETH)

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *punte del Risorgimento*, sobre el río Tiber en Roma (1911, **100 m de luz**, G. Porcheddu. Licencia Hennebique)

04 Puentes de hormigón armado

▪Arco tímpano similar a los construidos por Wayss & Freytag con patente Hennebique 50 años antes



▪Obras: el *ponte de San Nicolò*, sobre el río Arno en Florencia (1947, 95 m, R. Morandi)

04 Puentes de hormigón armado

□ **Puentes LOSA:** : los tableros de los arcos de piedra de Séjourné (*ponte Adolfo y de los Catalanes* en particular) son un claro ejemplo de esta tipología resuelta en H.A.

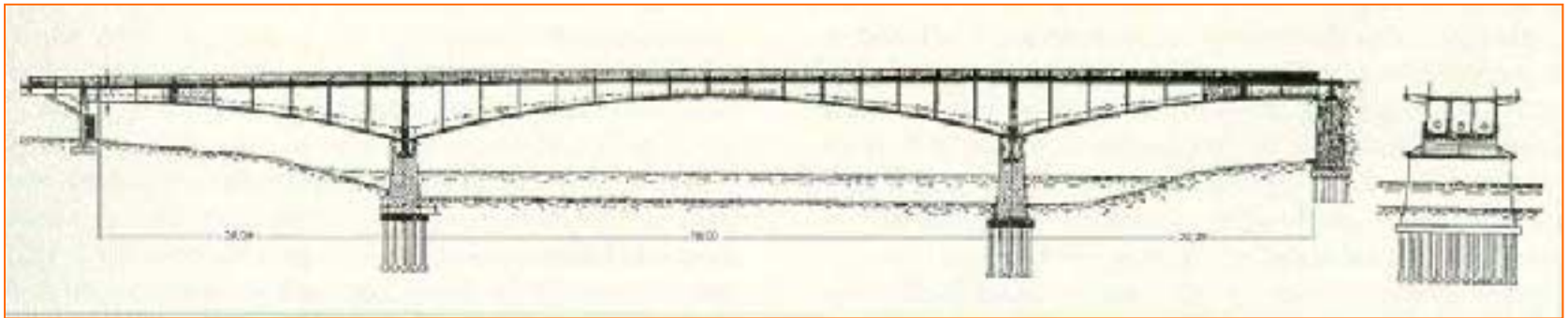


■ Obras: el tablero del “*pont des Catalans* ou *des Amidonniers*”, piso y entrevigado de hormigón armado (1910, P. Séjourné)

04 Puentes de hormigón armado

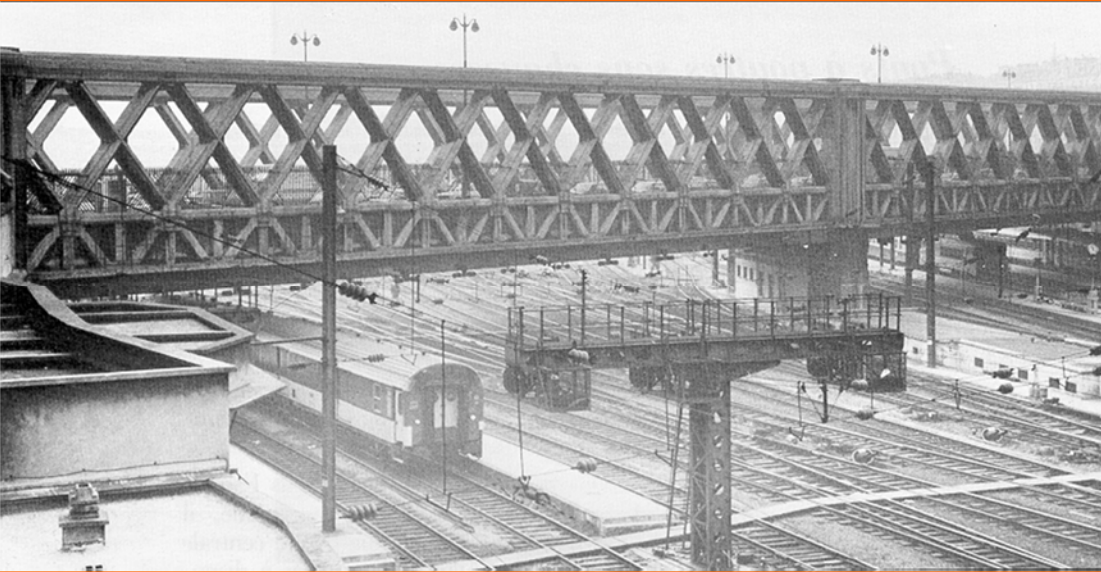
□ **PUENTES DE VIGAS**, de vanos simples o continuos, con canto constante o variable y sección transversal formada por:

- **dos vigas laterales trianguladas**, concepción singular directamente inspiradas de la construcción metálica (puente de la calle Lafayette, sobre las vías de la estación del Norte en París y puente de Ivry)
- **vigas bajo calzada**, abiertas o formando cajón (puente de Villeneuve, cantilever en su configuración original, puente del Ángel Custodio en Valencia)



- Obras: el **puente de Villeneuve-Saint-Georges** sobre el Sena (1934, reconstruido en 1940 en HP, 41+78+41 m, H. Lossier)

04 Puentes de hormigón armado



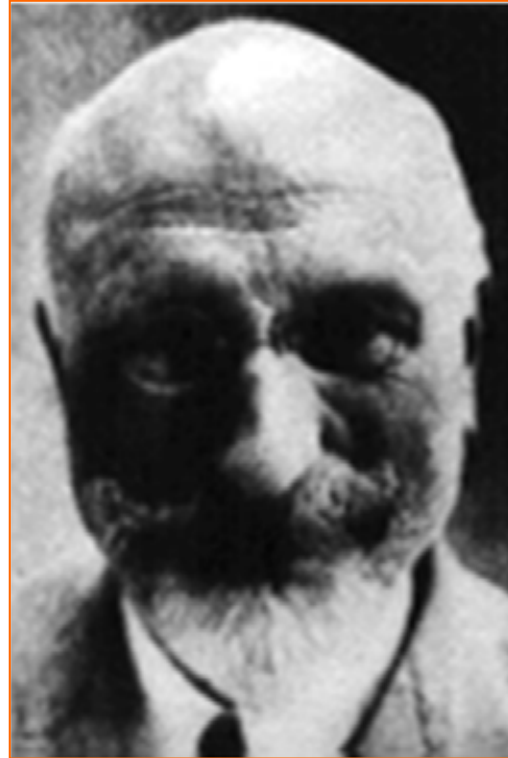
▪Obras: el *pont de la rue Lafayette* (1928, dos vanos de 72 y 77 m, A. Caquot)

04 Puentes de hormigón armado



■ Obras: el *pont d'Ivry-sur-Seine* (1930, 134.6 m)

04 Puentes de hormigón armado



Robert Maillart (1872-1940)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE Puentes DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

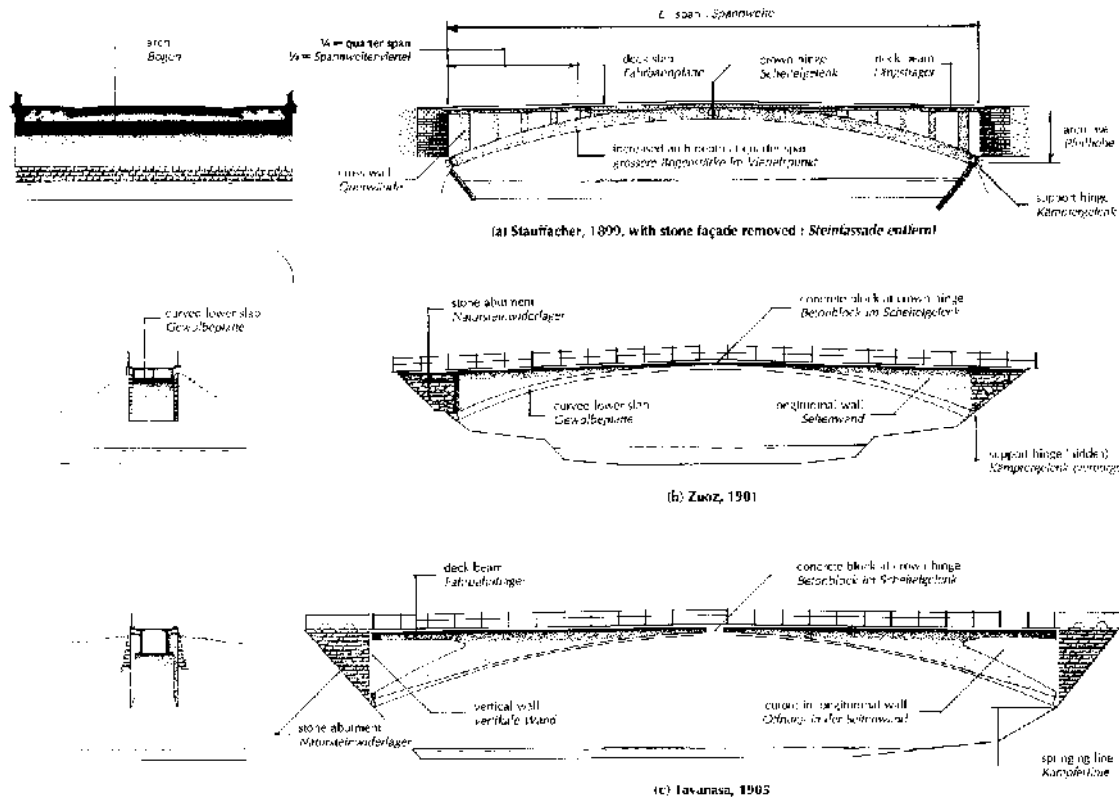


▪Obras: el *punte de Zuoz*, sobre el Inn (1901, 30 m, obsérvese el revestimiento de piedra de los estribos)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



CROSS SECTIONS AT QUARTER-SPANS
QUERSCHNITTE IN DEN VIERTELSPUNKTEN

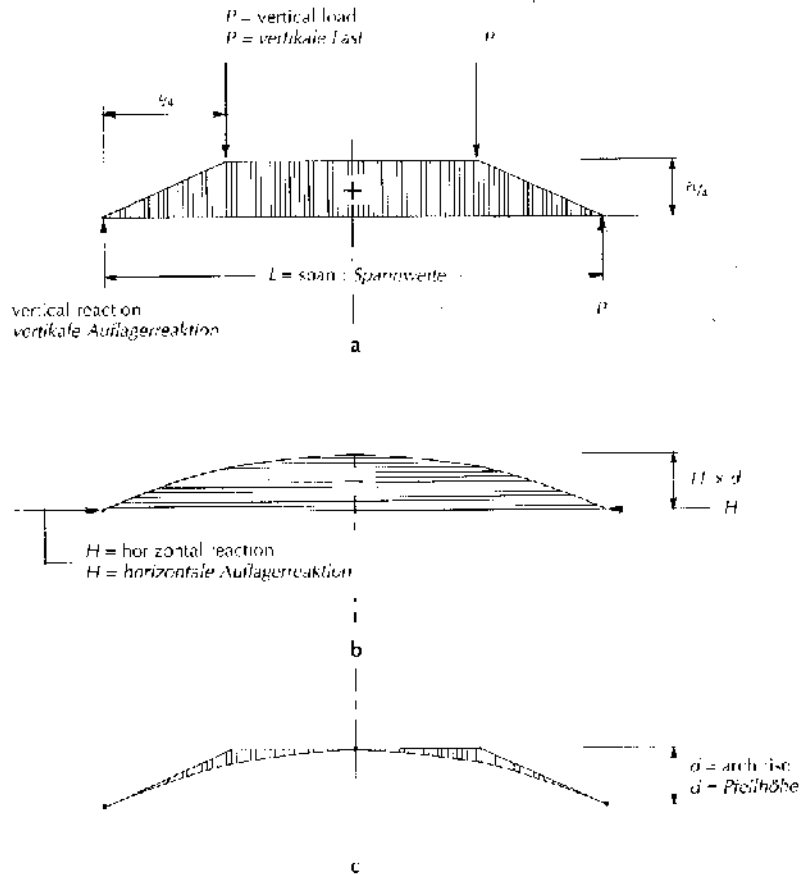
LONGITUDINAL ELEVATIONS
ANSICHT DER BRÜCKEN

• **Evolución del arco isostático.** Sin su fachada de piedra, el arco de *Stauffacher* expresa tímidamente su concepción triarticulada con un suave cambio de espesor. En *Zuoz*, el tímpano continuo resulta ambiguo al ser más alto en arranques, donde es ineficiente. En *Tavanasa*, este se recorta al llegar a estribos, reforzando la figura del arco triarticulado.

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



Encaje del arco de Tavanasa. (a) es el diagrama de momentos flectores debido al carro, (b) muestra la acción de los empujes del arco y (c) la superposición de ambos efectos, con $H=PL/4d$. Esta última figura proporciona los flectores verdaderos en el arco triarticulado para las cargas P a $L/4$ y se identifica con la forma adoptada por Maillart para el arco de **Tavanasa**: el puente resulta más resistente donde mayores son los esfuerzos.

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE Puentes DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *puente de Billwill*, sobre el Thur (1904, dos vanos de 35 m)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

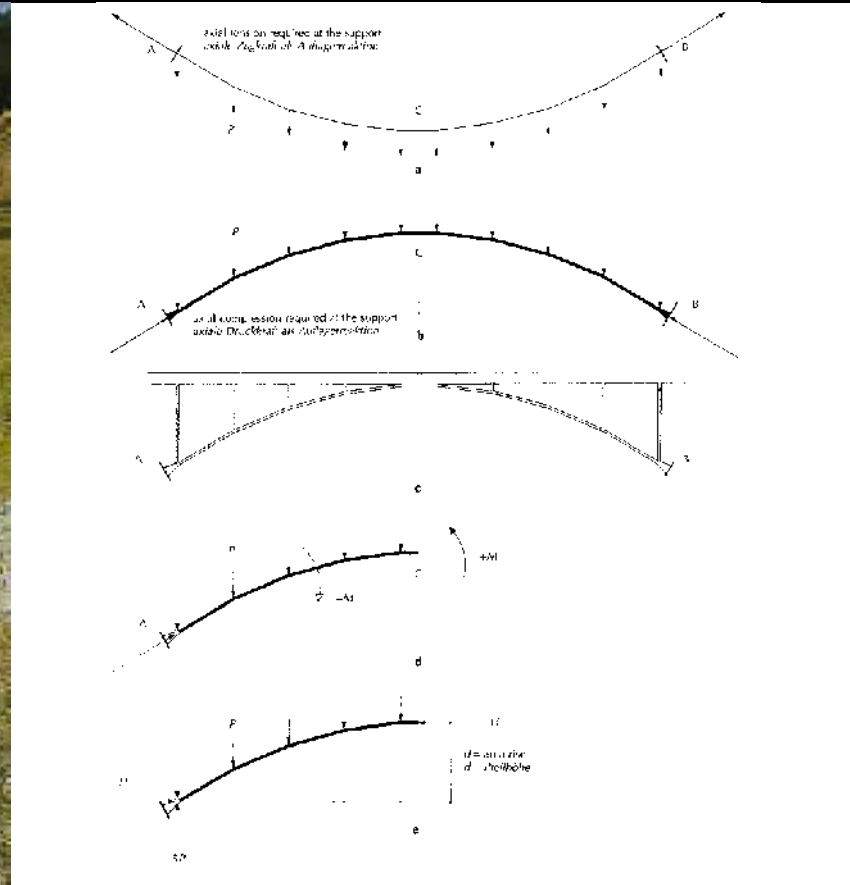


▪Obras: el *punte de Valltschielbach*, cerca de Donath (1925, 43.2 m de luz para 23 cm de espesor en clave)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



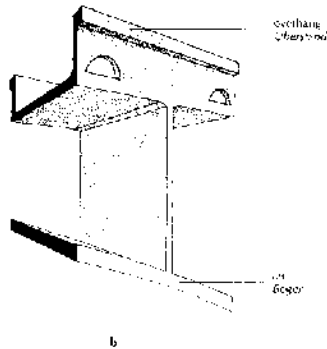
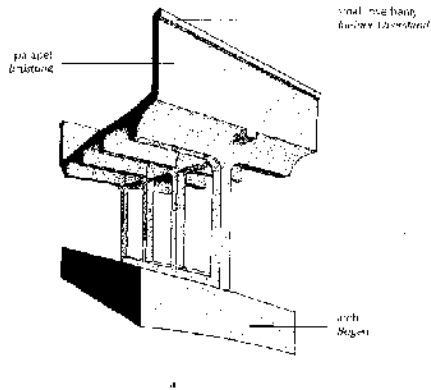
El *puente de Valltschielbach*: vista de la balaustrada y *diseños antifuniculares*. Rigen la concepción de varias obras de Maillart y recogen una idea original de W. Ritter

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

Comparación de los puentes de Aarburg y Valltschielbach. En este último, el efecto local de las sobrecargas es resistido por el tablero, de gran robustez (ver pasamanos), mientras que el arco puede diseñarse como antifunicular de las cargas, resultando muy esbelto. Esta idea rige la concepción de varias obras de Maillart (*Valltschielbach*, *Klosters*, *Winthertur*...) que recogen una idea original de Ritter que consistía en dotar al tablero de rigidez suficiente para repartir longitudinalmente las cargas y atenuar su efecto local, como en un puente colgante



<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE Puentes DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪ Vistas del *punte de Schwandbach*, en las que se aprecia perfectamente la correspondencia formal con el *punte de Klosters* (la adaptación a la curvatura del tablero se resuelve con los tabiques transversales)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



■Obras: el *puente de Salginatobel* (1930, 90 m)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



■Obras: el *punte de Salginatobel*, vista longitudinal desde el arranque, fases de la cimbra de **Richard Coray** y descimbrado

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▀ Obras: el *punte de Spital*, sobre el Englisten (1931, dos arcos decalados longitudinalmente 3 m inducen la inclinación variable de las riostras)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *puente sobre el Rossgaben*, cerca de Schwarzenburg (1932, 82 m)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *ponte sobre el Rossgraben*, vista inferior

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *punte de Felsegg*, sobre el Thur (1933, 72 m)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▀Obras: el *punte de Felsegg*, vista inferior de los dos arcos, de las rótulas en arranques y vista inferior del tablero

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

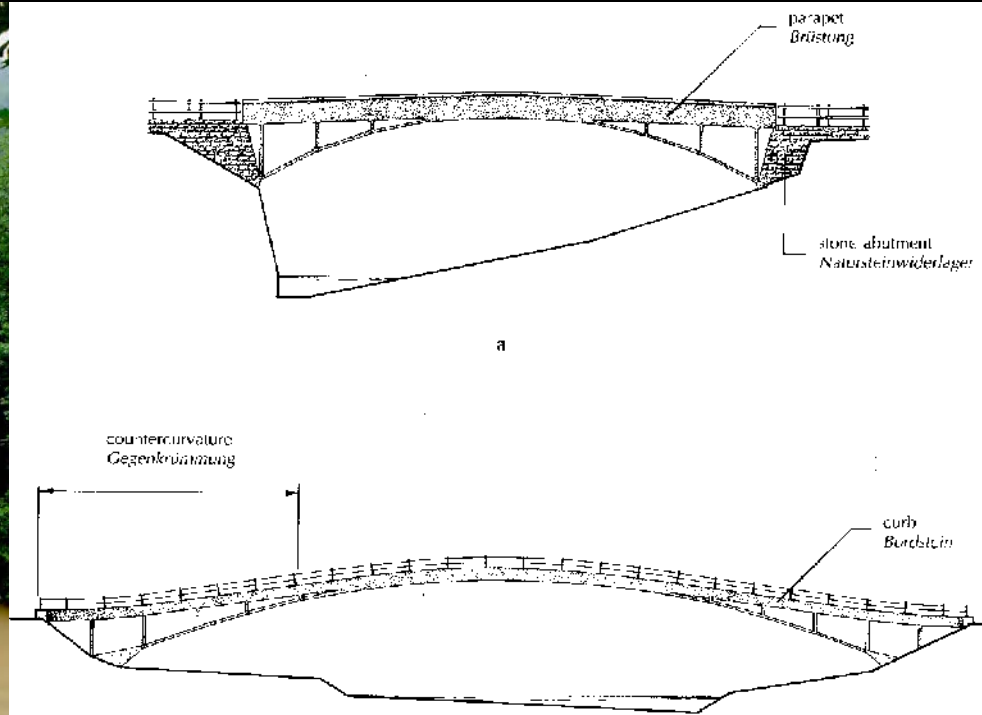


▪ Obras: la *pasarela de Winthertur*, sobre el Töss (1934, 38 m)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



Comparación de las pasarelas de **Ladholz** (1931) y **Töss** (1934). Los estribos forrados de piedra y la excesiva rigidez del tablero, reforzada por la discontinuidad de las defensas (pretil macizo prolongado con barandilla metálica) dejan paso a un diseño mucho más ligero y armonioso en la **pasarela Winthertur**

▀Obras: la **pasarela de Winthertur**, arco flexible y tablero rígido de trazado curvo en alzado. El posterior encauzamiento del río no la ha favorecido. Restaurada en 2010

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *punte de Vessy*, sobre el Arve (1935, 56 m)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▀ Obras: el *ponte de Vessy*, detalle de las rótulas en arranques y organización interna de la estructura

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▀Obras: el *ponte de Vessy*, aspecto actual (pintura de la estructura y conducciones suspendidas del tablero)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: *puente sobre el ferrocarril en Lachen* (1940, dos arcos en cajón, el apoyo del tablero solo requiere un tabique sobre arranques)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

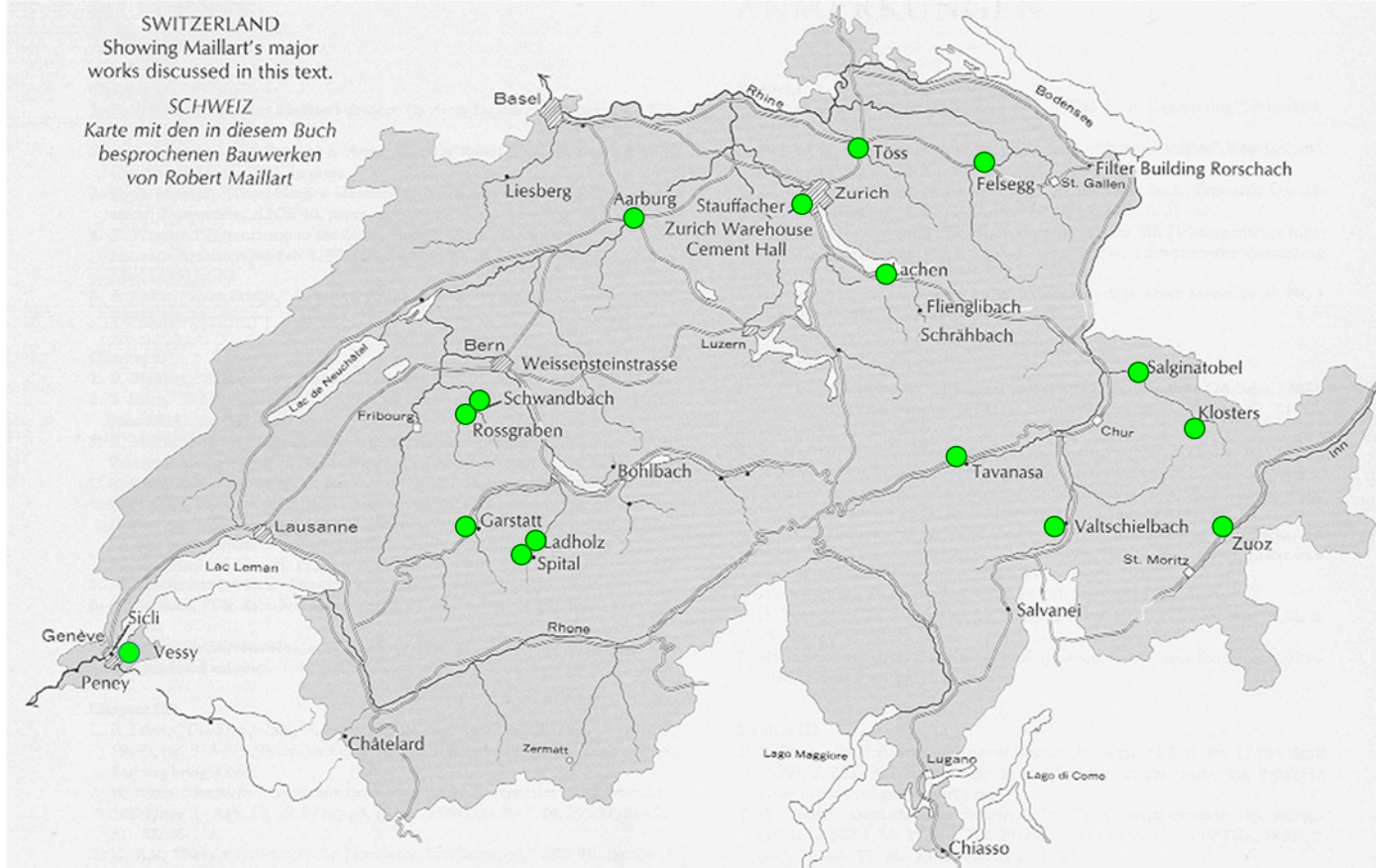


▪Obras: el *punte de Garstatt*, sobre el Sime (1940, 32 m)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▀ Obras: el *puente de Aversserrsheim* (1960, un claro homenaje de Christian Menn a Robert Maillart)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *punte sobre el Valse-Rin*, cerca de Uors (Christian Menn reinterpreta el “arco sin rigidez” de Robert Maillart, al igual que en los puentes de Reichenau y Viamala)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE Puentes DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *punte de Reichenau* sobre el Rin (Suiza, 1964, 100 m de luz, C. Menn)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *puente de Viamala* sobre el Rin (Suiza, 86 m, C. Menn)

<4.2.1 Robert Maillart>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



Eugène Freyssinet (1879-1962)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE Puentes DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

- ❑ Las **bóvedas de hormigón armado** Le interesaron desde 1911 a 1930, volcándose entonces en el **desarrollo del hormigón pretensado**. Desde el principio, se distinguió como un constructor sin par, introduciendo elementos, técnicas y conceptos rabiosamente innovadores y atrevidos:
 - Uso de hormigones muy ricos en cemento (de 450 a 500 kg/m³) para poder trabajar a más de 10 Mpa, resistencia **triple** de la entonces usual
 - Desarrollo de la **rótula plástica**
 - Adopción del **arco hiperestático** e intuición del comportamiento **anelástico** del hormigón (en contra de lo prescrito por el reglamento francés de 1906): *“Tuve pronto la certeza que mis arcos, demasiado bien articulados y demasiado deformables, pandeaban en el sentido vertical”* (E. Freyssinet, invierno de 1911)
 - Diseño de **tímpanos triangulados** en hormigón armado
 - Invención de los **vibradores** y de los **gatos planos** para la puesta en obra del hormigón, su descimbrado y la creación de presolicitaciones

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

▪ Esta estructura, análoga a la del *ponte del Veudre* (1911, vano máximo de 72.5 m), se dimensionó haciendo trabajar el hormigón a **10 MPa**, cuando 20 años antes no se sobrepasaba los **2.5 MPa** (en fábrica de piedra se podía estar en **1.5 MPa**)



▪ Obras: el *ponte del Boutiron*, sobre el Allier (1912, arcos triarticulados de 77 m con tímpanos triangulados, E. Freyssinet)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *ponte del Boutiron*, sobre el Allier, cerca de Vichy (detalle de la balastrada y de la junta del tablero sobre pilas)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

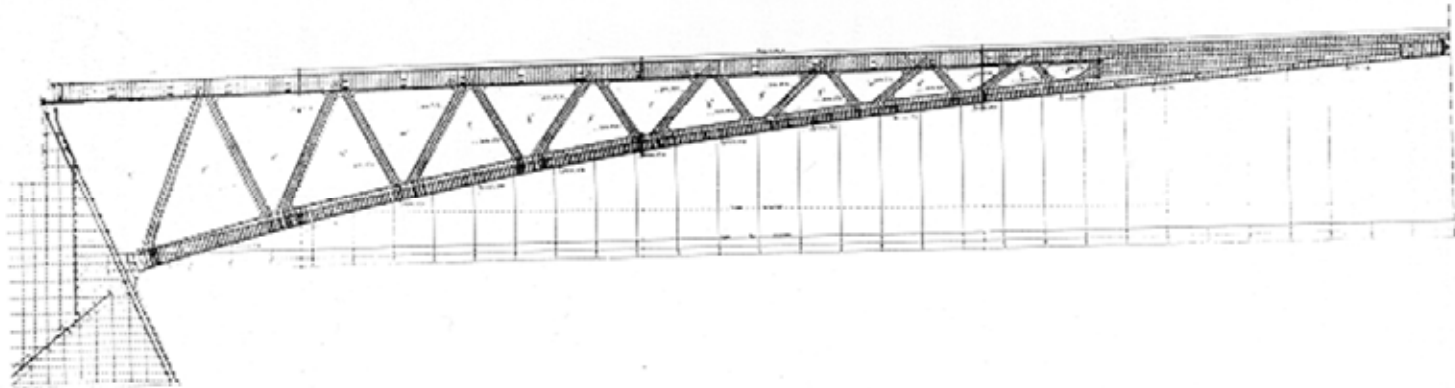
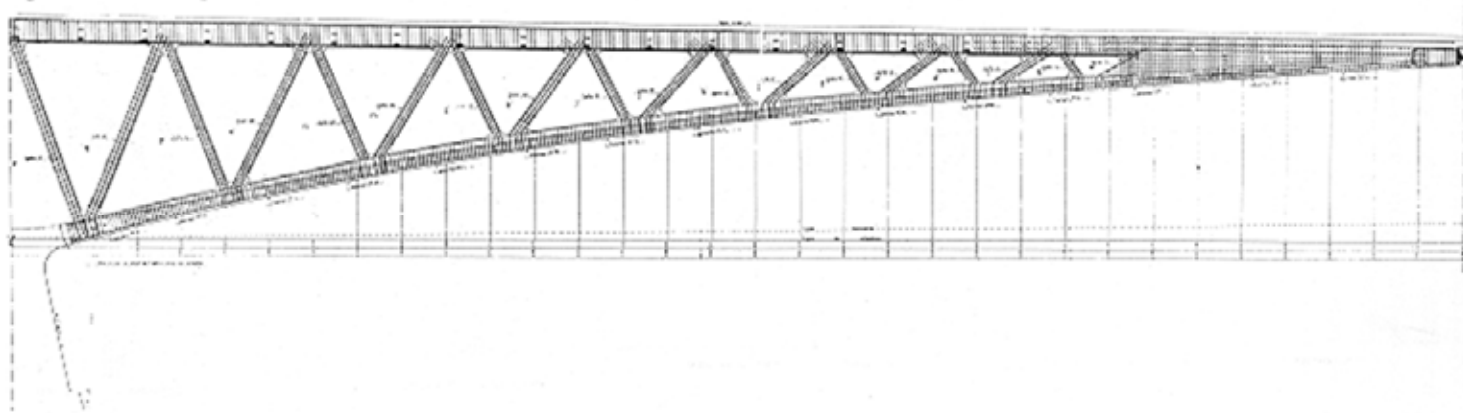


Fig. 28. Planos del puente sobre el río Veurdre. Secciones longitudinales. Ancho columna 185 mm.



▪ Planos del *puente del Veurdre* (armado en secciones longitudinales)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

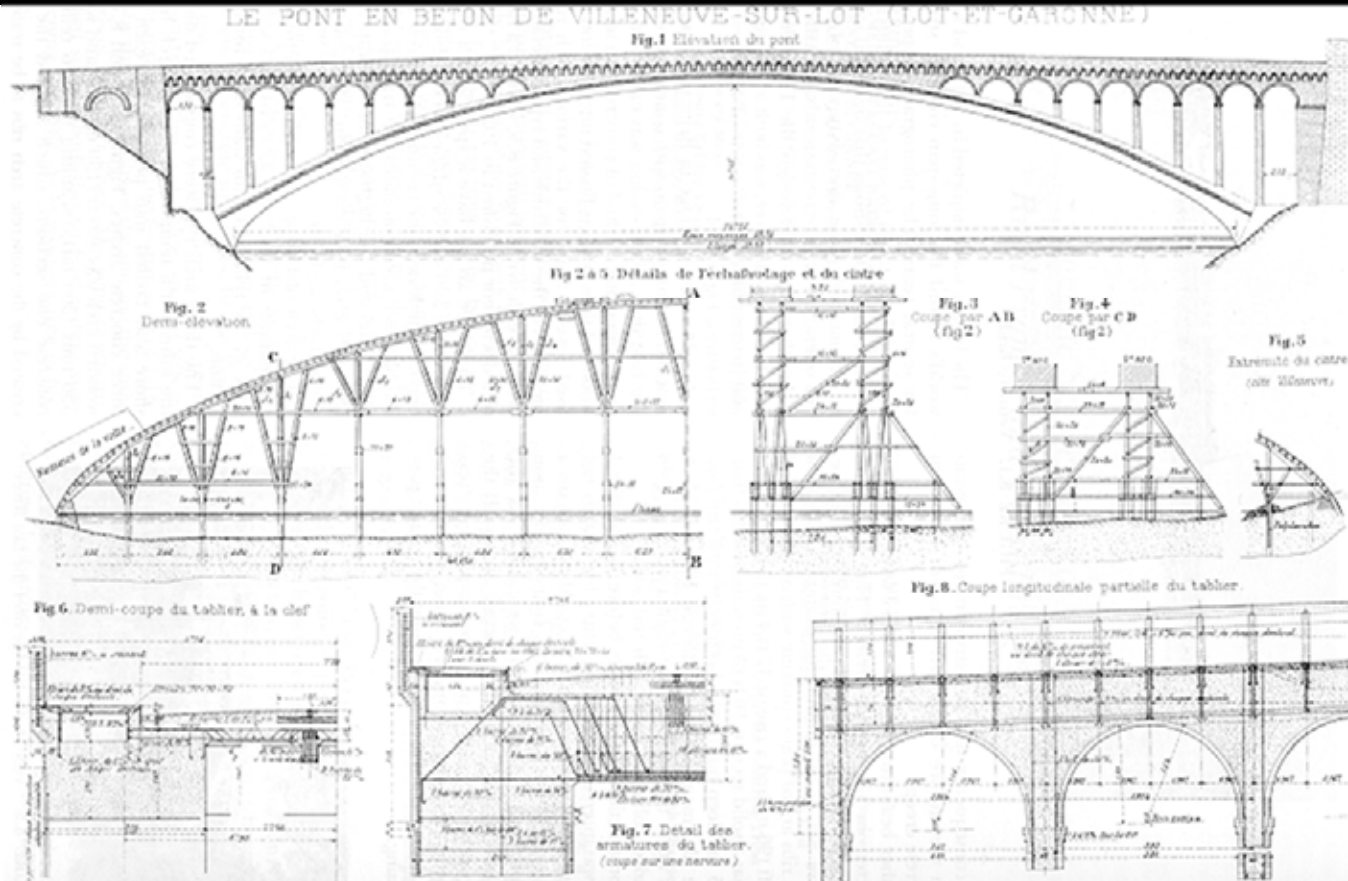


▪Obras: el *puente de Villeneuve sur Lot* (1919, arco de hormigón en masa de 97 m, E. Freyssinet)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▀ Obras: el *ponte de Villeneuve sur Lot*: alzado, detalles del tablero y de la cimbra de madera

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

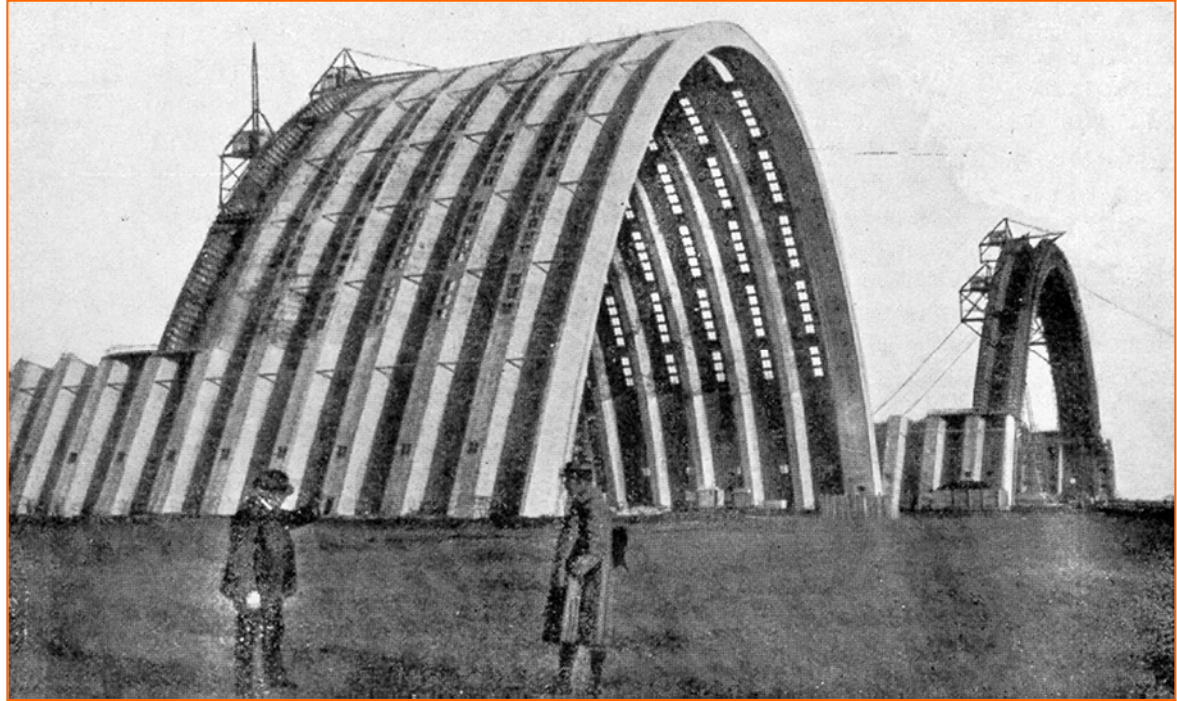
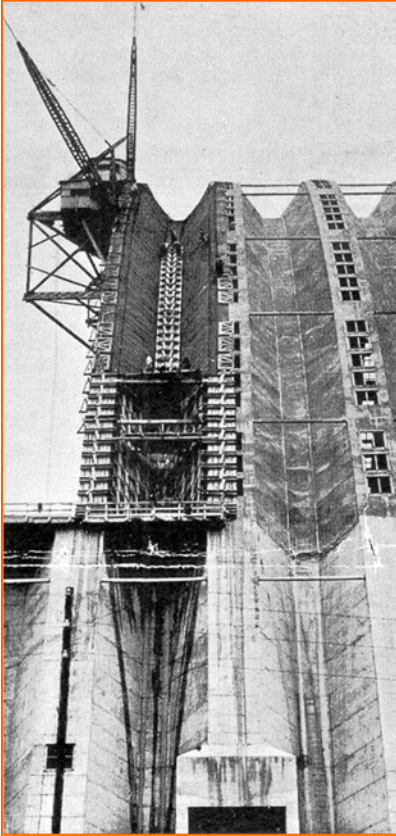


▀ Obras: los *hangares para dirigibles del aeropuerto de Orly* (1923, destruidos en 1944, 70 m de luz, E. Freyssinet)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



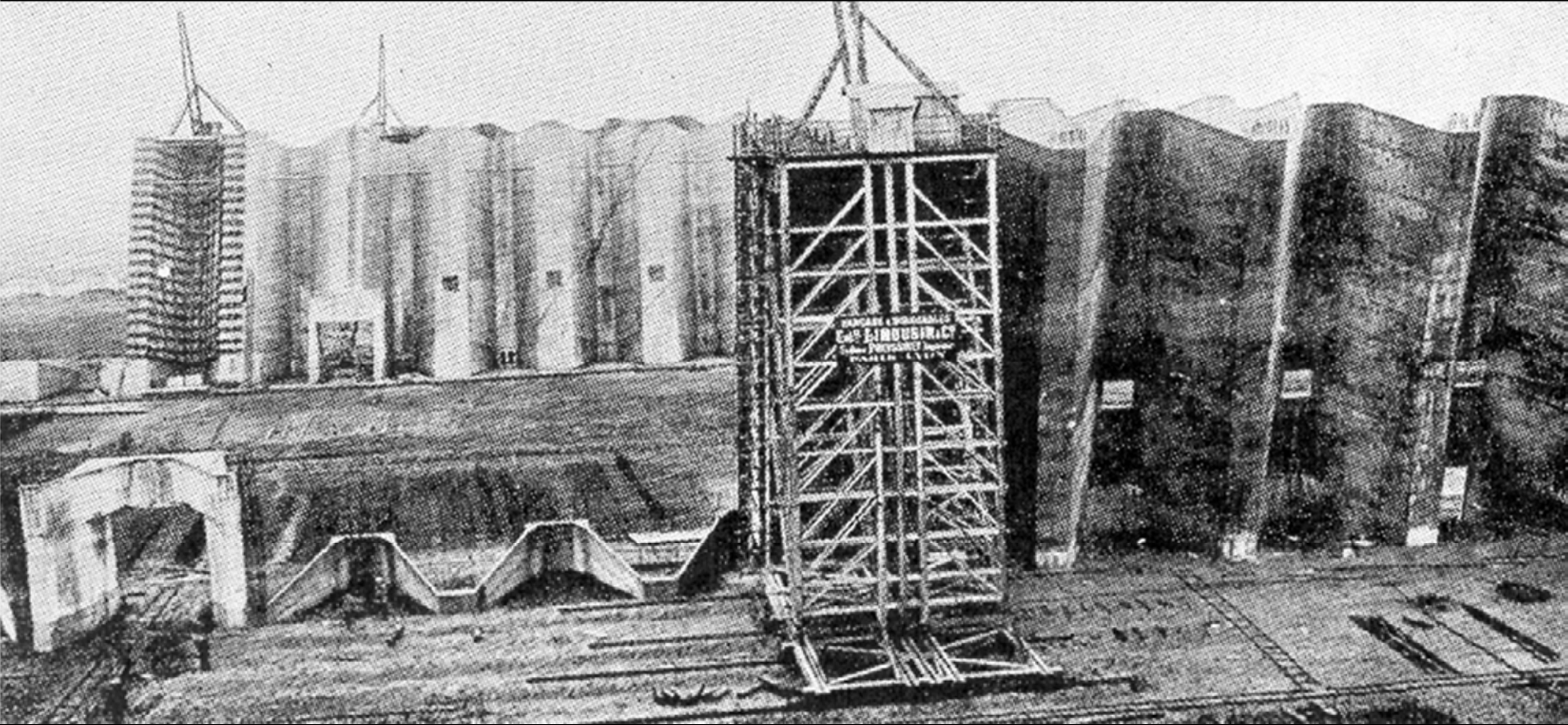
▪ **Detalles de su construcción**, con arranques de la bóveda en voladizo y parte principal cimbrada por roscas. De directriz parabólica, la bóveda es una lámina plegada de **9 cm de espesor**, con lucernarios moldeados en las caras superiores de la cubierta

▪ Obras: los *hangares para dirigibles del aeropuerto de Orly*

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE Puentes DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

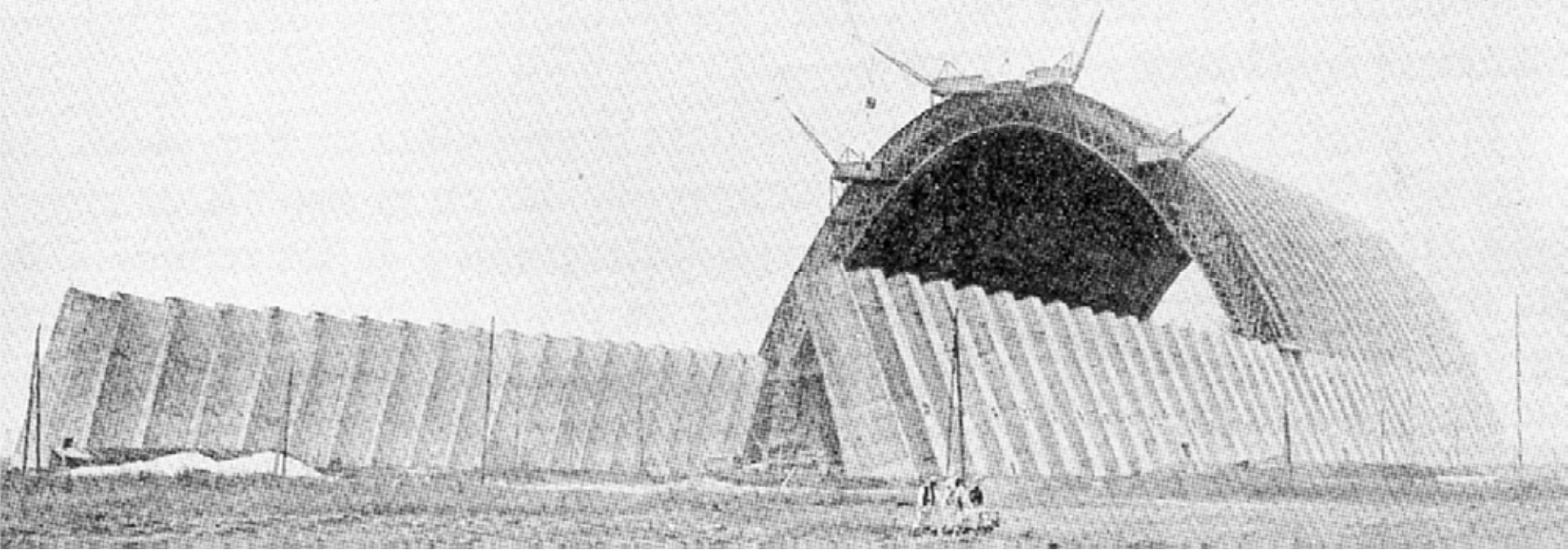


■Obras: los *hangares de Orly* en construcción, entre 1921 y 1923

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

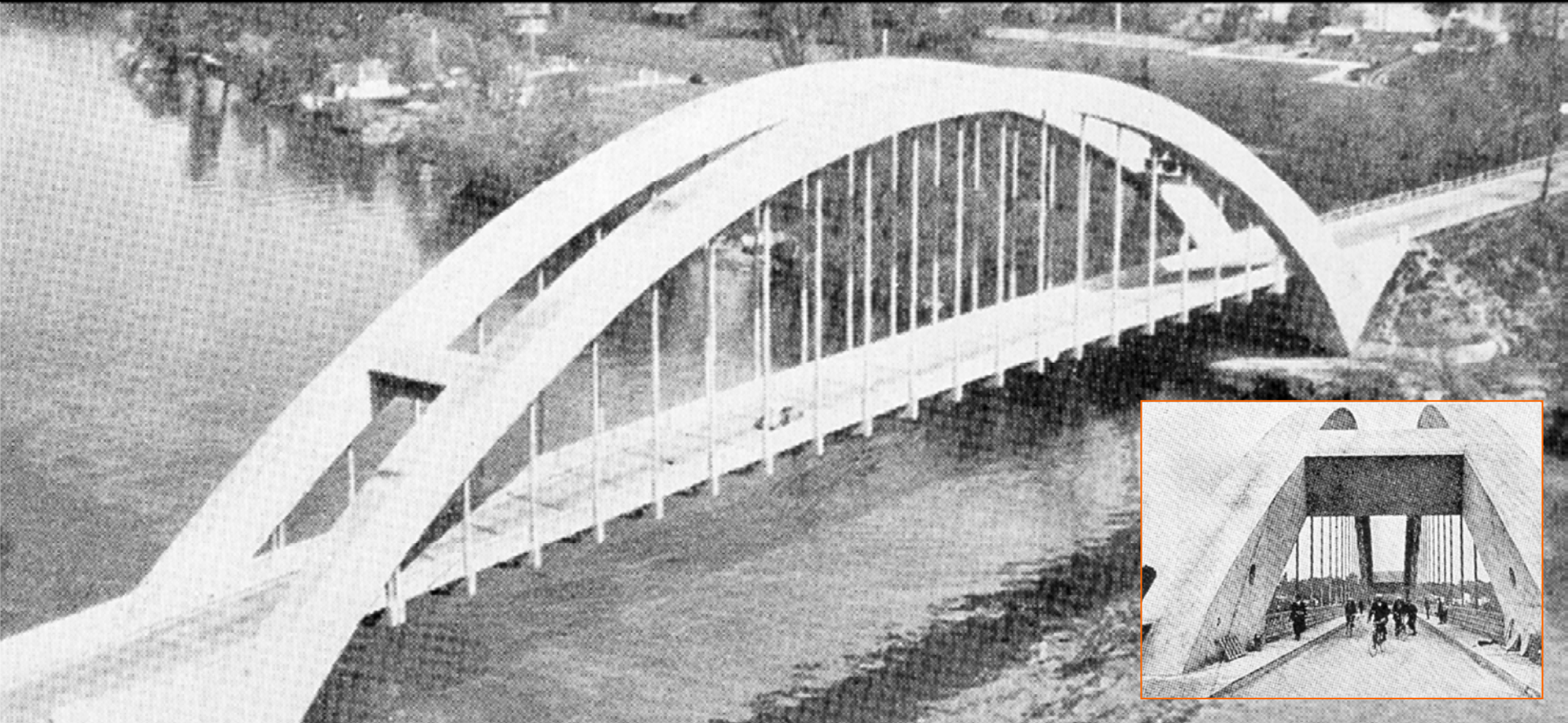


▪Obras: los *hangares de Orly* en construcción, entre 1921 y 1923

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



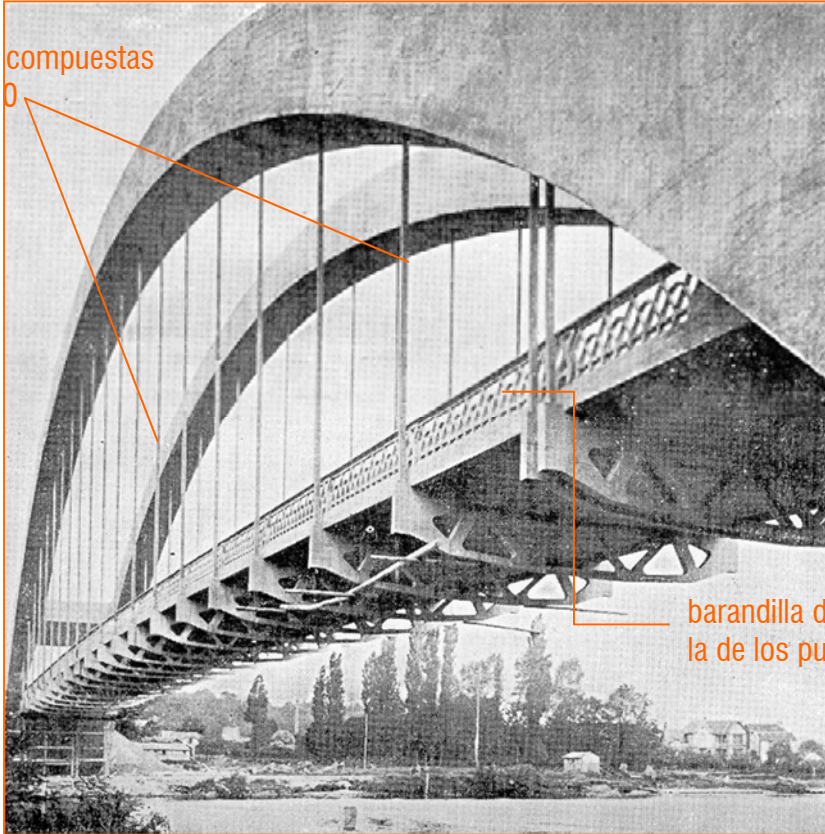
▪Obras: el *puente de Saint Pierre du Vauvray* sobre el Sena (1923, arco biempotrado con tablero intermedio de 131.8 m, dinamitado en 1940 y reconstruido entre 1941 y 1946, E. Freyssinet)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

péndolas compuestas por 40Ø10



barandilla de hormigón armado, análoga a la de los puentes del Veudre y del Boutiron



■ Obras: el *ponte de Saint Pierre du Vauvray*, vista inferior de la estructura original y de su reconstrucción

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE Puentes DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



- Obras: el *puente Albert Louppe*, sobre el Elorn, en Plougastel (1930, FC y carretera, tres arcos biempotrados de 186 m, E. Freyssinet)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

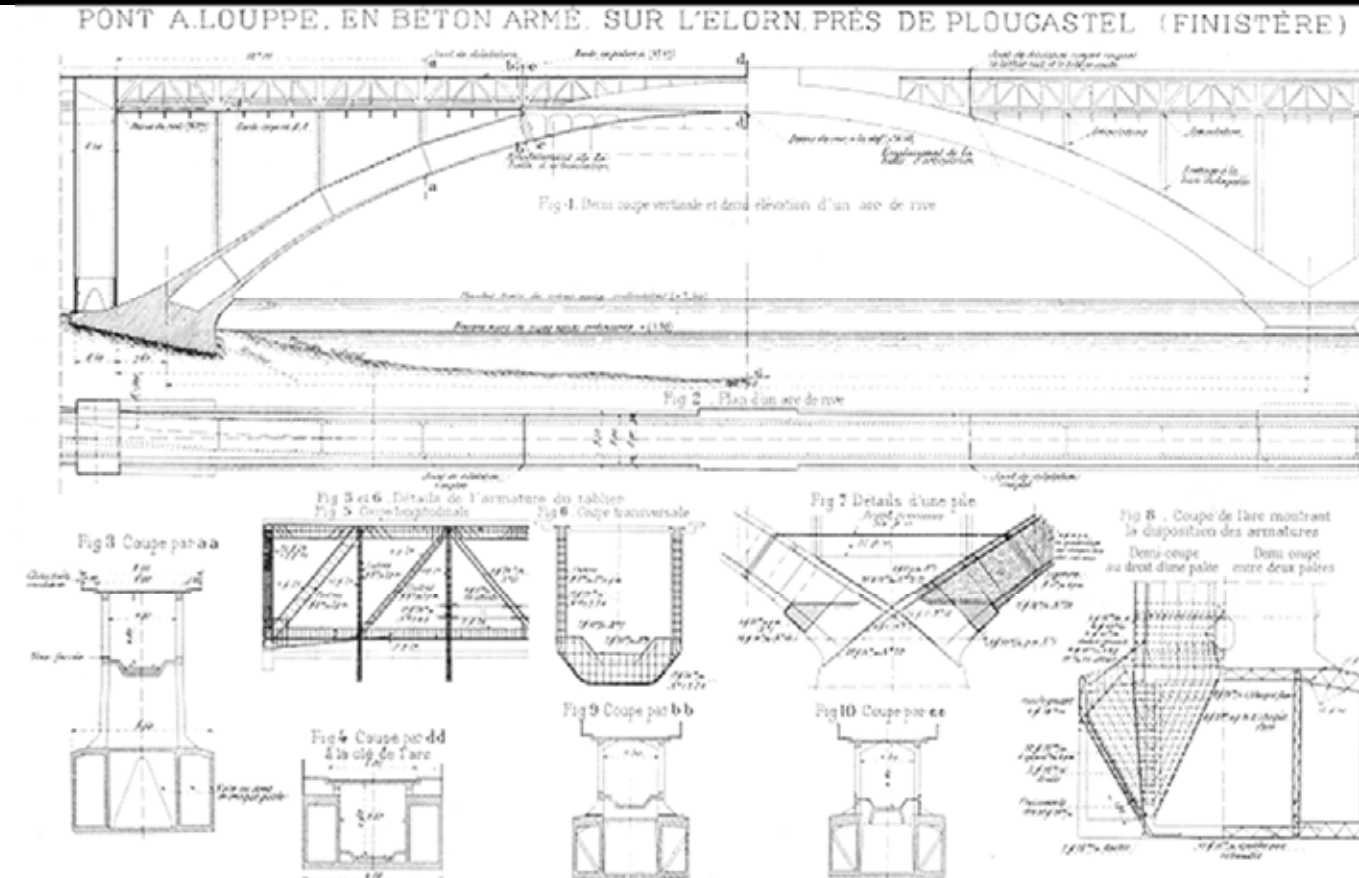


▪Obras: el *puente Albert Louppe* (perspectiva desde el arranque del primer arco, cimbra flotante y distintas fases de la construcción de los arcos)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



•Obras: el *punte Albert Louppe*, en Plougastel: esquema de un vano típico y detalles estructurales (publicado en 1930)

<4.2.2 Eugène Freyssinet>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

▪ **Arcos tímpano:** esta solución, ya utilizada por Maillart (período 1901-1904) y por Hennebique (puentes sobre el Ourthe y del Risorgimento, en 1904 y 1911), da lugar a alzados similares a los de los puentes antiguos, pero con rebajamientos y luces más osados, que pueden confundirla formalmente con la **viga de canto variable**

▪ **Bóveda de hormigón armado revestida de piedra.** En general, para el dimensionamiento se despreciaba la colaboración de los tímpanos en la resistencia global



▪ **Obras:** el *pont de la Tournelle*, sobre el Sena en París (1928, arco tímpano de 74 m de luz, L. Deval)

<4.2.3 Otras obras de este mismo período>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

▪ **Arcos biarticulados de tablero intermedio:** el buen aspecto de estas estructuras depende en gran medida de la conexión transversal entre arcos, estructuralmente deseable pero de solución formal frecuentemente desafortunada



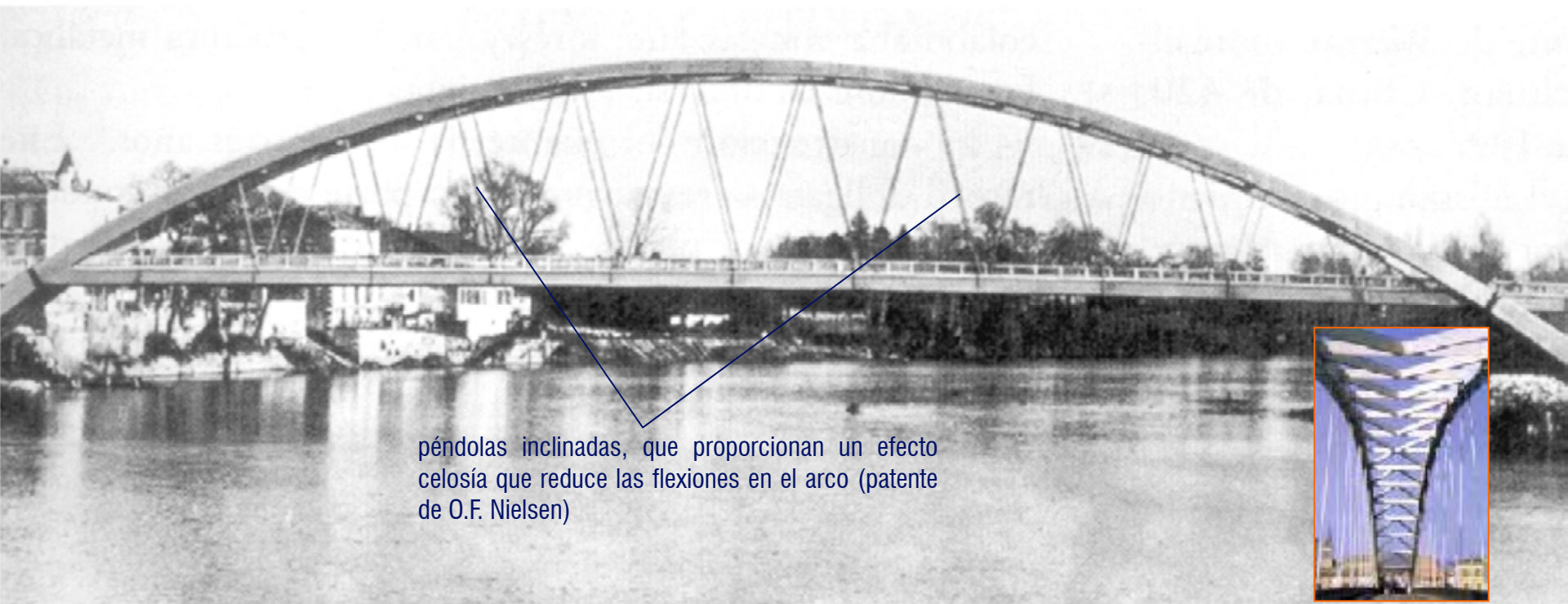
▪ Obras: el *ponte de la Roche-Guyon* sobre el Sena (1934, destruido en 1940, 161 m, N. Esquillan)

<4.2.3 Otras obras de este mismo período>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

▪ **Arcos de tablero inferior (Bow-string):** en estos puentes, el tablero actúa como *tirante* del arco, resultando condiciones globales de simple apoyo. Sigue siendo válido el comentario anterior sobre el *arriostramiento entre los arcos*



péndolas inclinadas, que proporcionan un efecto celosía que reduce las flexiones en el arco (patente de O.F. Nielsen)

▪ Obras: el *ponte de Castelmoron*, sobre el río Lot (1933, 143 m, Christiani & Nielsen)

<4.2.3 Otras obras de este mismo período>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



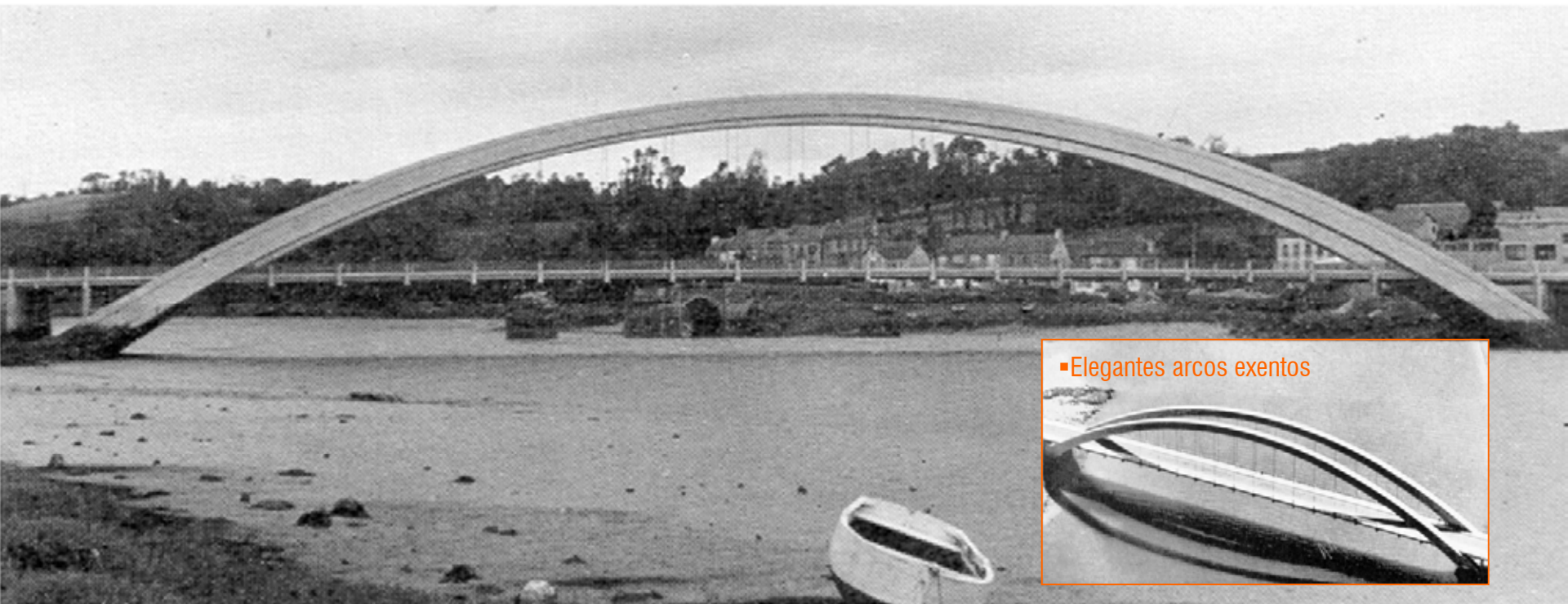
▪Obras: el *ponte de la Coudette*, sobre el río Gave de Pau (1943, 111.28 m, N. Esquillan)

<4.2.3 Otras obras de este mismo período>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

▪ **Arcos biempotrados de tablero intermedio:** esta disposición fue brillantemente utilizada por Eugène Freyssinet en el puente de Saint Pierre du Vauvray. Aprovechando la mayor coacción en arranques, se puede incluso prescindir del arriostramiento superior entre arcos



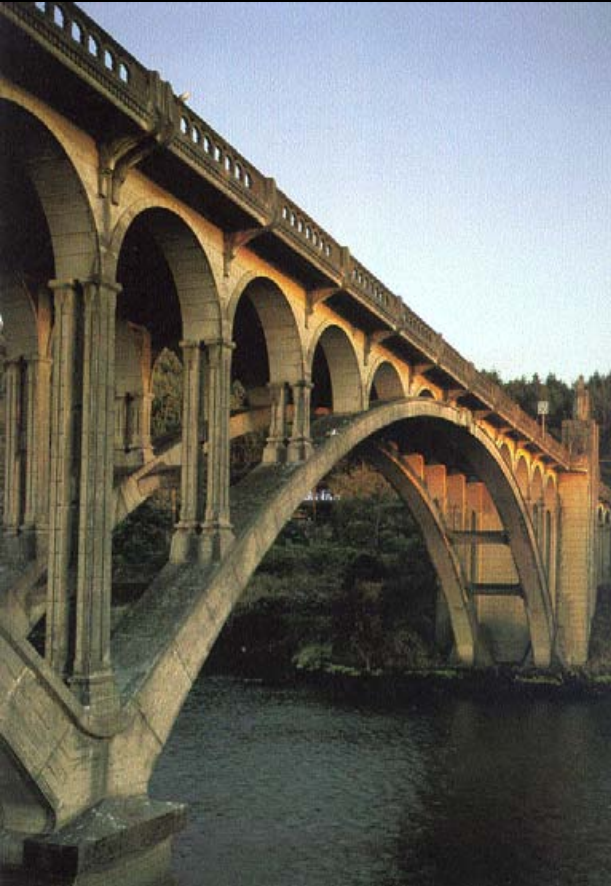
▪ Elegantes arcos exentos

▪ Obras: el *pont Canada* en Tréguier, sobre el estuario del Jaudy (1954, 153 m)

<4.2.3 Otras obras de este mismo período>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



□ Los puentes de Conde B. Mc Cullough en la *Oregon Coast Highway (US Route 101)*

- Ingeniero de puentes del estado de 1919 a 1935
- Supervisa la construcción de más de un centenar de puentes dentro del programa de obras públicas de Franklin D. Roosevelt
- Su mayor legado consiste en los diez puentes principales de la *US Route 101*
- De estilo ecléctico, combina hormigón y acero según la importancia de los vanos

Rogue River Bridge (1932, Gold Beach)
Cape Creek Bridge (1932, Florence)
Alsea Bay Bridge (1936, Waldport)
Siuslaw River Bridge* (1936, Florence)
Umpqua River Bridge (1936, Reedsport)
Yaquina Bay Bridge* (1936, Newport)
Coos Bay Bridge* (1936, North Bend)

(*) vano principal en acero



▪ Obras: el *puente de Rogue River* (Gold beach, Oregon, 1932)

<4.2.3 Otras obras de este mismo período>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

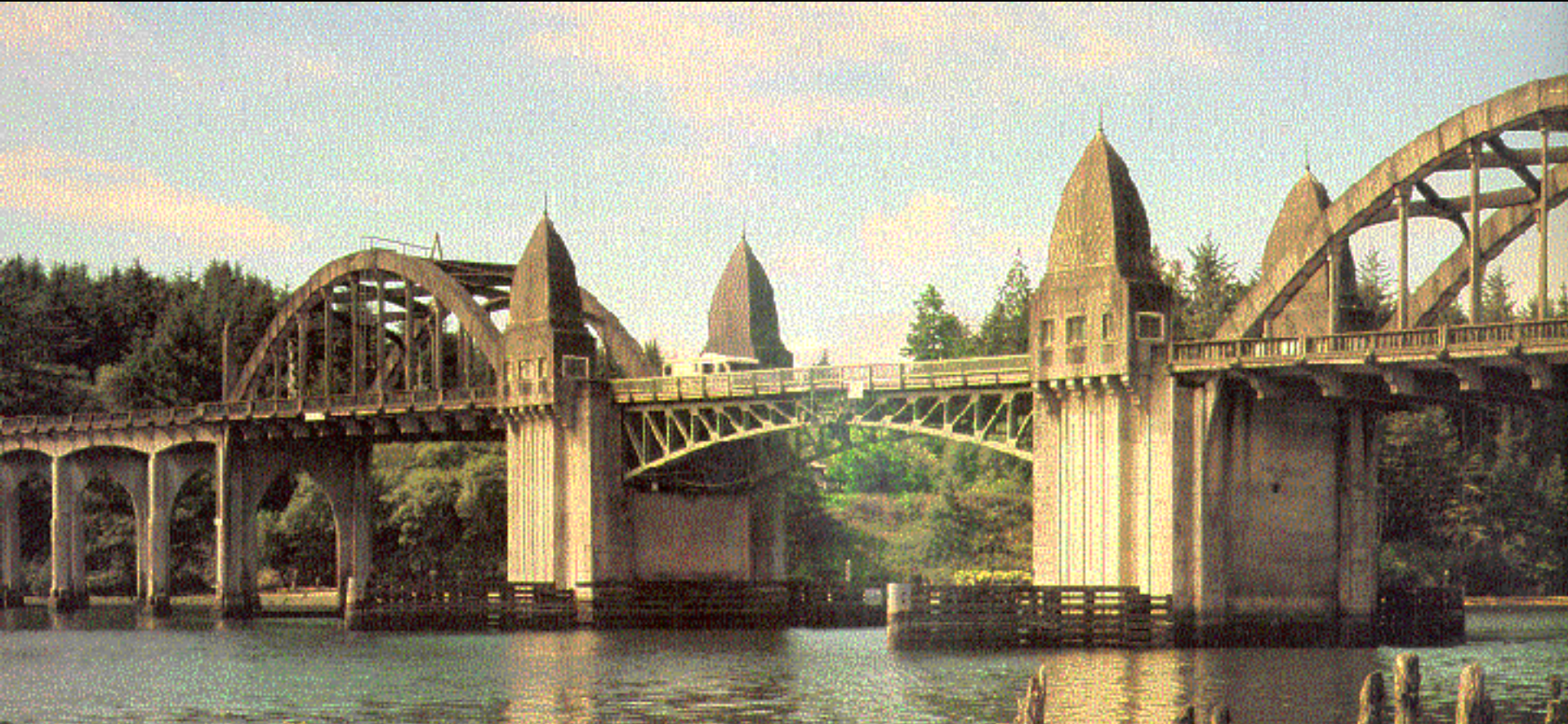


▪Obras: el *punte de Asea Bay* (Walport, Oregon, 1936)

<4.2.3 Otras obras de este mismo período>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado



▪Obras: el *punte de Siuslaw River* (Florence, Oregon, 1936)

<4.2.3 Otras obras de este mismo período>

<4.2 DIVERSOS TIPOS DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO>

04 Puentes de hormigón armado

❑ **PUENTES ARCO.** Si la topografía y la geología son favorables y **siempre que se racionalice el proceso de hormigonado de la bóveda** (*adaptación de las técnicas de construcción de los arcos metálicos, prefabricación...*) esta solución puede ser económicamente válida para luces grandes, pongamos de 100 a 500 m, compitiendo directamente con:

- *vanos de hormigón pretensado contruidos por voladizos sucesivos (100 a 300 m)*
- *vanos rectos y arcos de acero (100 a 500 m)*
- *puentes atirantados*

❑ **PEQUEÑAS OBRAS DE FÁBRICA.** Los **pontones, losas, pórticos** y **marcos** pueden aplicarse en vanos cortos ($L < 15$ m)

❑ **PISOS, SUBESTRUCTURAS Y CIMENTACIONES.** En estos elementos estructurales, el uso del hormigón armado es inevitable

04 Puentes de hormigón armado



□ El primer intento de minoración de la repercusión del **coste de las cimbras** de madera se debe al ingeniero checo **Joseph Melán**, quien decidió utilizar la armadura del arco como **autocimbra**, aun a costa de su sobredimensionamiento

▪Ejemplo: **autocimbra del puente de Echelsbach**, sobre el río Ammer en Alemania, según el procedimiento inventado por el ingeniero checo Joseph Melán en 1898

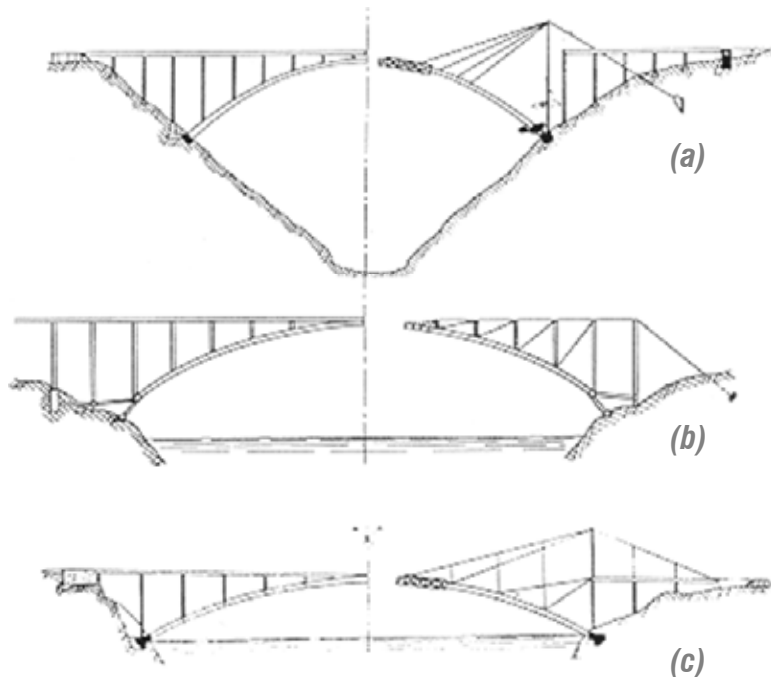


□ También **E. Freyssinet** tuvo dos aportaciones en este sentido: la **reutilización** de una gran cimbra en Plougastel y la construcción parcial de la bóveda **avanzando en voladizo** (Orly, La Guaira)

▪Construcción parcial por voladizos atirantados y cimbra para el tramo central, reutilizable en los restantes viaductos de la autopista Caracas-La Guaira

04 Puentes de hormigón armado

□ Finalmente, la **adaptación** al hormigón armado de la construcción de **grandes arcos metálicos por voladizos sucesivos**, iniciada por J.B. Eads y G. Eiffel, así como la **prefabricación de tablero, arco por dovelas** (Gladesville)... dan cierta vigencia a estas construcciones naturalmente bellas

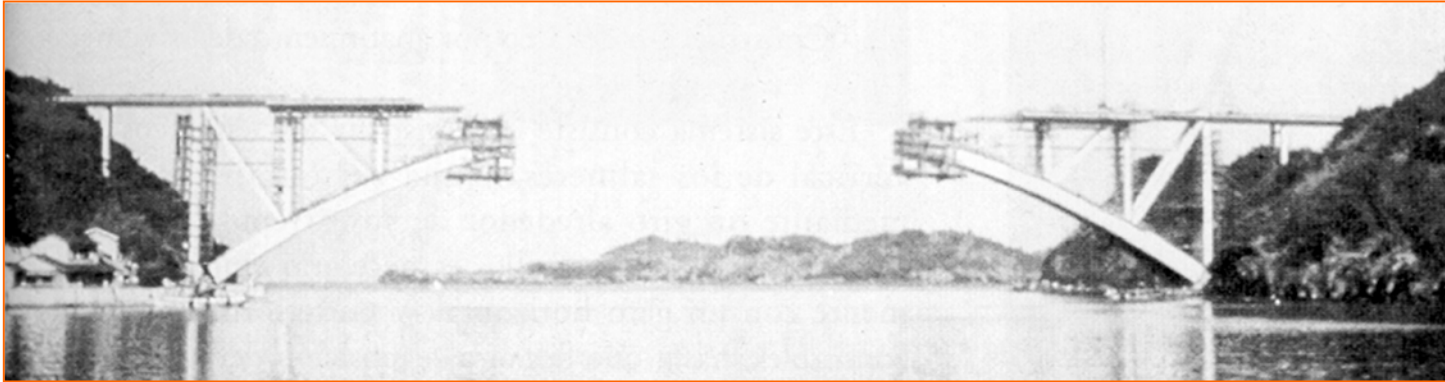


▪ **En voladizo, mediante atirantamiento en abanico:** a partir del primer soporte del tablero situado sobre el arranque del arco, actuando entonces este como parte de la torre de atirantamiento

▪ **En voladizo, triangulando el conjunto arco-tablero:** se crea un sistema reticulado provisional utilizando como montantes los soportes del tablero, el tablero como cordón superior y disponiendo tirantes según las diagonales

▪ **Sistema híbrido:** combinando las dos técnicas anteriores a medida que progresa el voladizo

04 Puentes de hormigón armado



▪ **Puente Hokawatsu** (Japón, 170 m): construido por voladizos sucesivos triangulando el conjunto arco-tablero



▪ **Puente de Shibenik** (1966, 246 m, antigua Yugoslavia): voladizos sucesivos atirantados a diferentes alturas

04 Puentes de hormigón armado



▪ **Puente de Taf Fechan (1964, Escocia):** arco de 68 m de luz construido por voladizos sucesivos atirantados en abanico. Rendel Palmer & Tritton

04 Puentes de hormigón armado

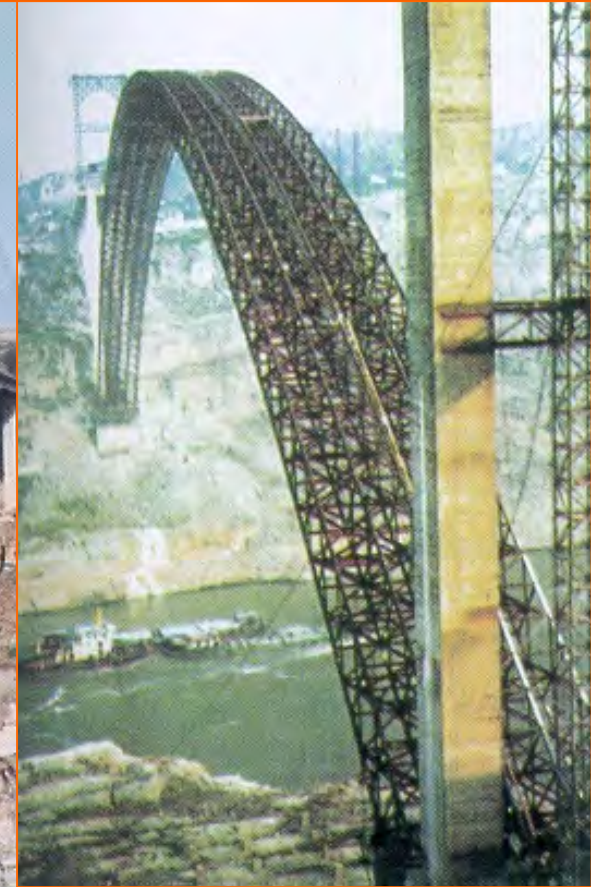
□ GRANDES ARCOS DE HORMIGÓN ARMADO

Puente	situación	país	año	luz
Puente de Waxian	río Yangze	China	1996	420 m
Puente Krk I	Isla Krk-continente	Croacia	1979	390 m
Puente de Gladesville	Sidney	Australia	1964	305 m
Puente Amizade	río Parana	Brasil-Paraguay	1964	290 m
Puente de Bloukrans	Van Stadens Gorge	Suráfrica	1984	272 m
Puente de la Arrábida	Oporto	Portugal	1963	270 m
Puente de Sandö	Kramfors	Suecia	1943	264 m
Puente Châteaubriand	La Rance	Francia	1991	261 m
Viaducto de Martín Gil	río Esla	España	1942	210 m

04 Puentes de hormigón armado



f/L	s/L
-	1/13



■Obras: el *puente de Waxian* sobre el Yangtze (república de China, 1997, arco de hormigón armado de 420 m, construido por el método Melán)

04 Puentes de hormigón armado



■ Obras: los *puentes de la isla de Krk* (Croacia, 1979, 244 y 390 m, J. Stojadinovic y S. Sram)

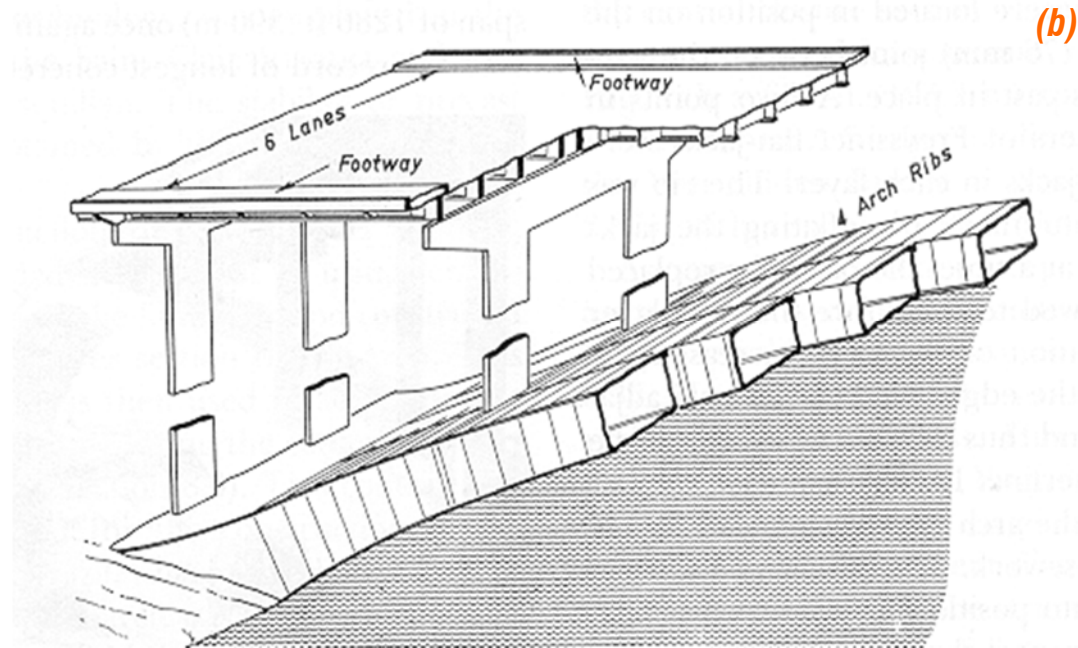
04 Puentes de hormigón armado

f/L	s/L
$1/7.46$	$1/10$



▀ Obras: el *puente de Gladesville*, sobre el río Parramata en Sidney (1964, 305 m, G. Maunsell and Partners)

04 Puentes de hormigón armado



▪ **Puente de Gladesville:** (a) vista final de la estructura, (b) esquema constructivo de los arcos de dovelas prefabricadas y (c) montaje del primer anillo sobre la cimbra metálica trasladable por ripado transversal

04 Puentes de hormigón armado

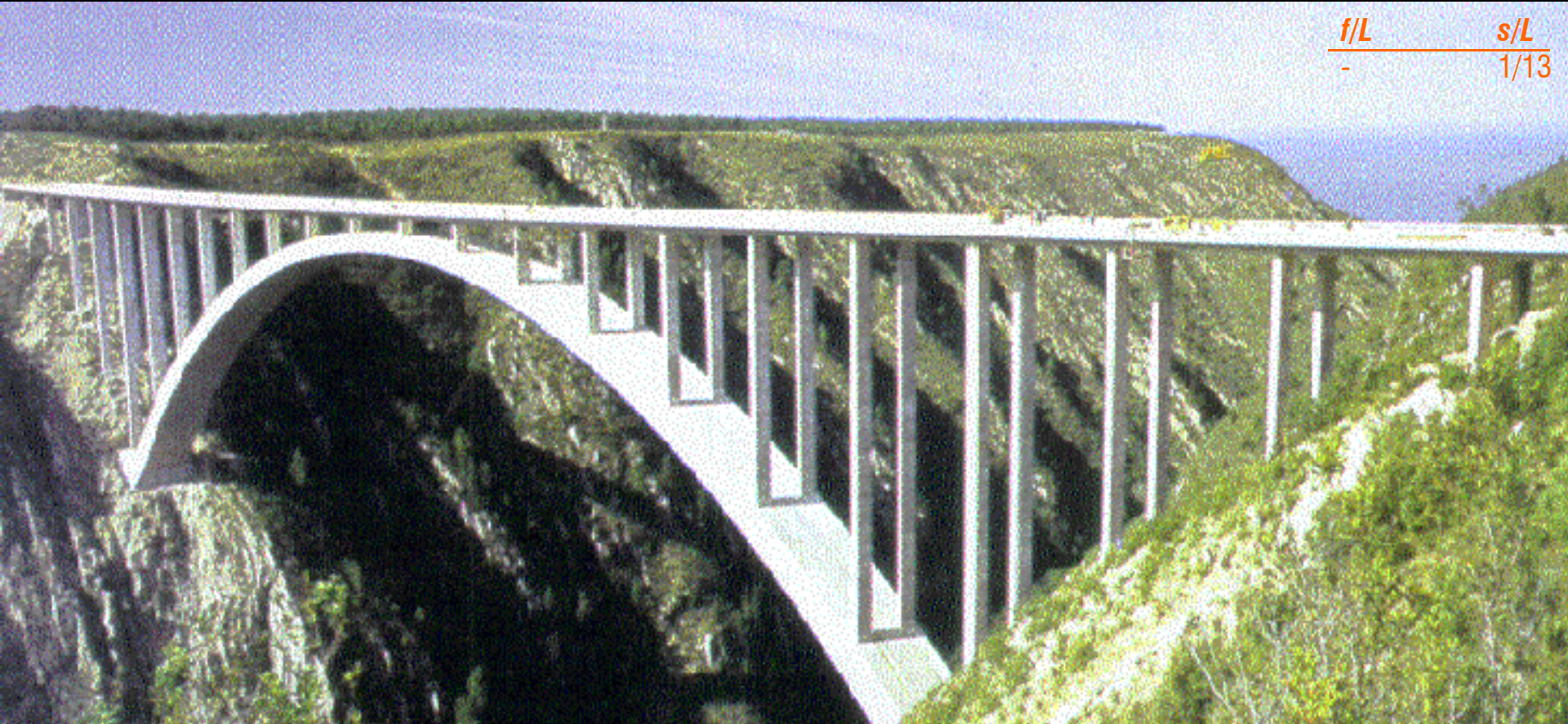


f/L s/L
- 1/11

■Obras: el *ponte de Amizade* sobre el río Parana, entre Brasil y Paraguay (1964, 290 m)

04 Puentes de hormigón armado

f/L	s/L
-	1/13



■ Obras: el *ponte de Bloukrans* (Sudáfrica, 1984, 272 m, Liebenberg & Stander)

04 Puentes de hormigón armado



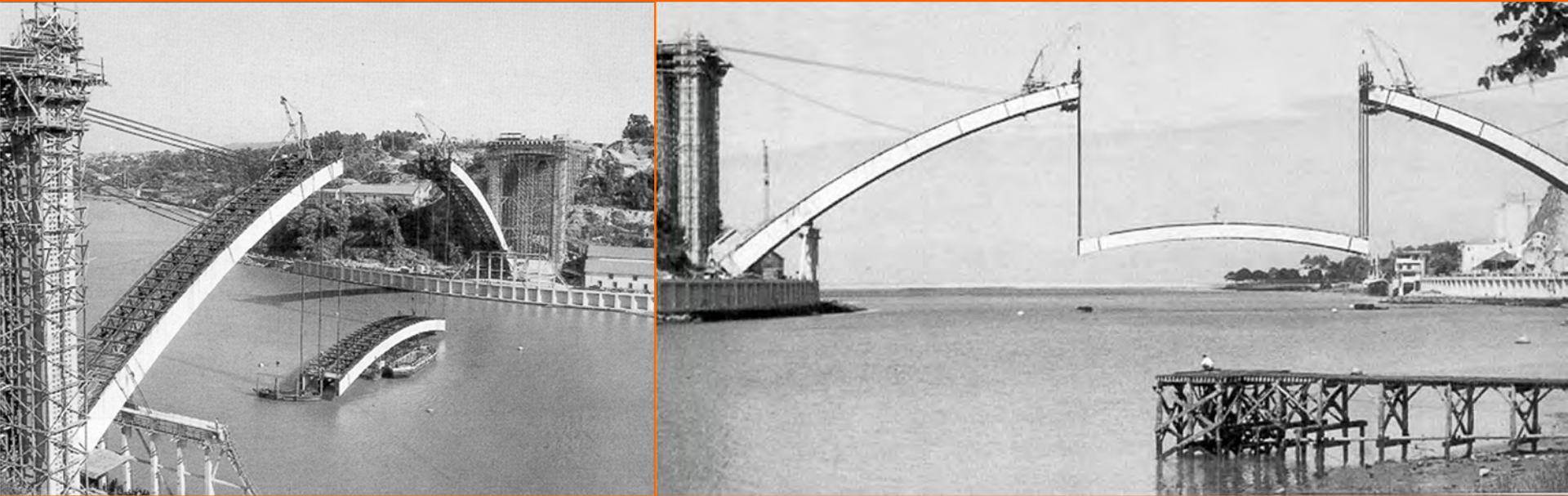
■ Obras: el *punte de Bloukrans* (construcción por voladizos atirantados)

04 Puentes de hormigón armado



■Obras: el *ponte de Arrábida*, sobre el río Duero en Oporto (1963, 270 m, E. Cardoso)

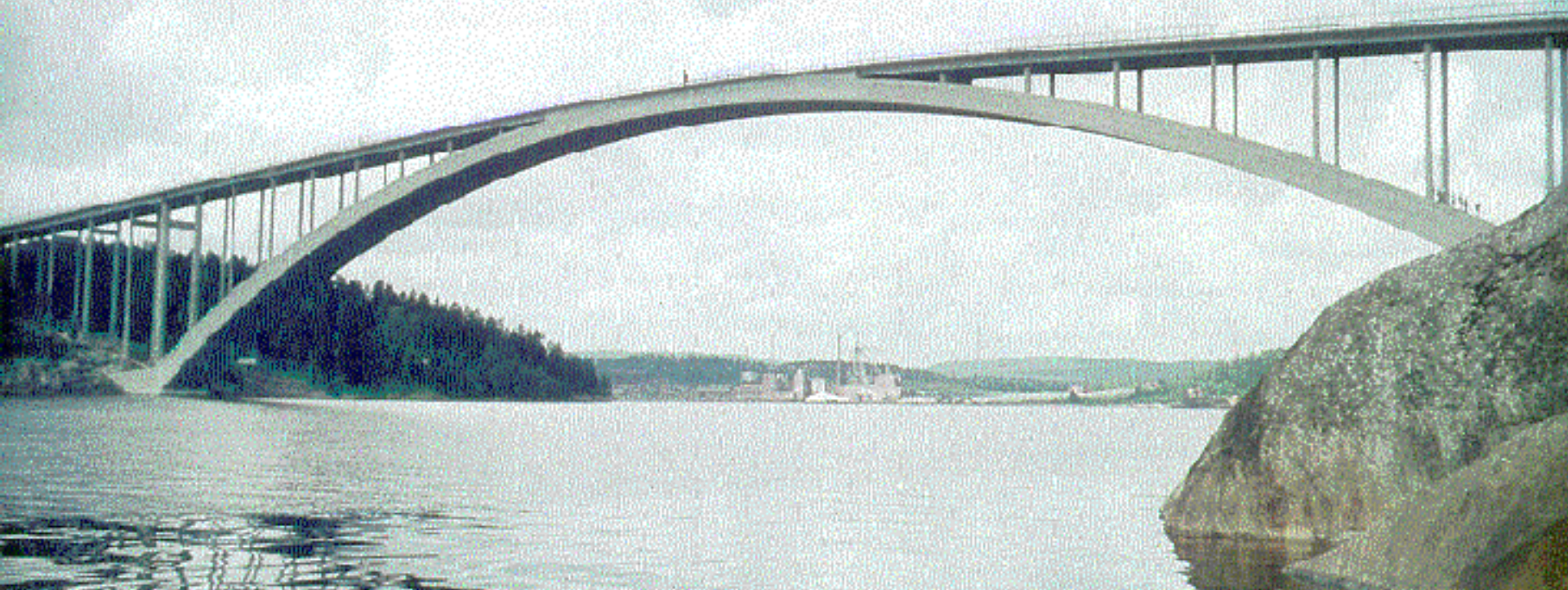
04 Puentes de hormigón armado



▪ **Puente de Arrábida:** montaje de la cimbra metálica en tres elementos prefabricados, dos en voladizo, atirantando desde el extremo superior de los soportes del tablero situados sobre los arranques del arco y uno de cierre, izado mediante grúas colocadas en los extremos de los voladizos

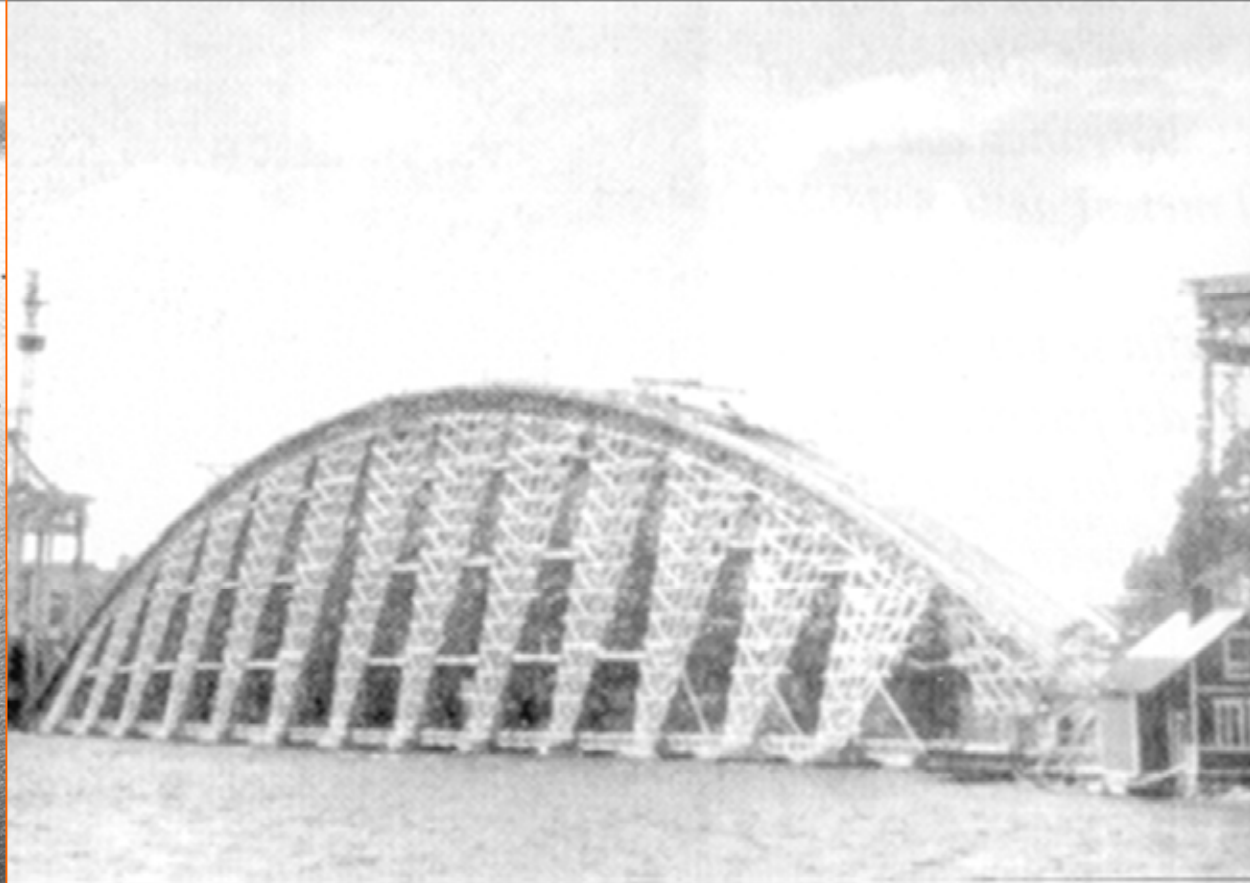
04 Puentes de hormigón armado

f/L	s/L
$1/6.6$	$1/15$



■Obras: el *punte de Sandö*, sobre el río Angerman, cerca de Estocolmo (1942, 264 m)

04 Puentes de hormigón armado



■Obras: el *punte de Sandö*, primera cimbra flotante, (colapsó en agosto de 1939, causando 18 víctimas mortales) y cimbra convencional definitiva

04 Puentes de hormigón armado

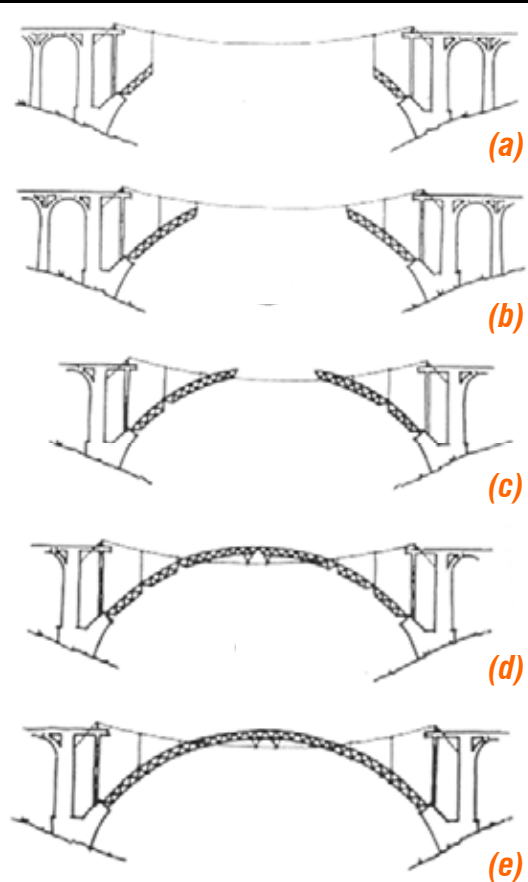
f/L	s/L
1/3.35	1/14

▪ Construido por el método Melán, fue en su momento record del mundo en bóvedas de hormigón



▪ Obras: el *viaducto de Martín Gil*, sobre el embalse del Esla (FC, 1942, 209 m, M. Gil y E Torroja)

04 Puentes de hormigón armado



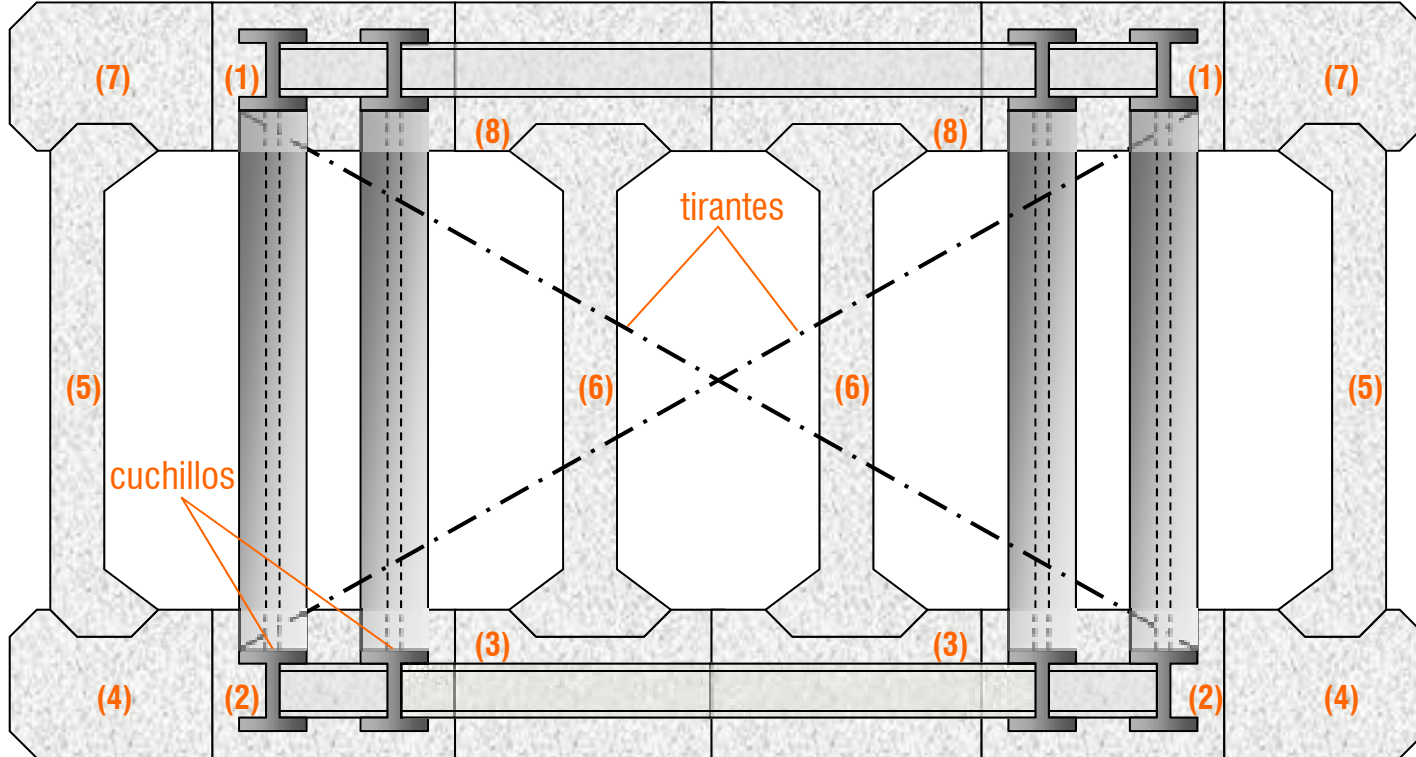
Viaducto de Martín Gil.

- Montaje de la cimbra metálica a partir de seis elementos prefabricados a base de celdas triangulares que configuran dos cuchillos longitudinales con cinco rótulas provisionales, **fases (a) a (d)**. Estas piezas se transportan y unen entre sí por medio de un blondín. Durante este proceso, la estructura metálica está colgada de cables provisionales de apoyo.

- Bloqueo de las articulaciones y comienzo del hormigonado por roscas, **fase (e)**

En julio de 1936, al estallar la guerra, se había finalizado la cimbra de madera sobre la que se iba a hormigonar el arco según proyecto de Martín Gil y luego Villalba, pero su estado en 1939 aconsejó estudiar otro sistema de construcción, adoptando finalmente la solución propuesta por E. Torroja

04 Puentes de hormigón armado



■Obras: el *viaducto de Martín Gil*: **fases de hormigonado** del arco y sección transversal de la cimbra

04 Puentes de hormigón armado



▪ *Viaducto de Martín Gil*: cimbra metálica completada, **fase (e)**, y cordón superior **(1)** en proceso de hormigonado



▪ *Viaducto de Martín Gil*: losa inferior del arco hormigonada, **fases (2) a (4)**

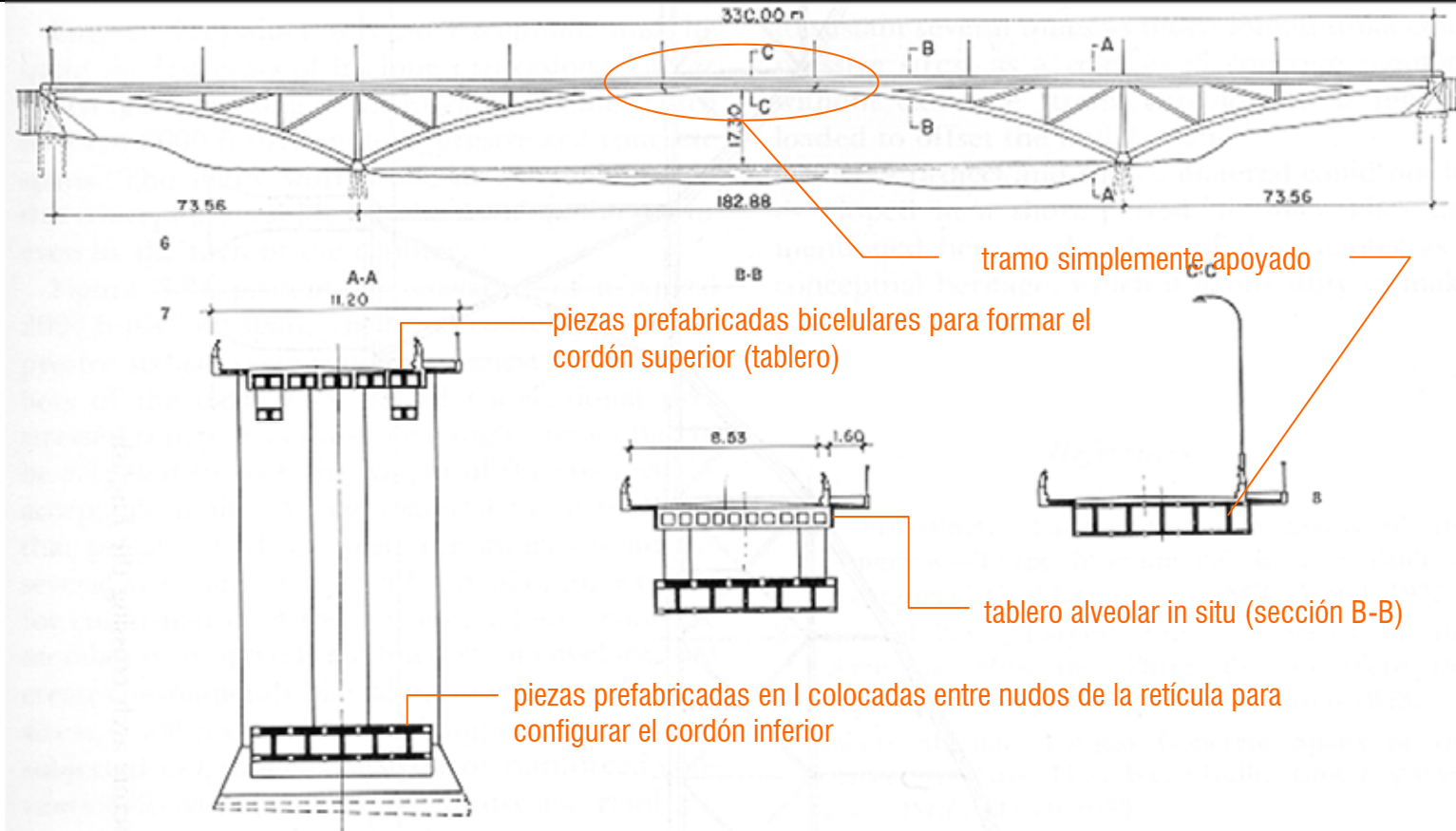
04 Puentes de hormigón armado

•No es arco todo lo que lo parece: en este caso, se trata de un **CANTILEVER** en hormigón pretensado



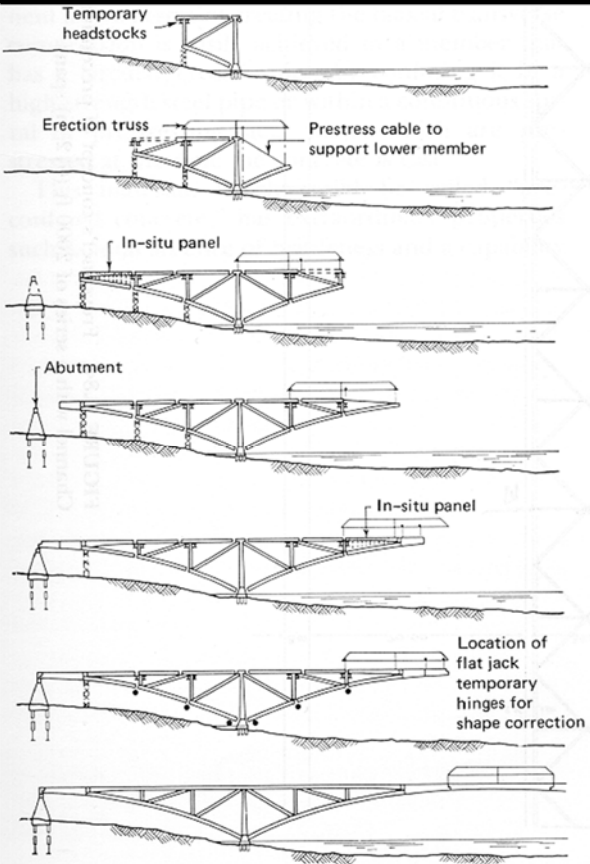
▪Obras: el *ponte sobre el estrecho de Rip*, en la bahía de Brisbane (1974, 183 m de luz, A. Fried)

04 Puentes de hormigón armado



■ Obras: el *ponte sobre el estrecho de Rip*: alzado y secciones transversales

04 Puentes de hormigón armado



▪ *Puente sobre el estrecho de Rip, secuencia de ejecución*: los elementos prefabricados se hormigonaron en una planta situada a 130 km del emplazamiento de la obra

— segmento prefabricado del cordón inferior (5 piezas en I entre las que hormigonaron bandas de 30 cm)

— cordón superior formado por 5 piezas prefabricadas bicelulares



04 Puentes de hormigón armado

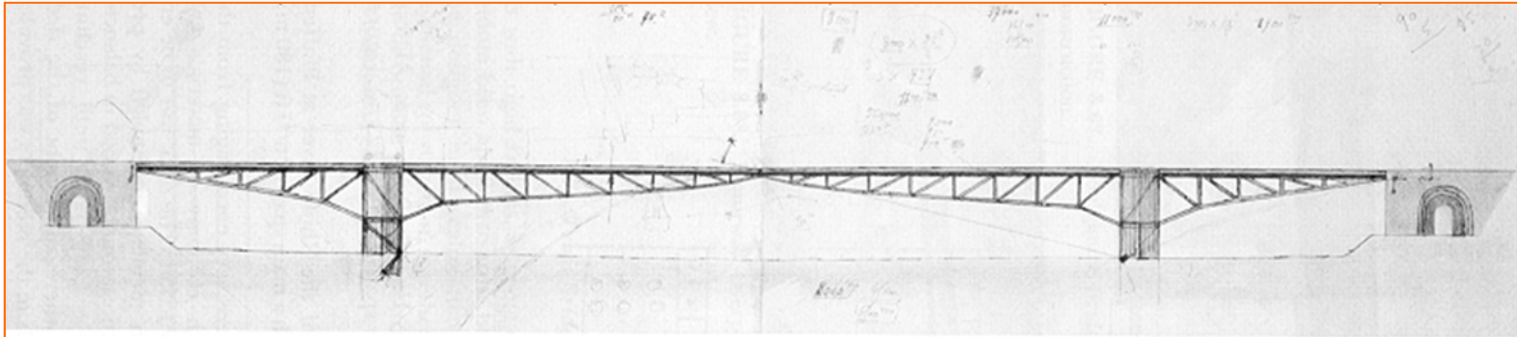
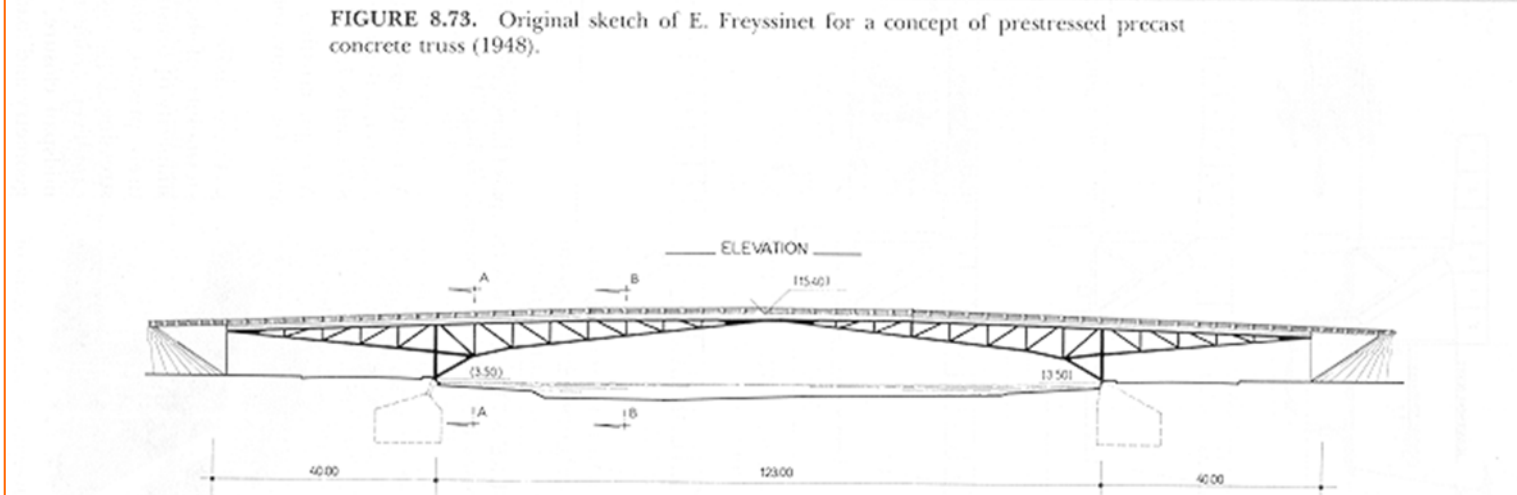


FIGURE 8.73. Original sketch of E. Freyssinet for a concept of prestressed precast concrete truss (1948).



▪ *Diseños en celosía de hormigón pretensado* de E. Freyssinet (1948, 180 m de luz para la propuesta de puente sobre el Rin en Pfaffendorf y 123 m para la de Argel, sobre el río Hanach)

5.0 Motivación

5.1 Orígenes del hormigón pretensado

5.2 Los primeros puentes de hormigón pretensado (1937-1960)

5.3 PANORÁMICA GENERAL de puentes de hormigón pretensado: estado del arte **<tramos simples de vigas, tramos continuos, pórticos y puentes atirantados>**

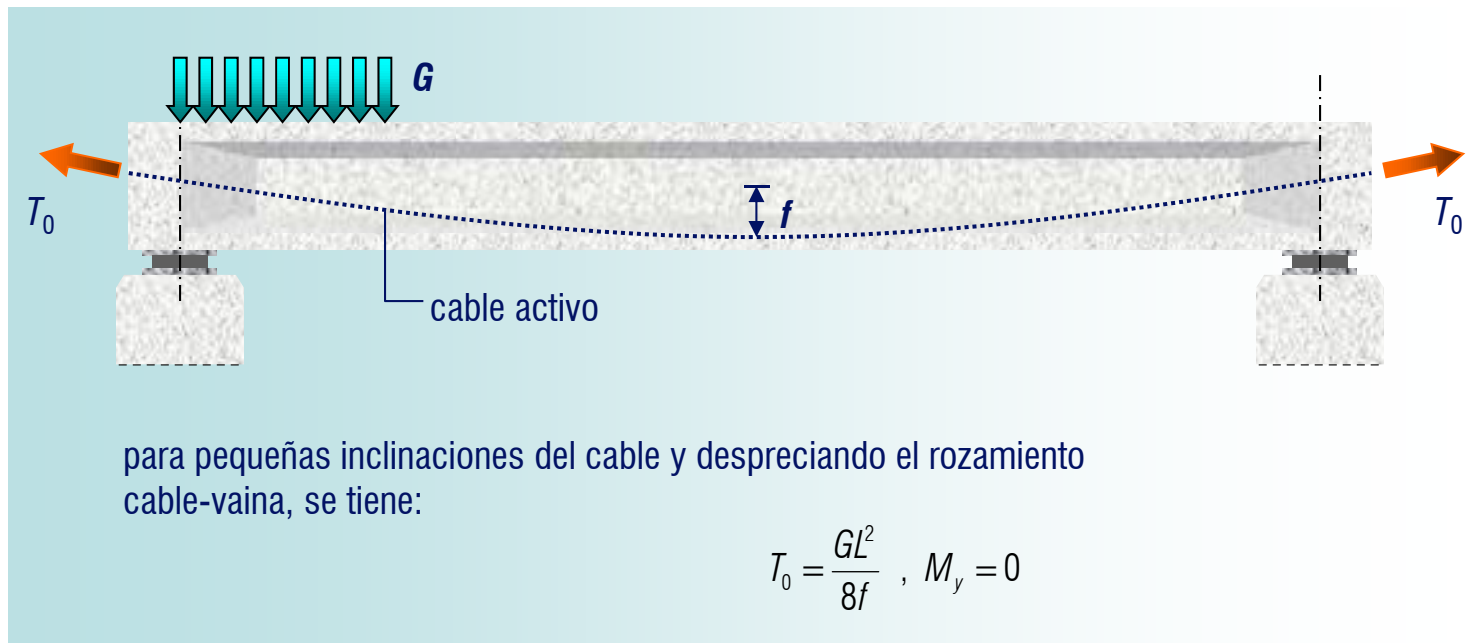


05 Puentes de hormigón pretensado

□ LIMITACIONES DEL HORMIGÓN ARMADO: el aumento de luz en los puentes de HA agravó las consecuencias de la fisuración del hormigón (mayor deformabilidad, corrosión de armaduras, pérdida de recubrimiento...). Para atenuar este defecto se puede:

▪ **Actuar sobre la forma:** (G) puede crear las precompresiones → **ARCO**

▪ **Crear un estado tensional previo** en la pieza (G_p^*) → **ARMADURAS ACTIVAS**



05 Puentes de hormigón pretensado

□ LOS PRIMEROS INTENTOS:

- **27 de Octubre de 1886:** *Jackson* patenta un sistema de pretensado mediante barras no adherentes, tuercas y placas de reparto que permite eliminar las tracciones en el hormigón.
- **En 1888,** *Doehring* propone pretensar losas de hormigón mediante alambres adherentes

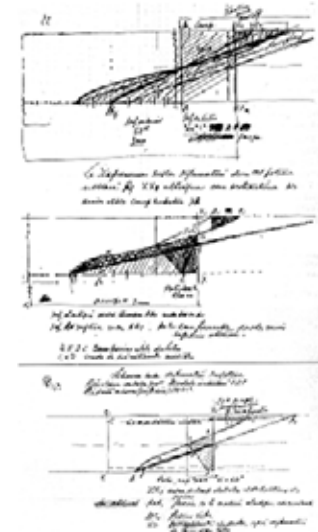
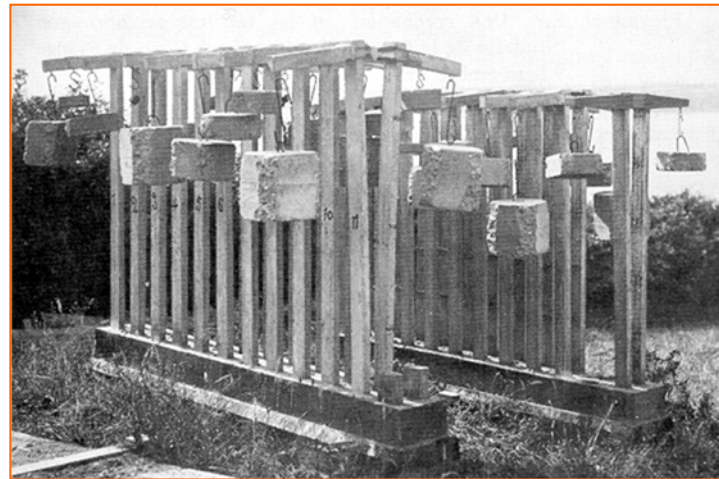
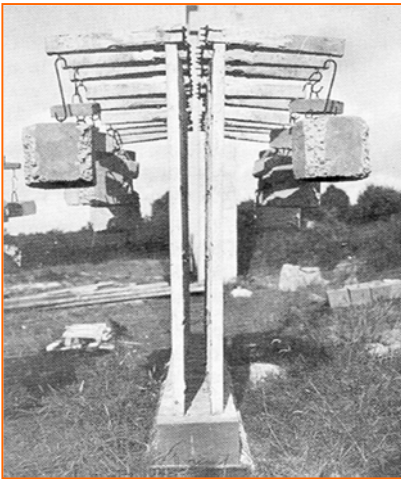
□ LOS PRIMEROS FRACASOS:

- Prácticamente todos los intentos iniciales no proporcionan resultados satisfactorios por ejercer un *pretensado insuficiente* sobre las piezas, el cual se veía rápidamente contrarrestado por la retracción y la fluencia del hormigón.
- Hasta el congreso de Lieja de 1930, las ponencias de Glanville y Freyssinet no desbancan la teoría elástica de Mesnager.
- Freyssinet sí comprendió que en la práctica se podía alcanzar un estado tensional en equilibrio utilizando aceros de alto límite elástico

05 Puentes de hormigón pretensado



- **Ensayos de Plougastel en 1928:** Freyssinet mide la evolución de las deformaciones diferidas del hormigón, ya constatadas en el Veudre en 1911, y deduce que $\varepsilon_c^*(t, kP) \approx k\varepsilon_c^*(t, P)$
- **2 de Octubre y 28 de Noviembre de 1928:** Freyssinet y Séailles patentan la invención del **pretensado por adherencia**
- **1 de Enero de 1929:** Freyssinet renuncia a su Sociedad con Claude Limousin (este *no creía* en el pretensado) cediéndole todos sus derechos en el negocio
- **1 de Noviembre de 1932:** escribe el artículo “*Idées et voies nouvelles*”, que constituye la primera publicación de una teoría elaborada del pretensado, e introduce en el la palabra **précontrainte**. Se publica en 1933 en “*Science et Industrie*”



05 Puentes de hormigón pretensado



▪**1934**: después de su fracaso económico en la industria de los postes de HP (en 5 años había perdido toda su fortuna), **salva** la estación marítima de Le Havre y recupera su prestigio y posición. De este éxito nace su amistad y asociación con Edmé Campenon, presidente de Campenon Bernard, con el que firma un contrato de exclusiva en 1935

“No lamentaba nada, ni mis esfuerzos, ni mi fortuna perdida. Por primera vez en mi vida, había tenido la ocasión de concentrar mi pensamiento sobre un problema único, sin ninguna otra preocupación. Gracias a esto, a lo largo de cinco años de la más dura labor que pueda imponerse a un hombre, había obtenido resultados técnicos que estimaba mucho más importantes que todos los que había conseguido entre 1905 y 1928”

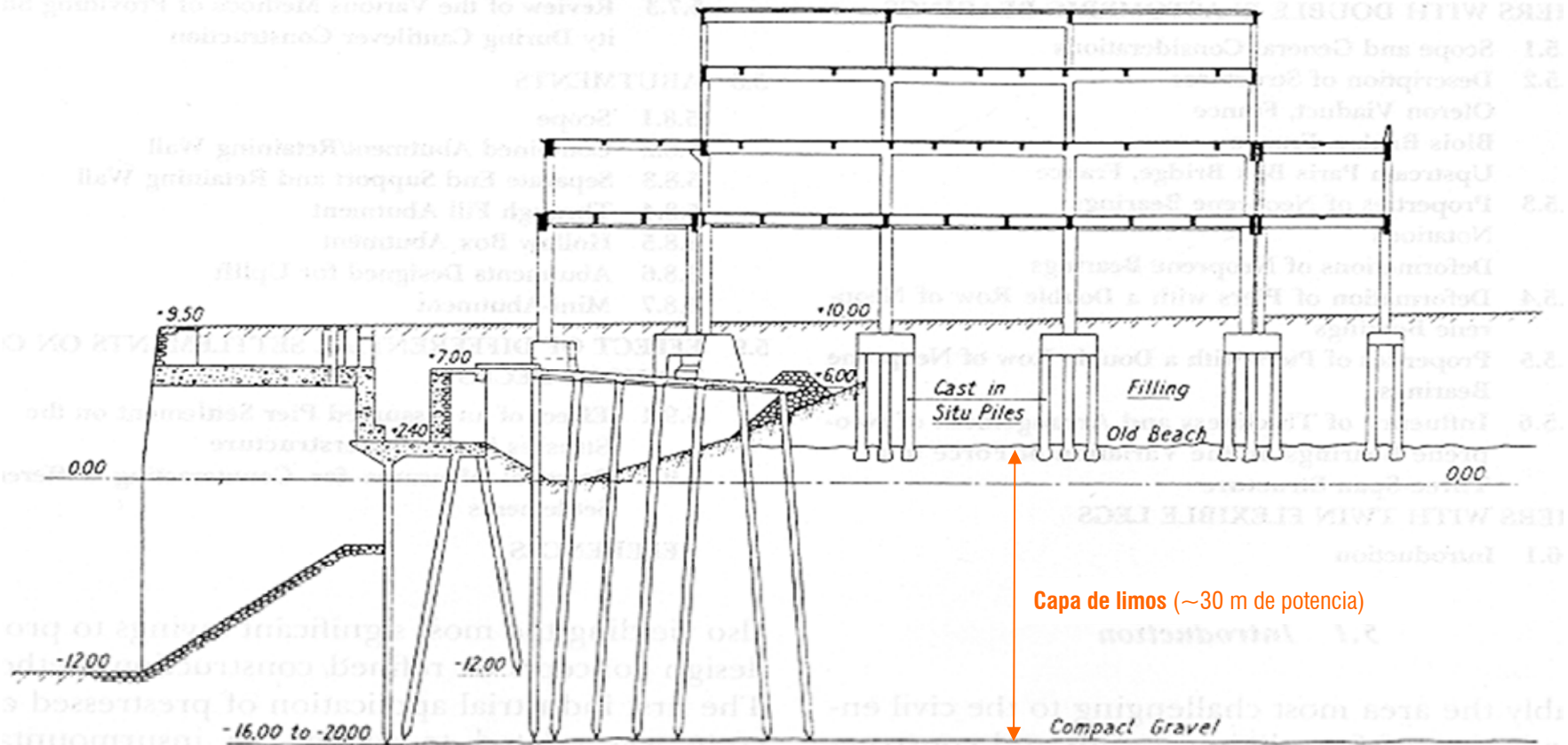
05 Puentes de hormigón pretensado



Edificio de 600×45 m para el Normandie, con $w=25$ mm/mes y llegando a 46 cm en las pilas cimentadas a 10 m en la capa de limos de 30 m (grietas de cortante...)

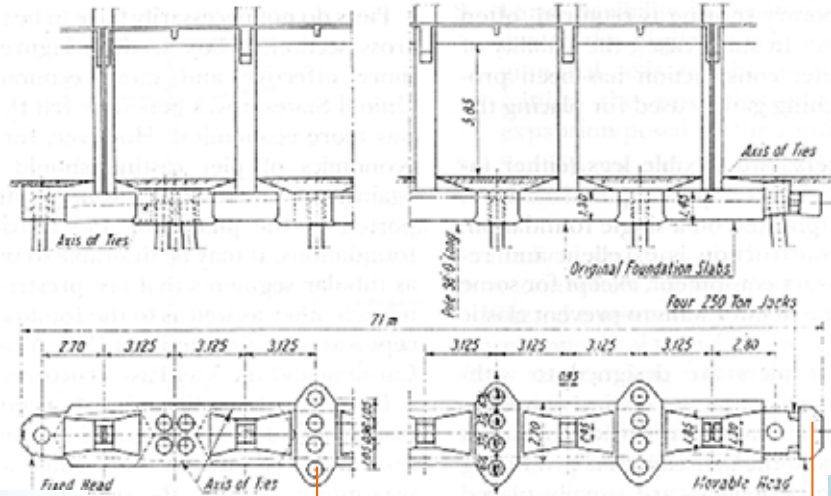
■ El hundimiento de la *estación marítima de Le Havre*

05 Puentes de hormigón pretensado



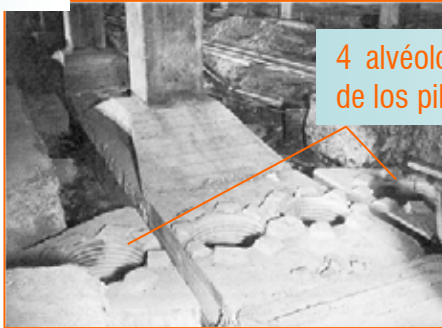
■ El hundimiento de la *estación marítima de Le Havre*: sección general del edificio principal

05 Puentes de hormigón pretensado

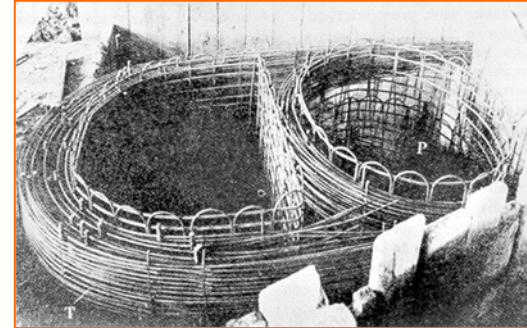


nuevos encepados

elemento móvil para pretensar la viga

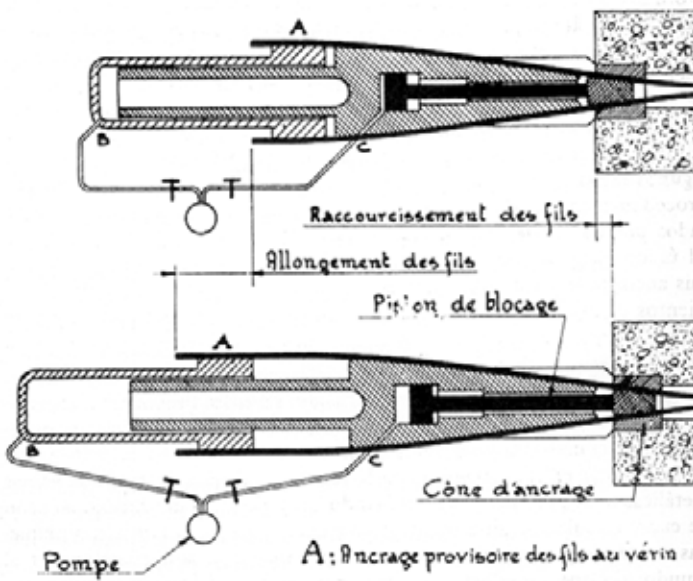


4 alvéolos cilíndricos para el paso de los pilotes pretensado hincados



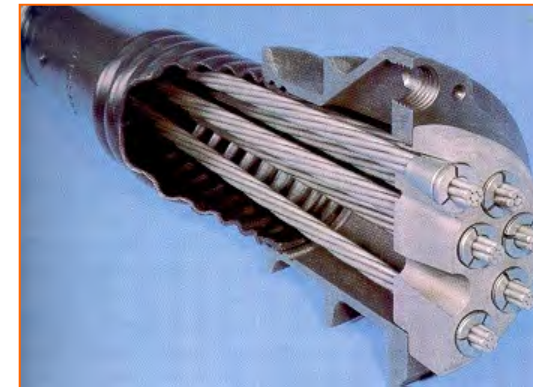
■ El hundimiento de la *estación marítima de Le Havre*: descripción de la intervención diseñada por E. Freyssinet

05 Puentes de hormigón pretensado



▪**1939**: Freyssinet inventa el gato y los conos de anclaje, poco voluminosos y económicos.

▪Le siguieron numerosos sistemas, con alambres, torones o barras y diferentes tipos de anclajes: **DYWIDAG**, **Polensky & Zöllner**, Baur-Leonhardt, Beton & Monierbau ...en Alemania, **BBRV**, **VSL**... en Suiza, SGTM en Francia, además del propio **Freyssinet**, Barredo en España, CCL y Lee-Mc Call en Inglaterra, Morandi y Rinaldi en Italia, Magnel-Blaton en Bélgica, Roebling y PCC en EEUU...



▪El sistema de pretensado de E. Freyssinet

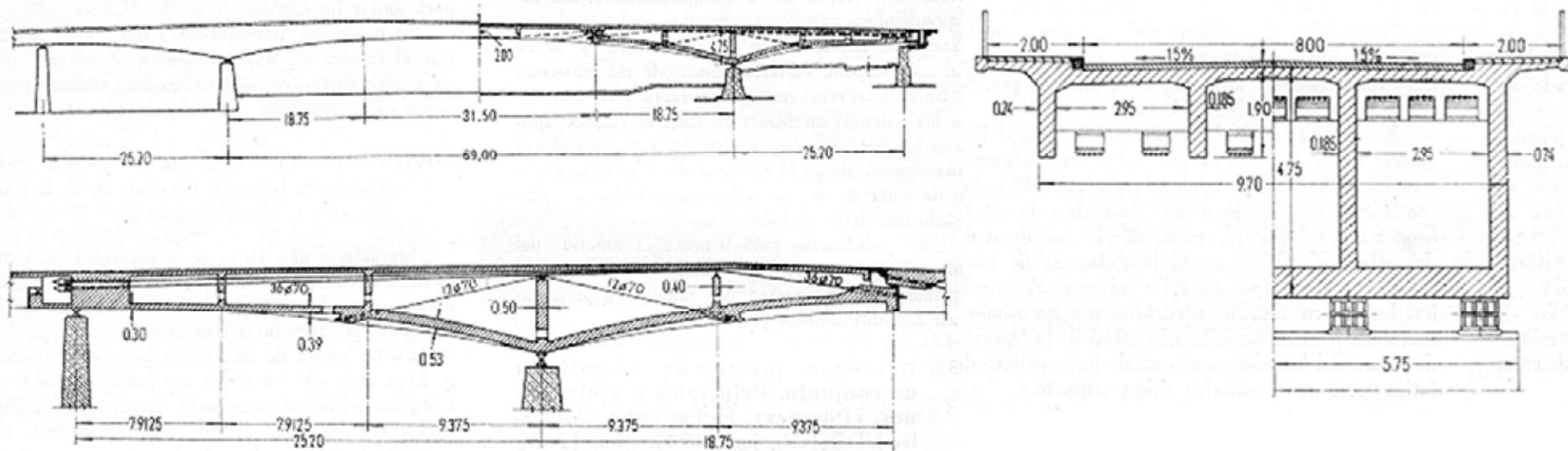
<5.1 ORÍGENES DEL HORMIGÓN PRETENSADO>

05 Puentes de hormigón pretensado



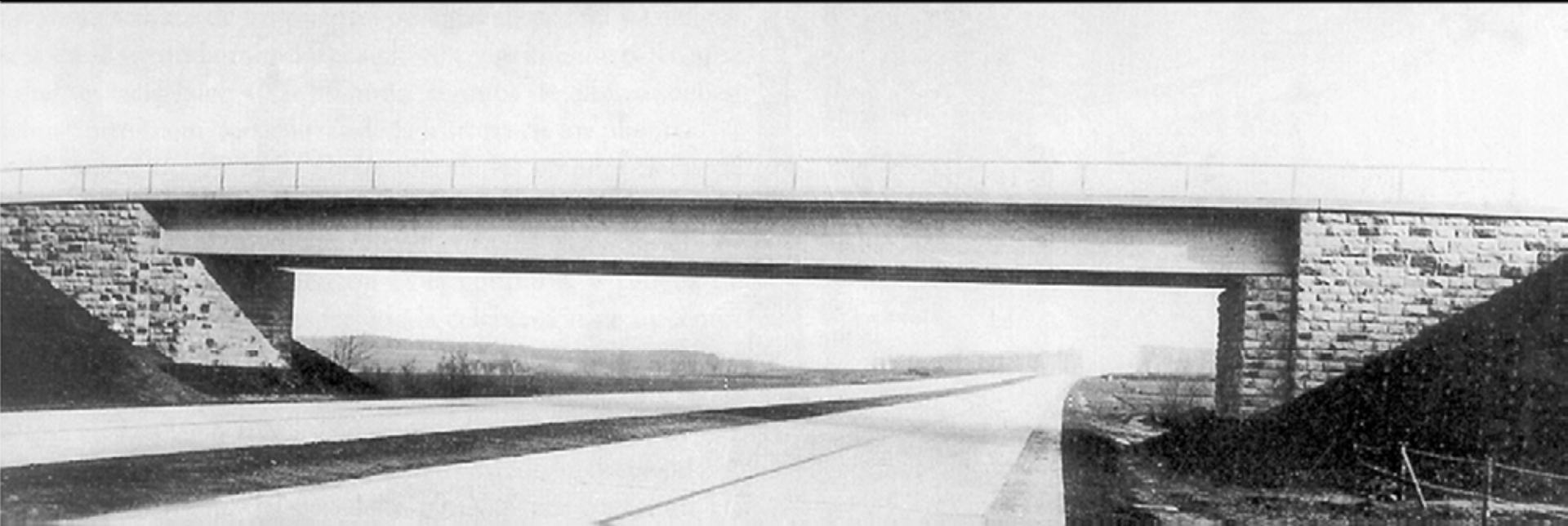
▪ El *puente de Aue* en Sajonia, sobre las vías de la estación ferroviaria: el primer puente de hormigón pretensado (1937, cantilever central con vanos de 25.2+69+23.4 m. F. Dischinger. **Dyckerhoff & Widmann**)

05 Puentes de hormigón pretensado



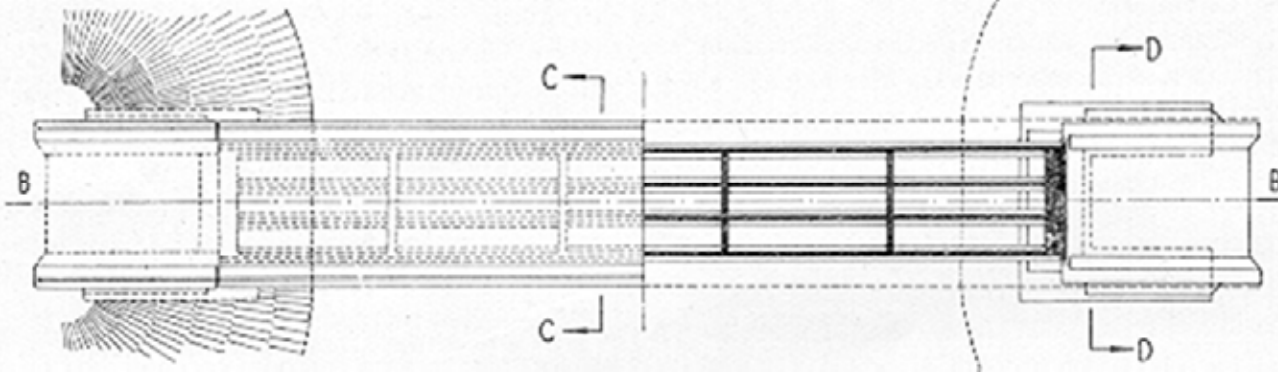
- Esquema del pretensado por barras sin unión del *puente de Aue*: acero ST-52 tesado a 220 MPa. La estructura tuvo que ser reparada en 1966

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ El *puente de autopista de Oelde* en Westphalia. El **primer puente de hormigón pretensado de tramo sencillo** (1938, un vano de 33 m, Freyssinet-Wayss & Freytag)

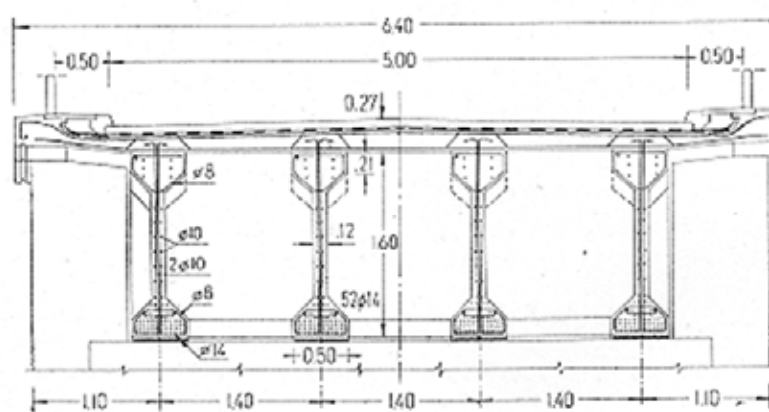
05 Puentes de hormigón pretensado



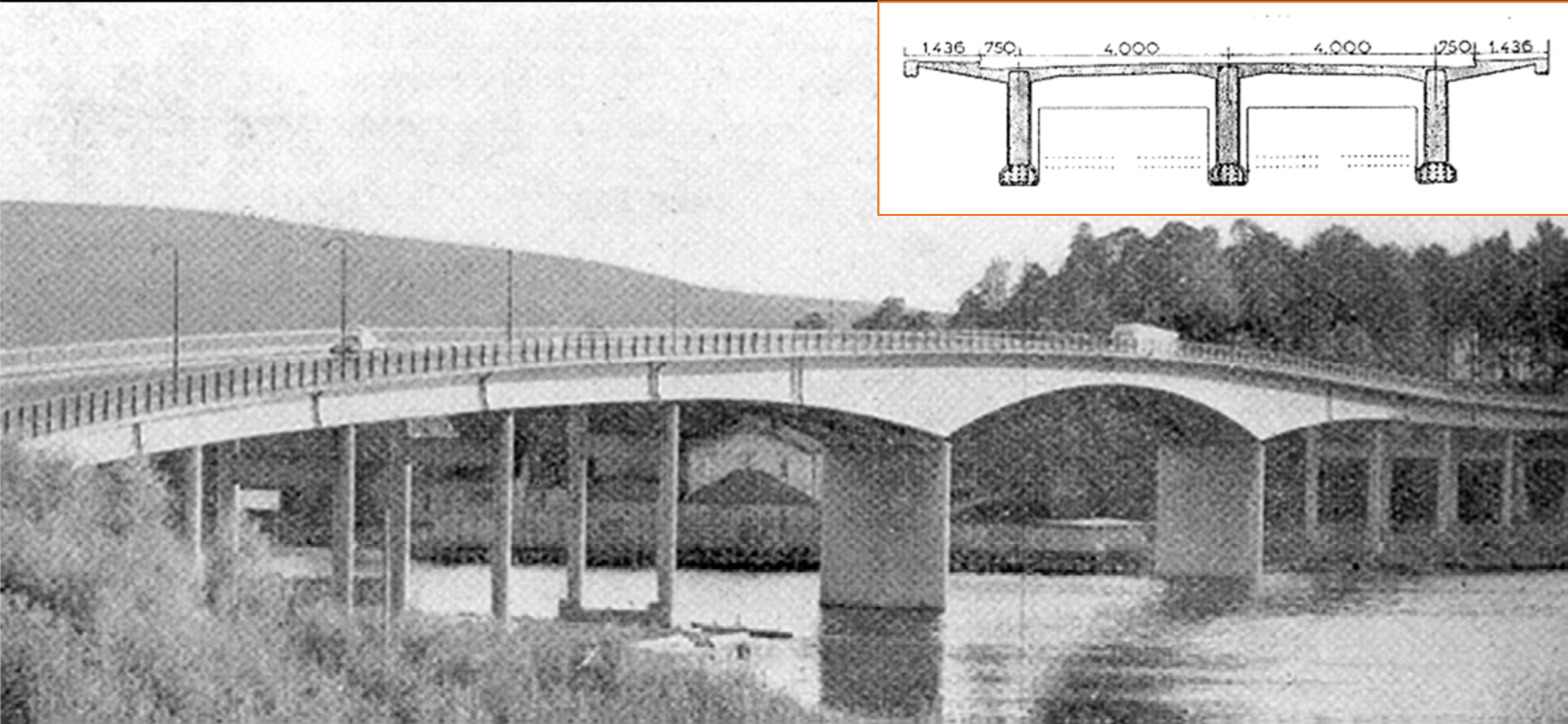
▪ Tablero de vigas y losa formado por cuatro vigas longitudinales y cuatro riostras intermedias.

▪ **Pretensado adherente según patentes de Freyssinet**, formado por barras rectas: 52Ø14 en cabeza inferior, anclados en puntos intermedios, y 24Ø10 en alma y cabeza superior, anclados en las secciones extremas de las vigas. El tesado inicial fue de **550 MPa**, siendo las pérdidas estimadas de 150 MPa.

▪ Las tensiones máximas iniciales en el hormigón fueron de **14 MPa**, subiendo hasta **15.1 MPa** con sobrecargas y después de pérdidas



05 Puentes de hormigón pretensado



▪ El *puente de Klockarstand en Sando*, Suecia. El **primer puente continuo de hormigón pretensado** (1943, vanos centrales de 40.25+71+40.25 m. Skanska Cementjuteriet)

05 Puentes de hormigón pretensado

□ Los puentes del Marne

Luzancy (1941-1946) Su construcción, iniciada en 1941, fue interrumpida por la guerra y se finalizó en 1946

La serie del Marne

Annet

Concurso convocado por la administración para la Annet reconstrucción de cinco puentes destruidos durante la segunda guerra mundial.

Trilbardou

Esbly

Proyecto: 1947, de Freyssinet y Chaudesaigues

Ussy

Construcción: 1948-1951, por Campenon Bernard

Changis-Saint-Jean

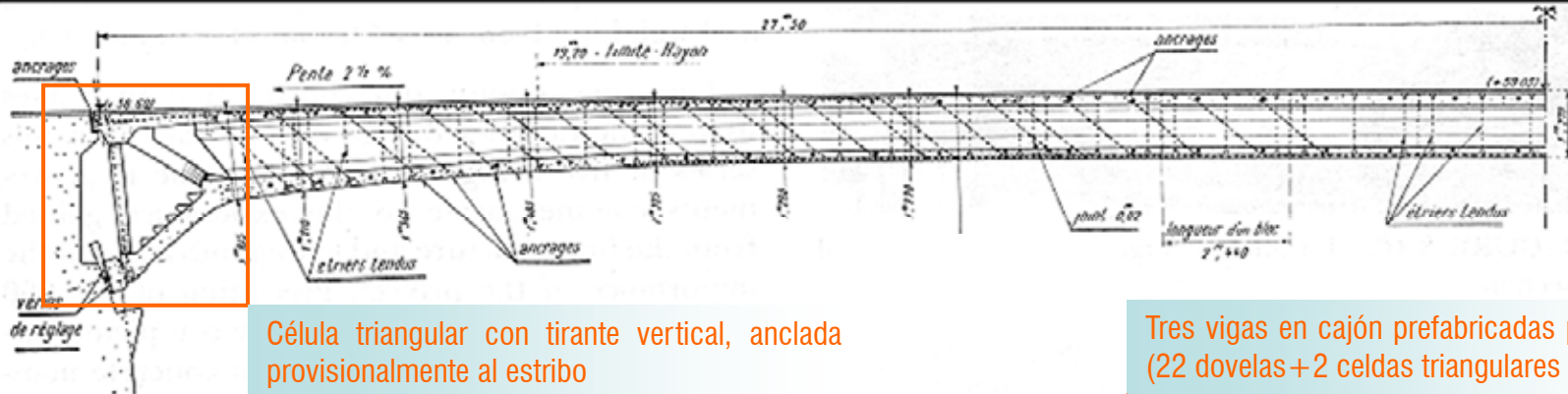
- **Prefabricación** por dovelas de las vigas, con **pretensado vertical** en almas, y de los elementos de losa entre vigas (en Luzancy).
- **Vibrado mecánico** de alta frecuencia y **curado al vapor** a 80° (20 MPa a las 2 horas)
- **Preensamblado** de las vigas en el taller de montaje a pie de obra, para comprobar la alineación de las dovelas
- **Células triangulares** con tirante, apoyadas en los estribos preexistentes
- **Postesado longitudinal** en las fases de ensamblado de las vigas (para los arranques en voladizo y para los tramos centrales de las vigas).
- **Postesado transversal** final, resultando una estructura pretensada en tres direcciones.

05 Puentes de hormigón pretensado



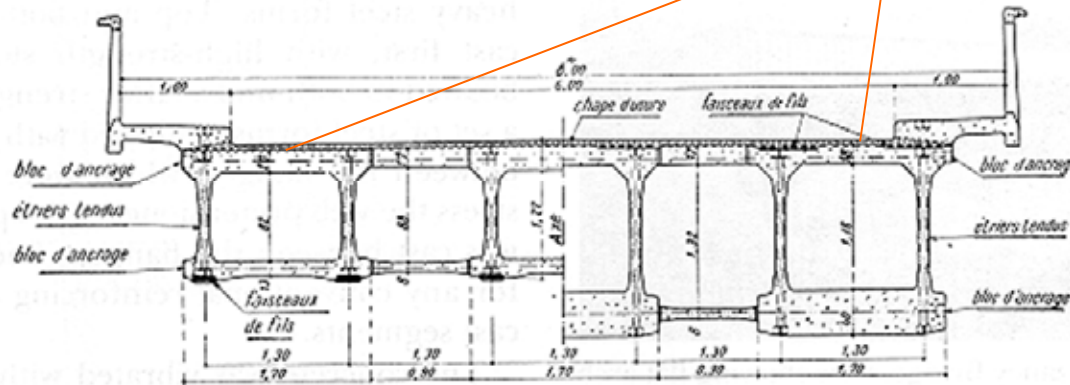
▪ El *pont de Luzancy* sobre el Marne (1941-1946, 55 m, E. Freyssinet)

05 Puentes de hormigón pretensado



Célula triangular con tirante vertical, anclada provisionalmente al estribo

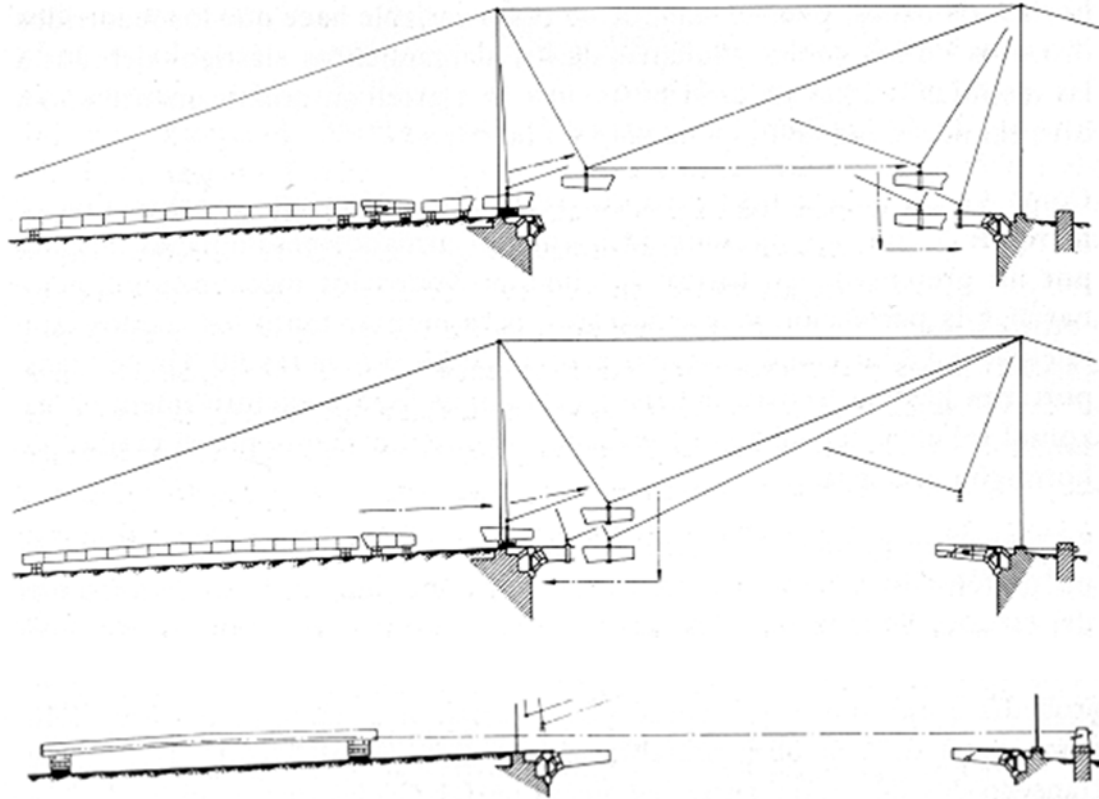
Tres vigas en cajón prefabricadas por dovelas (22 dovelas + 2 celdas triangulares por viga)



El *pont de Luzancy*, secciones y esquema de pretensado ($h=1.27$ a 1.82 m, $h/L: 1/43$ a $1/30$)

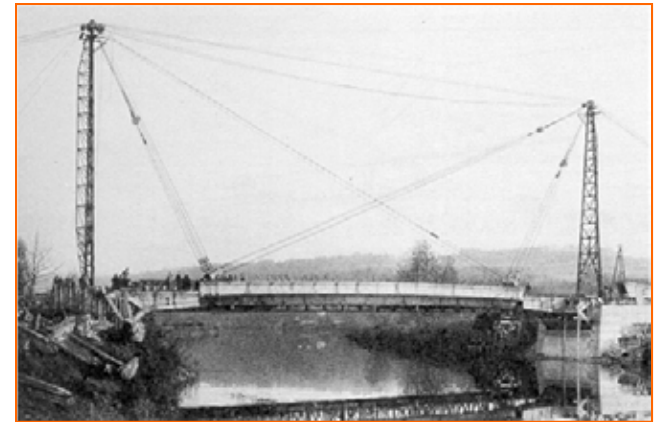
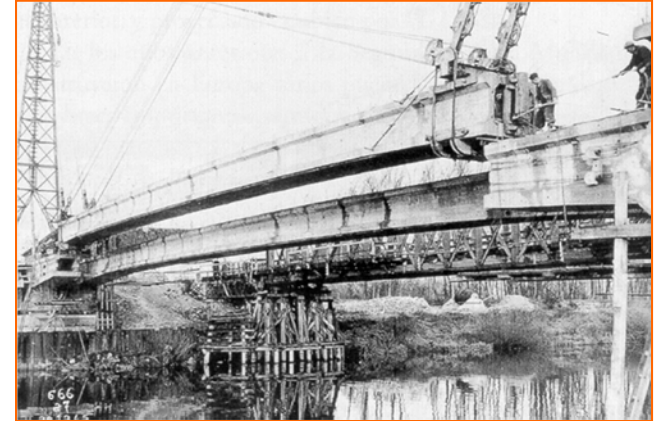
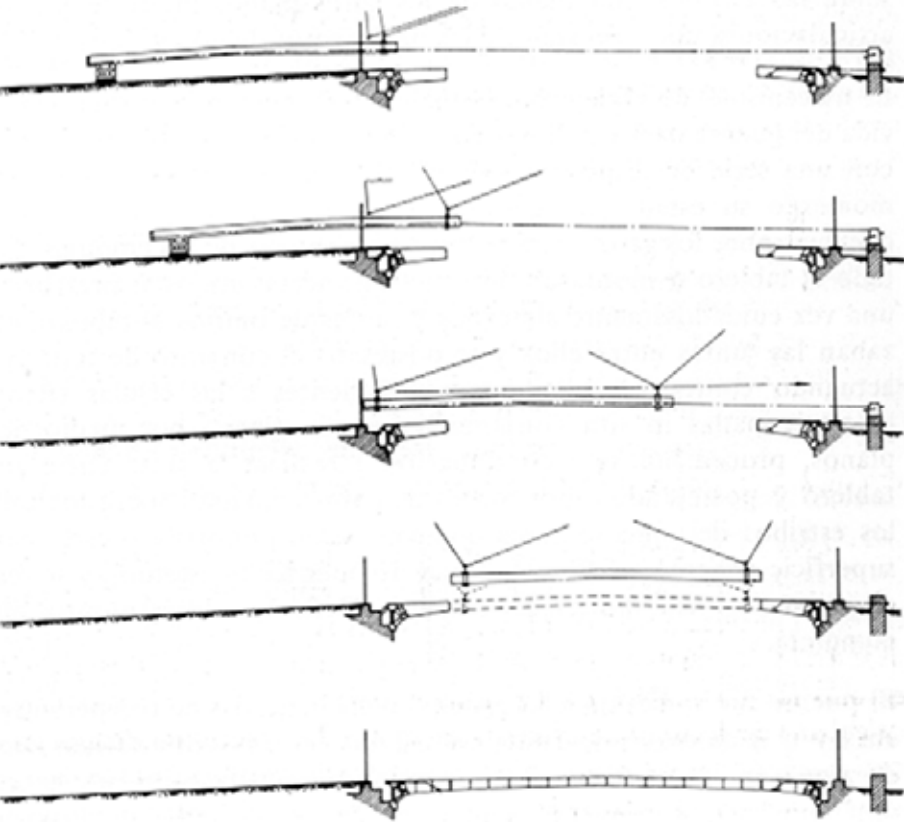
<5.2 LOS PRIMEROS Puentes DE HORMIGÓN PRETENSADO (1937-1960)>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪El *pont de Luzancy*, colocación de seis tramos de tres dovelas en voladizo

05 Puentes de hormigón pretensado



▪El *pont de Luzancy*, colocación de los tres tramos centrales, de dieciséis dovelas (134 t)

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ Los *Puentes de la serie del Marne* (1951, 74 m, E. Freyssinet y J. Chaudesaigues. Campenon Bernard)

05 Puentes de hormigón pretensado

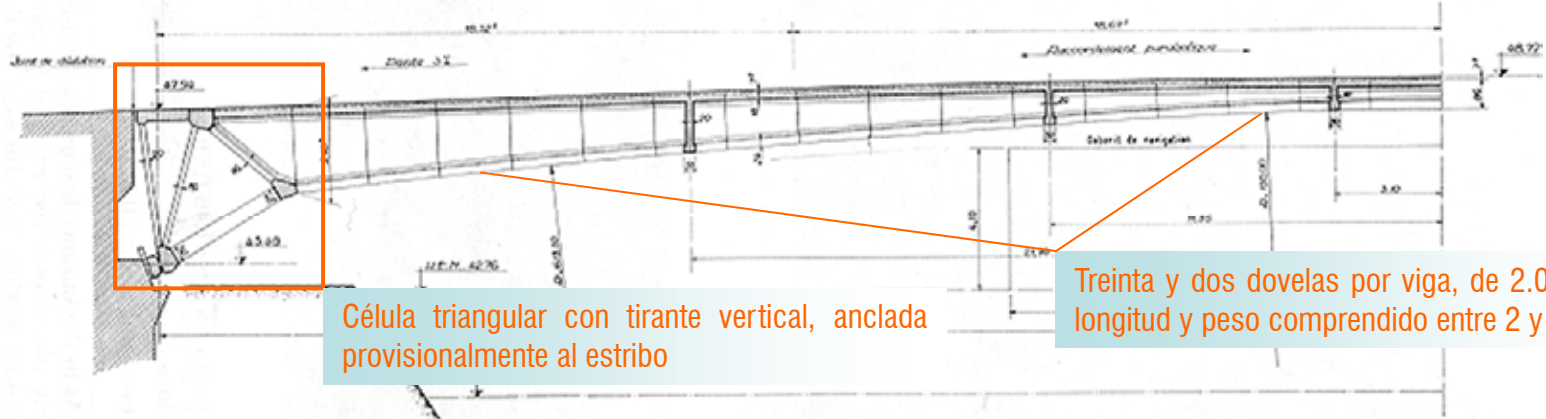
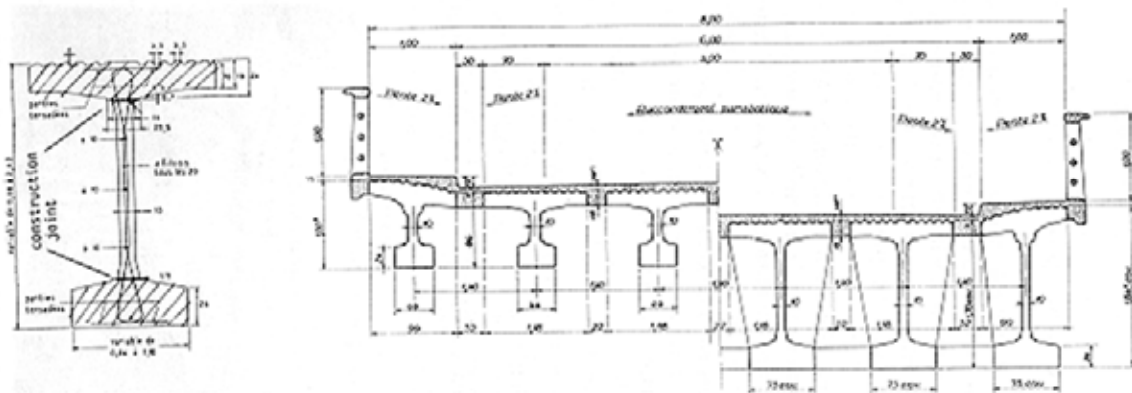
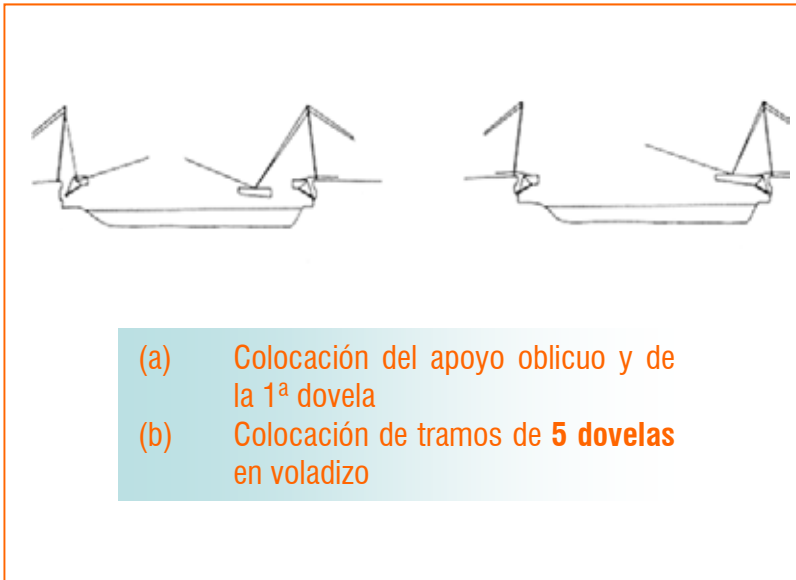


Fig. 3. — Pont d'Esby, Dorselage implantado.



▪El *Pont d'Esby*, secciones y esquema de pretensado ($h=0.93$ a 2.40 m, h/L : $1/30.8$ a $1/79.6$)

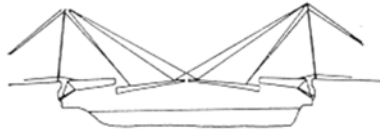
05 Puentes de hormigón pretensado



▪ El *Pont d'Esby*, secuencia de colocación de elementos prefabricados

05 Puentes de hormigón pretensado

(c) Colocación de los tramos de cierre, de **10 dovelas** cada uno



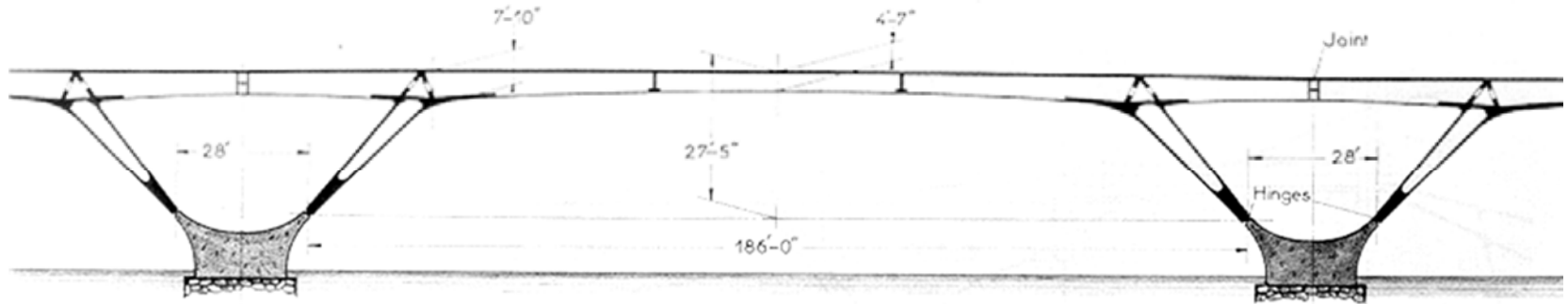
▪El *Pont d'Esby*, secciones y esquema de pretensado ($h=0.93$ a 2.40 m, $h/L: 1/30.8$ a $1/79.6$)

05 Puentes de hormigón pretensado

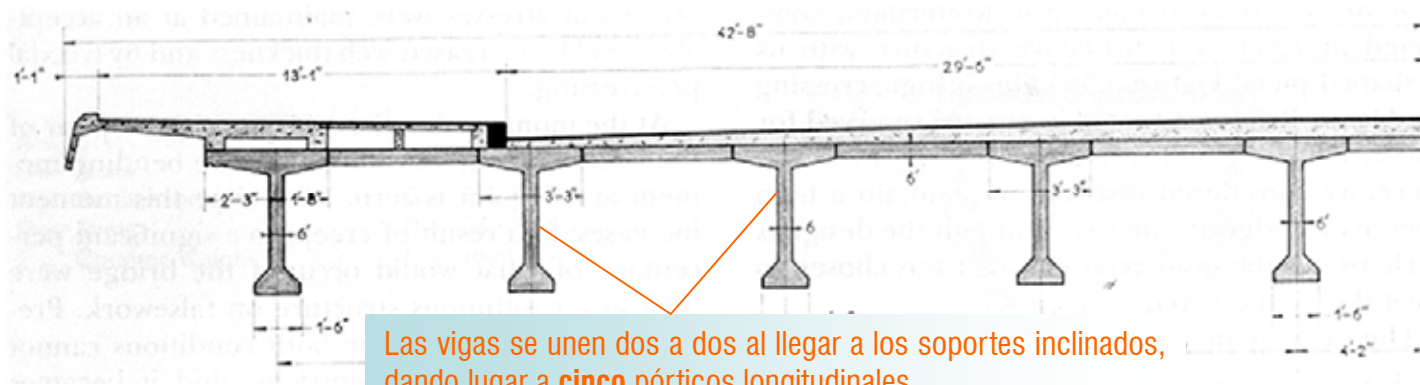


▪El *Pont Saint Michel*, sobre el Garona en Toulouse (1962, cinco vanos de 65.20 m, la última obra de Eugène Freyssinet)

05 Puentes de hormigón pretensado



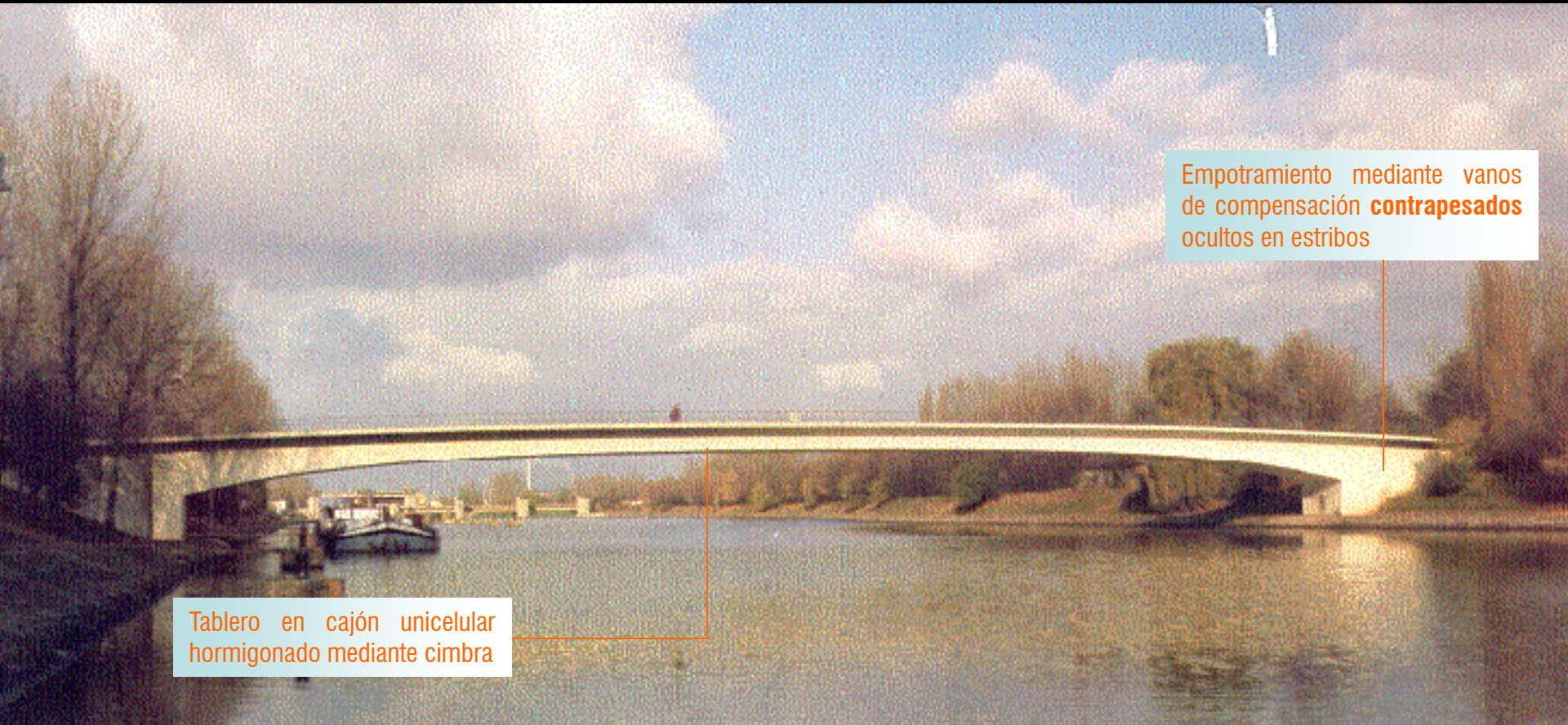
Construido aprovechando las cimentaciones de las pilas (a las que se conectan los 10 soportes inclinados mediante rótulas Freyssinet) y los estribos del puente antiguo de fundición, similar al "Pont Sully"



Las vigas se unen dos a dos al llegar a los soportes inclinados, dando lugar a **cinco** pórticos longitudinales

▪ El *Pont Saint Michel*, secciones

05 Puentes de hormigón pretensado

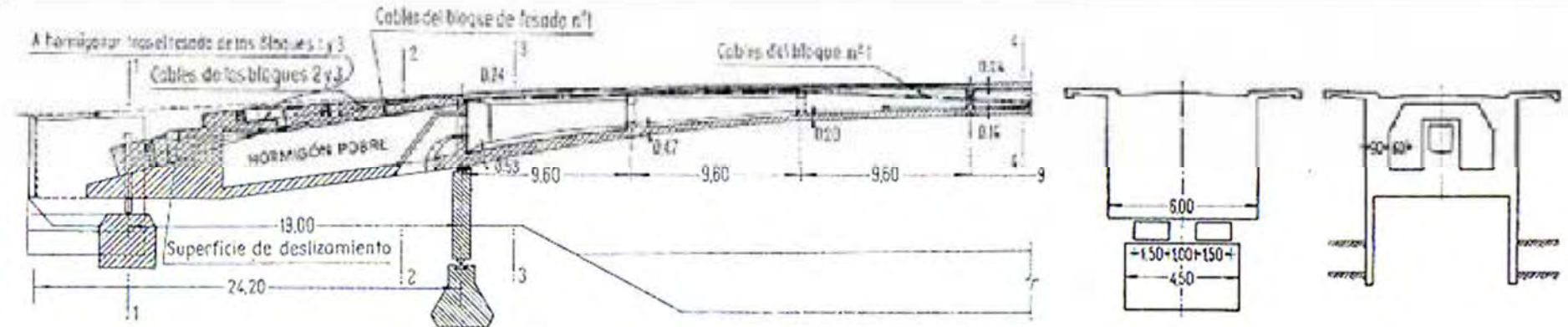


Tablero en cajón unicelular
hormigonado mediante cimbra

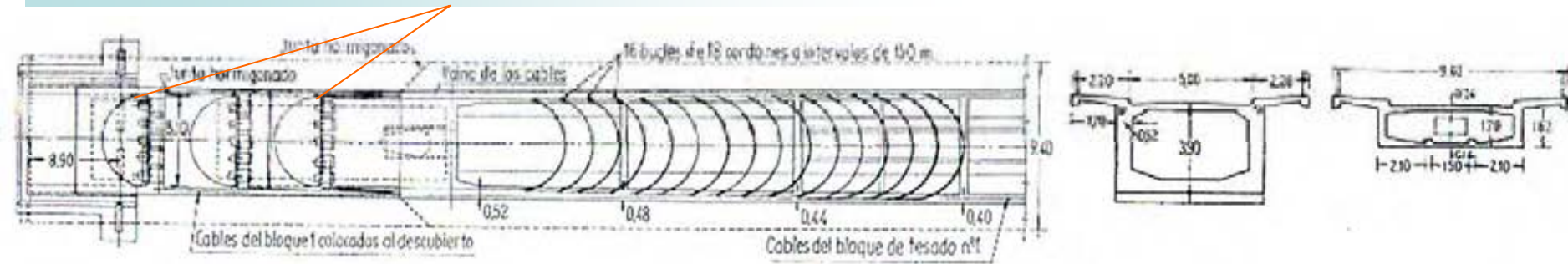
Empotramiento mediante vanos
de compensación **contrapesados**
ocultos en estribos

▪ El *puente sobre el Neckar en Heilbronn* (1950, vano de 95.20 m. F. Leonhardt)

05 Puentes de hormigón pretensado



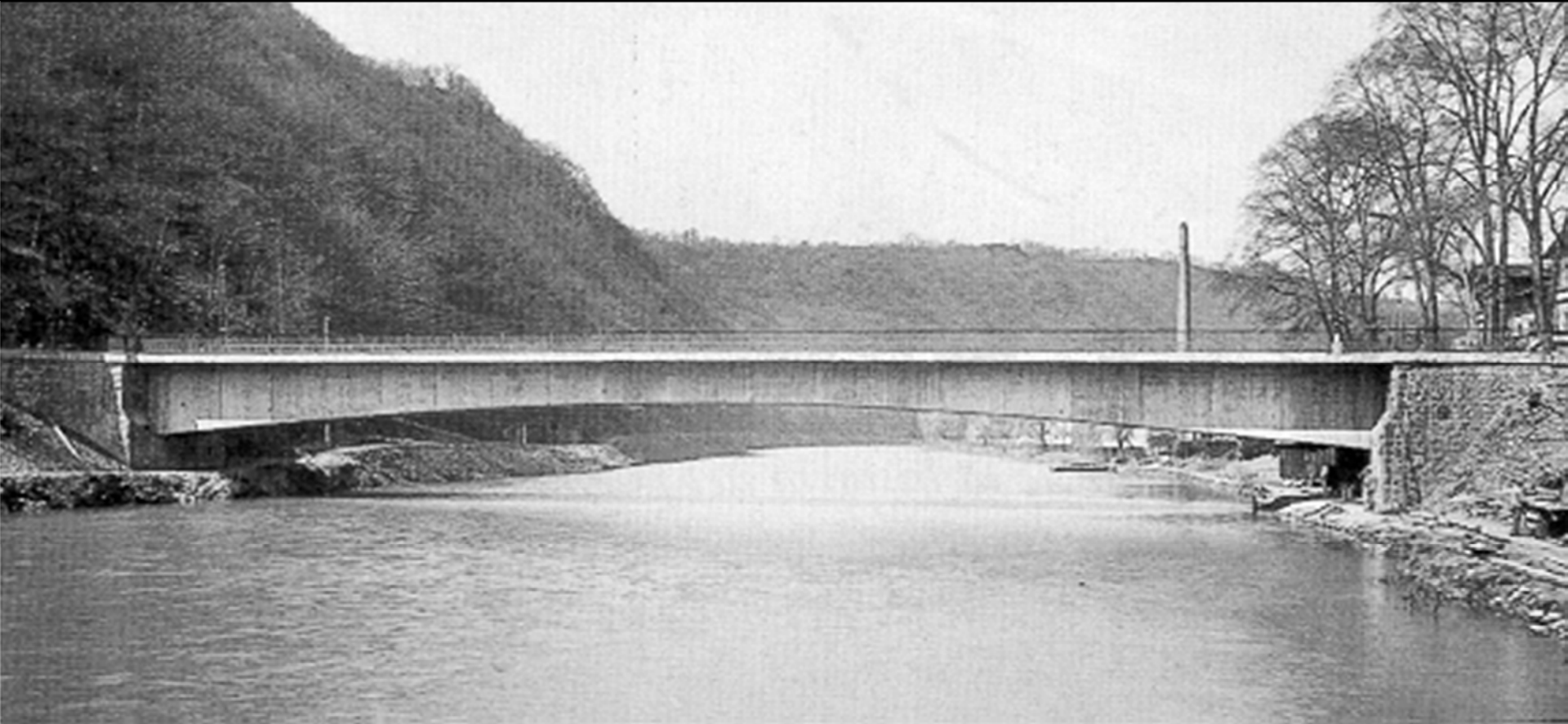
Elementos móviles y gatos para el tesado característicos del sistema Baur-Leonhardt, directamente "inspirado" en el procedimiento empleado por Freyssinet en Le Havre



■ El *puente de Heilbronn*, secciones y armadura activa. Al tratarse de un puente para tráfico ligero, la esbeltez alcanzada fue considerable (1/59 a 1/24.4)

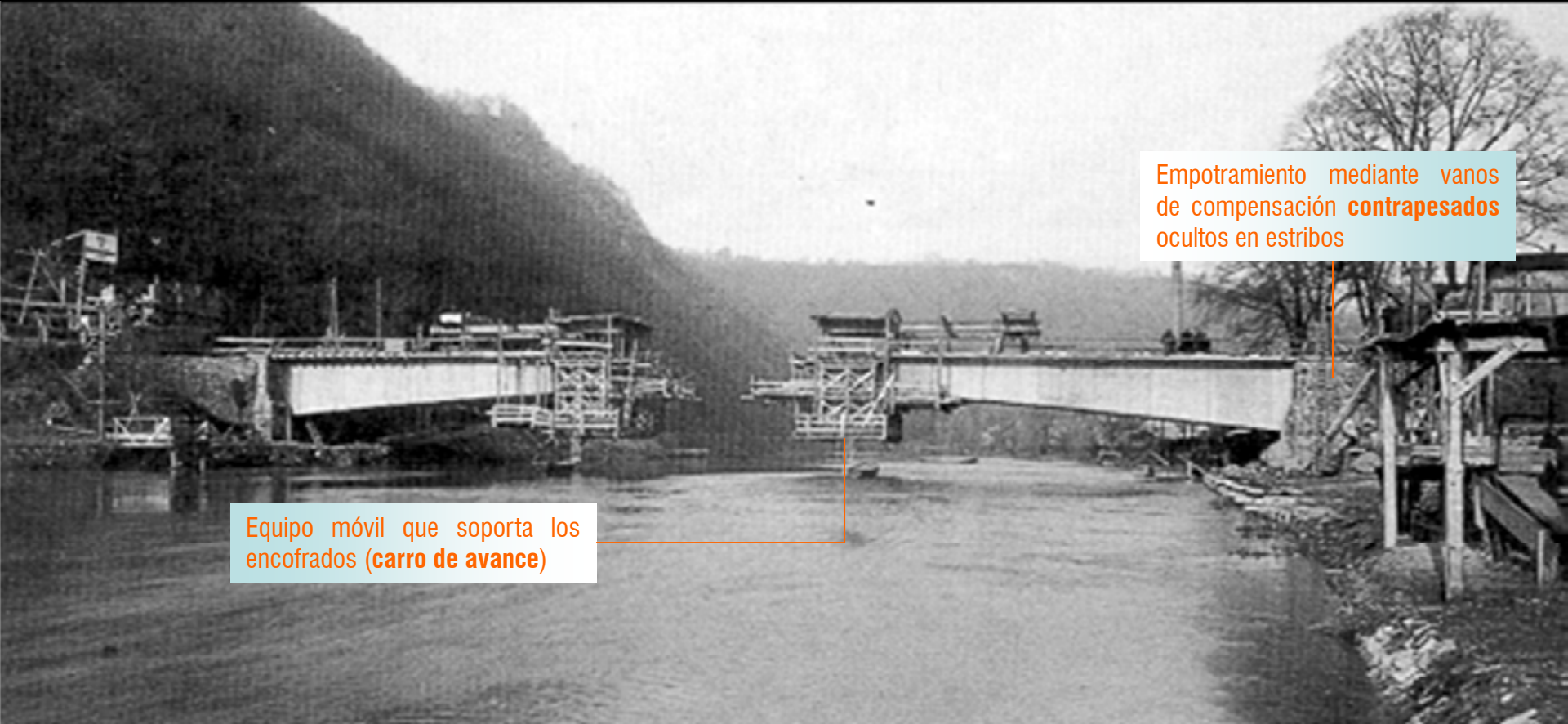
<5.2 LOS PRIMEROS Puentes DE HORMIGÓN PRETENSADO (1937-1960)>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ El *puente de Balduinstein* sobre el río Lahn, el primer puente de hormigón pretensado construido por voladizos sucesivos (1950, 62 m de luz. U. Finsterwalder, Dyckerhoff & Widmann)

05 Puentes de hormigón pretensado

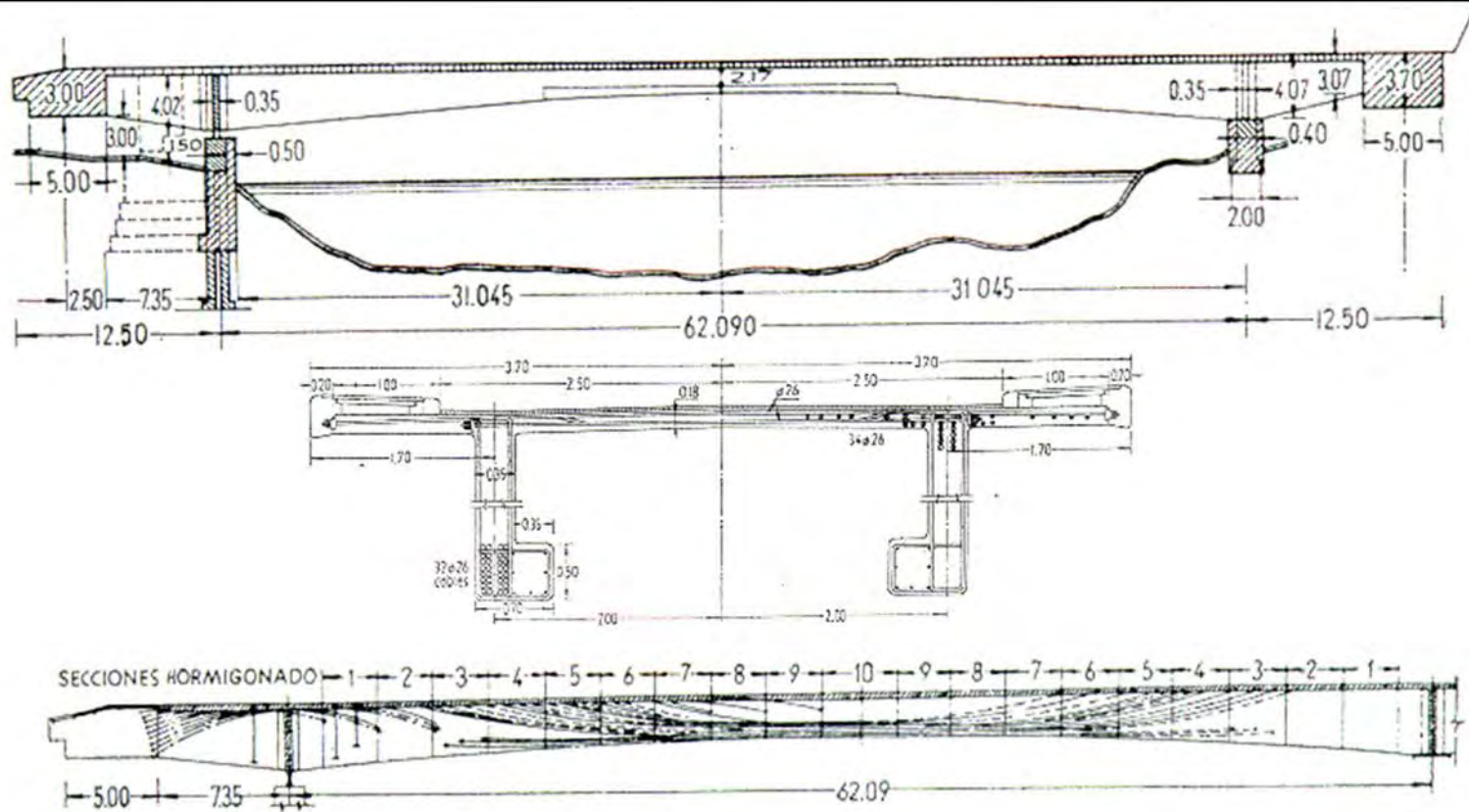


Equipo móvil que soporta los encofrados (**carro de avance**)

Empotramiento mediante vanos de compensación **contrapesados** ocultos en estribos

▪ El *puente de Balduinstein* en construcción

05 Puentes de hormigón pretensado

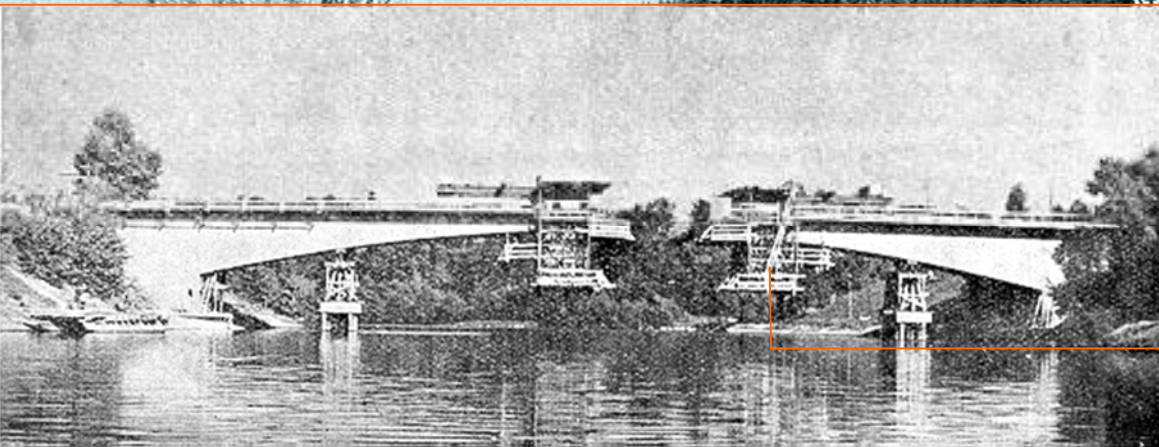


▪El *punte de Balduinstein*, armadura activa

05 Puentes de hormigón pretensado



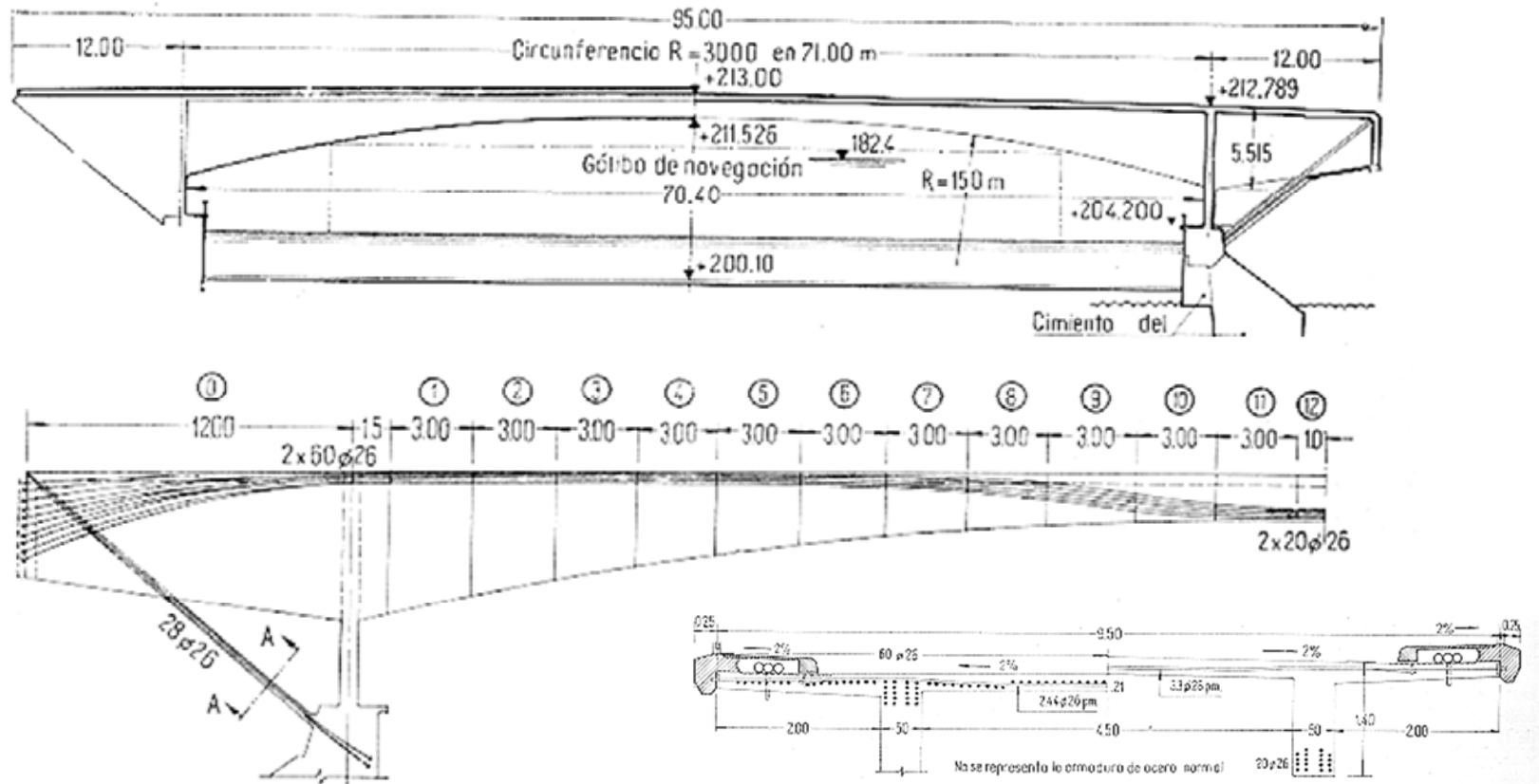
Empotramiento mediante **célula triangular** oculta en estribos



Equipo móvil que soporta los encofrados (**carro de avance**)

▪ El *punte de Neckarems* sobre el río Neckar (1951, 70.4 m de luz. U. Finsterwalder, Dyckerhoff & Widmann)

05 Puentes de hormigón pretensado



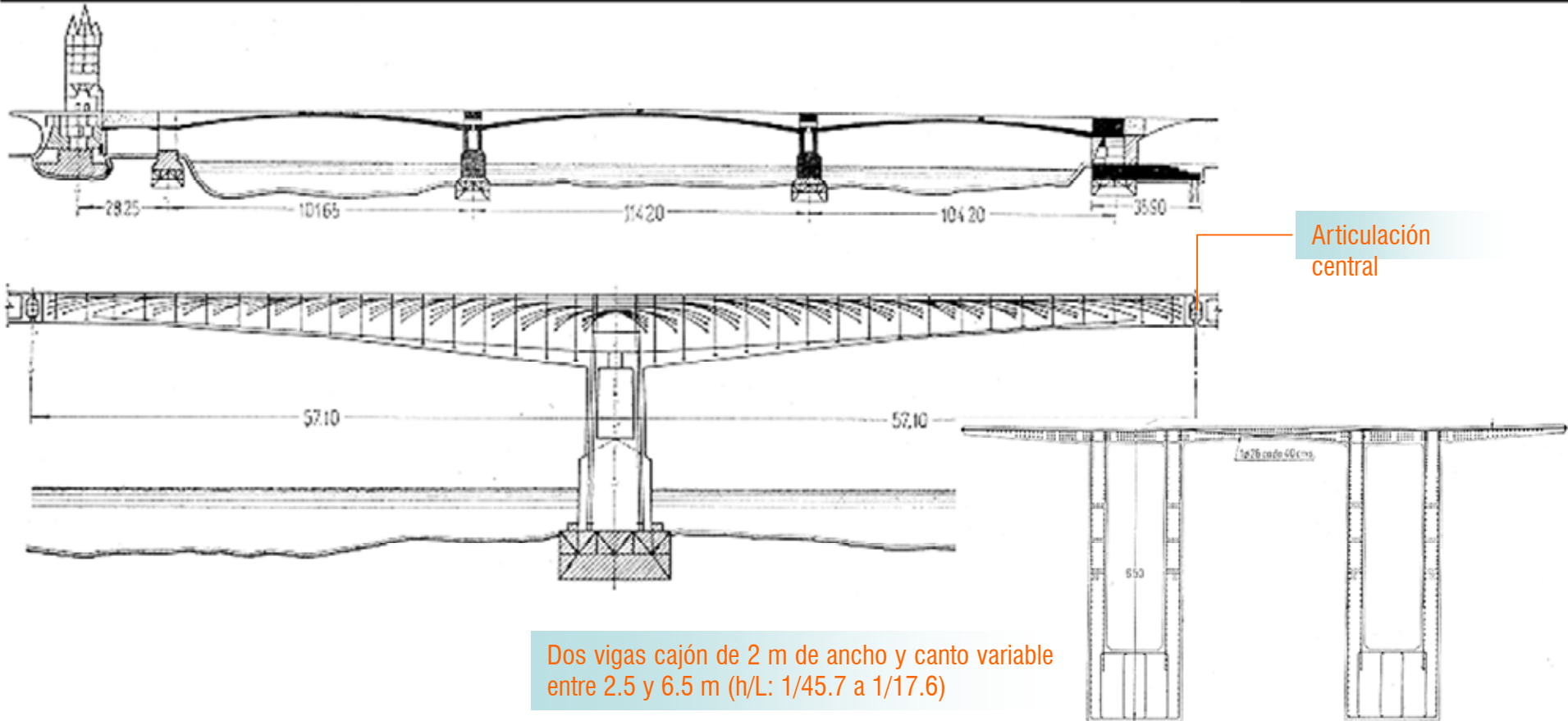
El puente de Neckarems, secciones y armadura activa

05 Puentes de hormigón pretensado



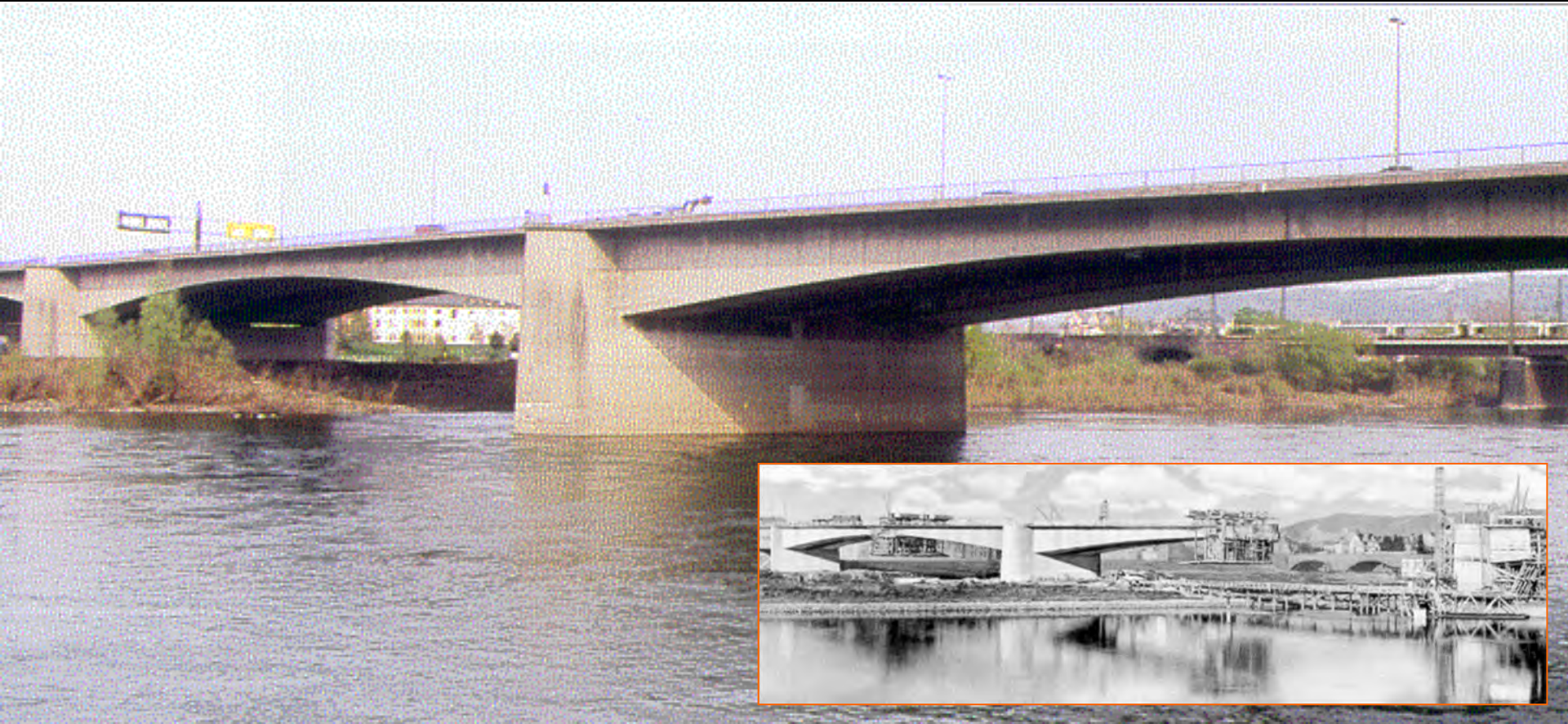
▪El *puente de los Nibelungos* sobre el Rin, en Wörms. Sus vanos de más de 100 m de luz ya compiten con los metálicos (1952, vano central de 114.20 m de luz. U. Finsterwalder, Dyckerhoff & Widmann)

05 Puentes de hormigón pretensado



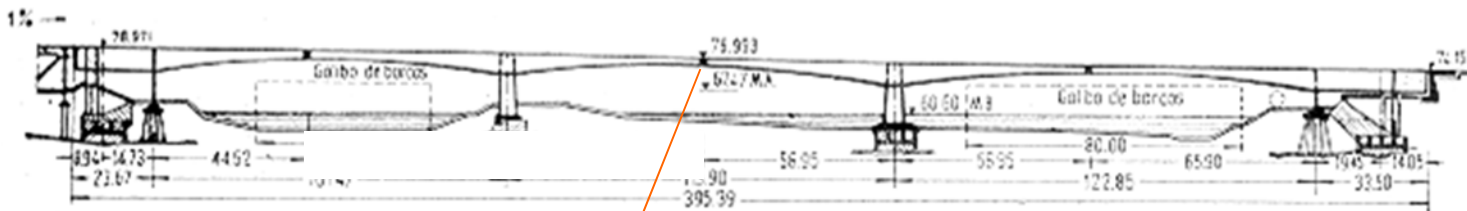
▪ El *ponte de los Nibelungos*, secciones y armadura activa

05 Puentes de hormigón pretensado

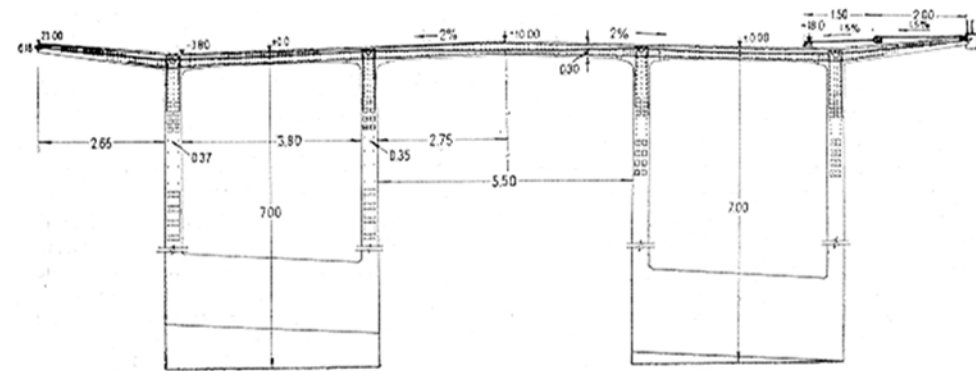


▪El *puente de Coblenza* sobre el Mosela (1953, vanos de 101+114+122 m. U. Finsterwalder, Dyckerhoff & Widmann)

05 Puentes de hormigón pretensado

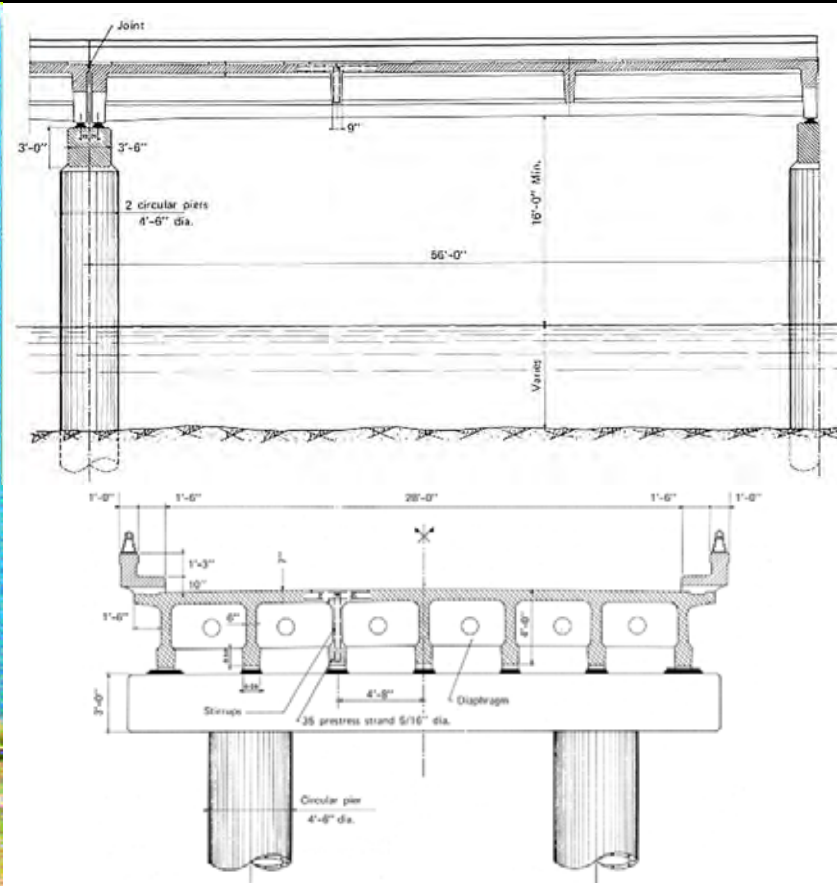


Articulación central



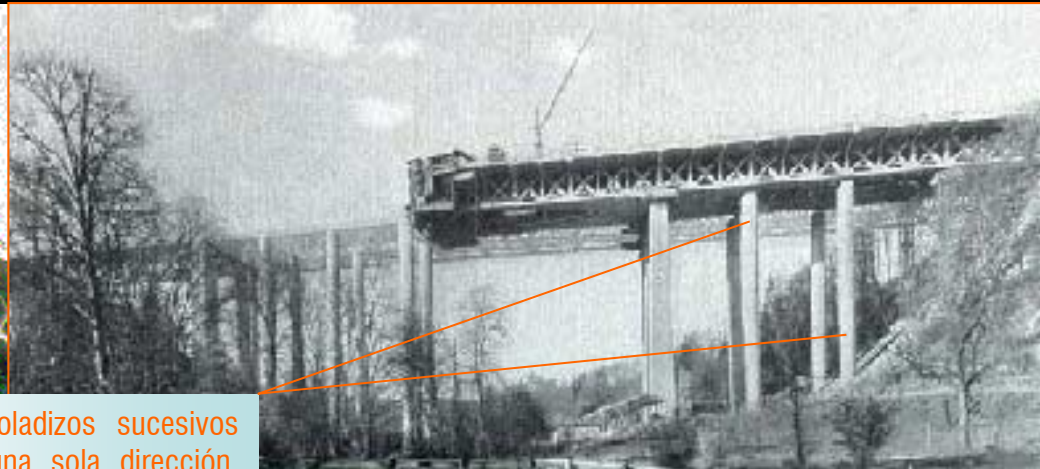
•El *ponte de Coblenza*, alzado y secciones

05 Puentes de hormigón pretensado

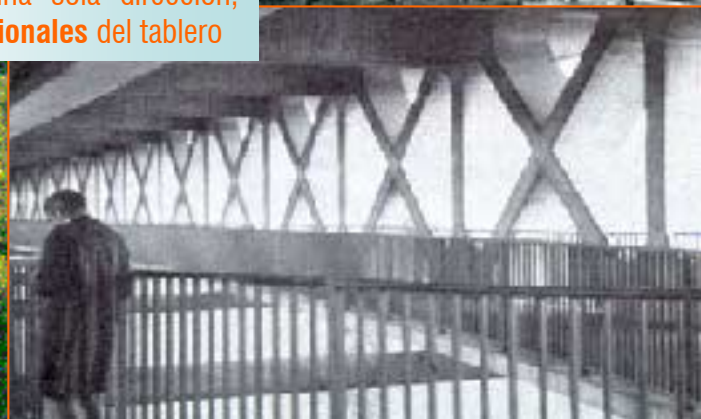


El puente sobre el lago Pontchartrain (1956, 2232 vanos de 17 m, resultando una longitud total de 38 km)

05 Puentes de hormigón pretensado

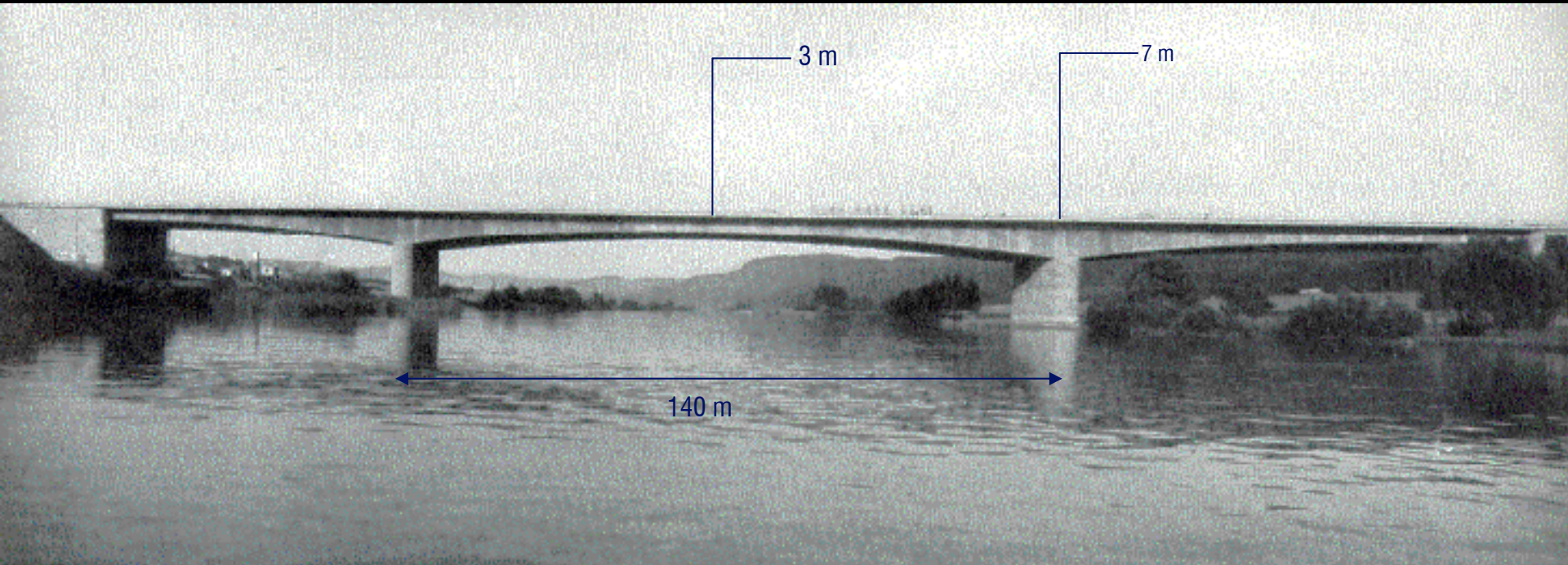


Construido por voladizos sucesivos progresando en una sola dirección, con **apoyos provisionales** del tablero



▪ El *puente de Mangfall* en la autopista Múnich-Salzburg (1959, vanos de 90+108+90 m. U. Finsterwalder y G. Lohmer. Dyckerhoff & Widmann)

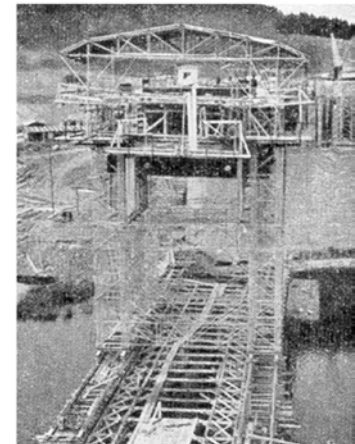
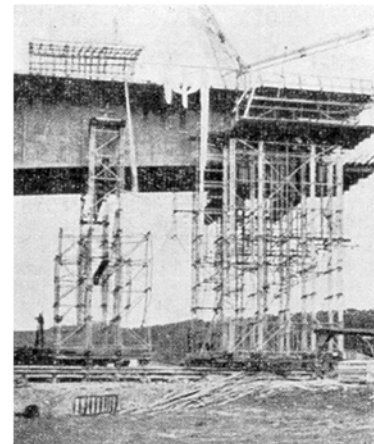
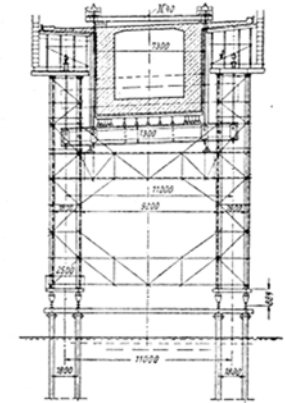
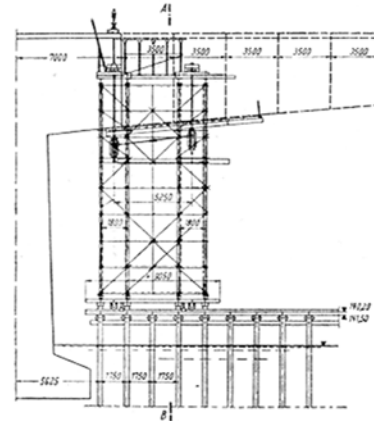
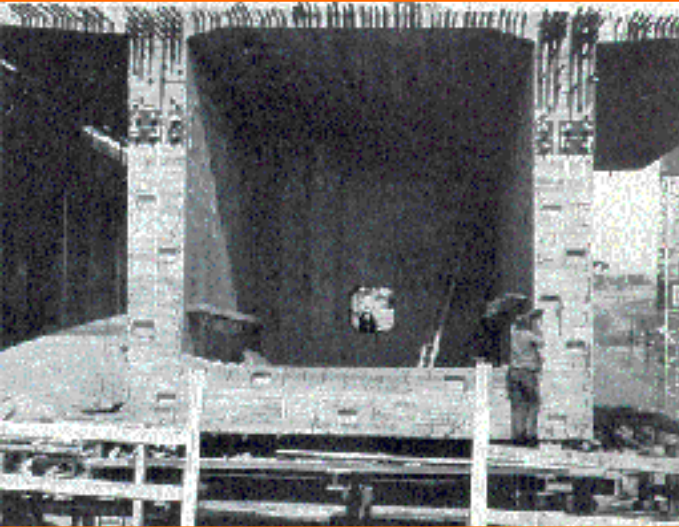
05 Puentes de hormigón pretensado



Los primeros grandes puentes construidos por la técnica de voladizos sucesivos se concibieron **con articulación central** por resultar una estructura isostática para el cálculo de esfuerzos debidos al pretensado y a las acciones gravitatorias en general (*Nibelungos*, *Coblenza* y otros ejemplos franceses anteriores a 1960). Sin embargo, el record en este período correspondió a un dintel **sin** articulación central: el **puente de Bettlingen**

▪ El **puente de Bettlingen** sobre el Main (1960, 140 m de luz. H. Wittfoht. Polensky & Zöllner)

05 Puentes de hormigón pretensado



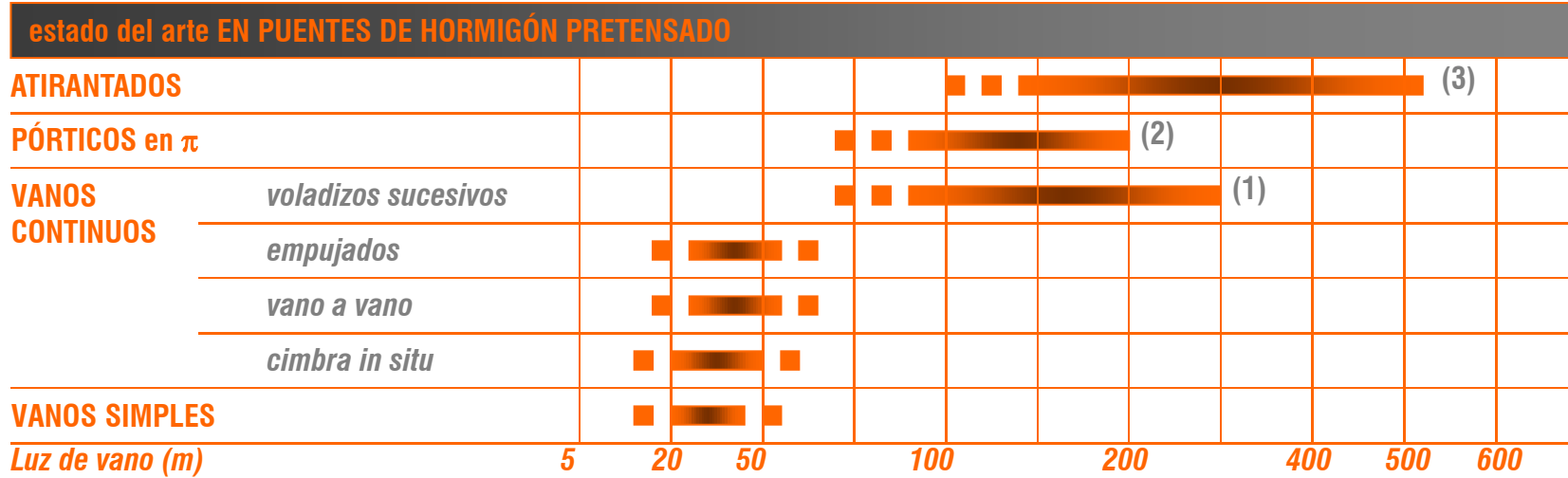
▪ El *puente de Bettingen*: parte de la construcción se llevó a cabo mediante un apeo deslizante con el fin de reducir esfuerzos durante el avance, limitando así el voladizo al vano impuesto por el canal de navegación

05 Puentes de hormigón pretensado

□ ALGUNAS CONSIDERACIONES:

- Es necesario **reconstruir Europa a bajo precio**, escasea el acero y los puentes (y las presas) han sido objetivo prioritario de alemanes y aliados
- La promoción de las nuevas técnicas induce la aparición de organismos como la **F.I.P.** que apoyan a los ingenieros e investigadores y promueven la elaboración de manuales y reglamentos
- **Freyssinet** en Francia y **Finsterwalder** en Alemania son los creadores que impulsan y avalan la carrera del HP con el acero (también Leonhardt y Dischinger, Magnel en Bélgica y en España Fernández Casado)
- Grandes individualidades y grandes empresas constructoras se asocian para beneficio mutuo, acelerándose de ese modo el desarrollo de nuevas técnicas pero con un claro sesgo crematístico: Freyssinet-Campenon Bernard, Finsterwalder-Dyckerhoff & Widmann, Wittfoht-Polensky & Zöllner...
- El hormigón pretensado ofrece todavía hoy en día posibilidades (márgenes de beneficio) vía estudio de la prefabricación de estructuras de mayores luces y **puentes a la carta**, puesto que un puente de acero sigue diseñándose como un prototipo
- Partiendo de 1960, la experiencia acumulada despeja un **cuadro suficientemente claro de opciones estructurales/constructivas**

05 Puentes de hormigón pretensado

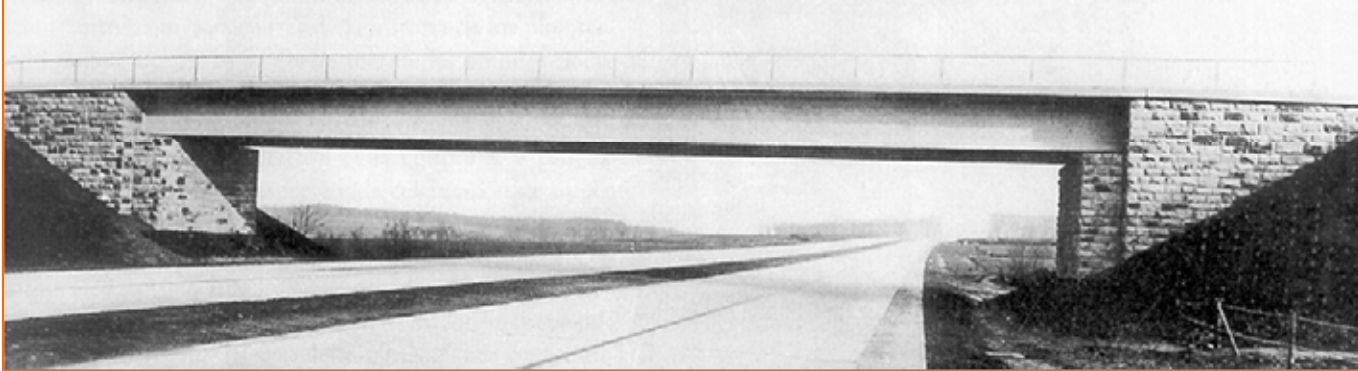


- (3) Puente de Skarsundet (Noruega, 530 m, 1991)
- (2) Pont sur la Truyère (Francia, 195.5 m, 1993)
- (1) Puente de Stolmasundet (Noruega, 301 m, 1998)

05 Puentes de hormigón pretensado

- Morfología primaria con innegables ventajas constructivas (simplicidad y economía de medios gracias a la prefabricación)
- La solución más económica para puentes de un solo vano o viaductos con luces cortas (menores de 50 m)
- En su evolución se ha sacrificado la eficacia estructural en beneficio de la simplicidad de ejecución
- Se adapta mal a trazados con curvatura (en planta o en alzado)
- Su estética *industrial* no es precisamente su principal aliado

Puente de Oelde. El arquetipo de los tramos simples de vigas (1938, un vano de 33 m, Freyssinet-Wayss & Freytag)

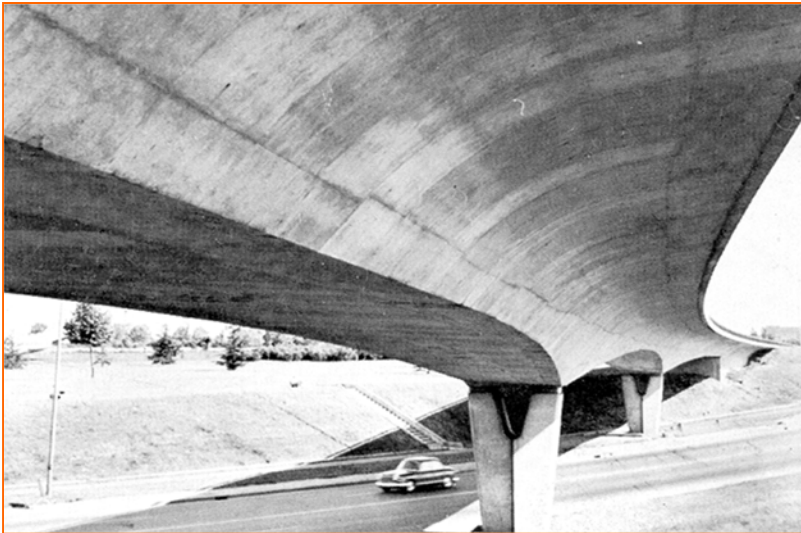


<5.3.1 Tramos simples de vigas>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

- El sistema de construcción con mayores posibilidades estéticas y de adaptación a las formas resistentes óptimas y a las exigencias del trazado: vigas, losas y pórticos con canto variable, plantas curvas, ancho variable...
- La supresión de juntas proporciona comodidad y reduce la degradación de la obra
- Solución cara, aunque asumible en *longitudes moderadas*, puesto que cada puente es prácticamente un prototipo



El *puente Nº 10 de Orly*: patrón de los pasos superiores in situ (1958, Freyssinet y Gaillard, vano central de 53.40 m)



Andamiaje metálico y encofrado de madera

<5.3.2 Puentes continuos hormigonados mediante cimbra>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ *Paso superior de la Vía Olímpica* sobre el Corso Francia (Roma, 1960, vano de 38 m, R. Morandi)



▪ *Paso superior de Dr. Esquerdo-Méndez Álvaro* (Madrid, 1971, vanos de 35 m, C.F.C.S.L.)

<5.3.2 Puentes continuos hormigonados mediante cimbra>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *puente de las Artes* sobre el antiguo cauce del río Turia (1998, vanos de 35 m, $h/L=1/50$ a $1/23$. C.F.C.S.L.)

<5.3.2 Puentes continuos hormigonados mediante cimbra>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

- Solución económica para viaductos de luces moderadas y gran longitud (superior a 300 m) al sintetizar las ventajas de la continuidad estructural, inherente a los puentes hormigonados in situ, con la fabricación industrializada del tablero
- En este sistema, el pretensado necesario en cada fase puede ajustarse al requerido en servicio, con el consiguiente **ahorro** respecto a otras técnicas
- Admite canto variable y la prefabricación por dovelas
- La importante inversión inicial en equipos y los costes de su adaptación a obras con geometrías diferentes exige varios usos para su amortización (al menos cuatro)
- Luces mayores (hasta 90 m) requieren apoyos o atirantamiento provisionales

Viaducto de Kettiger Hang, el primer puente construido vano a vano mediante cimbra autoportante autolanzable (1955, vanos de 39.20 m. H. Wittfoht-Polensky & Zöllner)



<5.3.3 Puentes continuos construidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

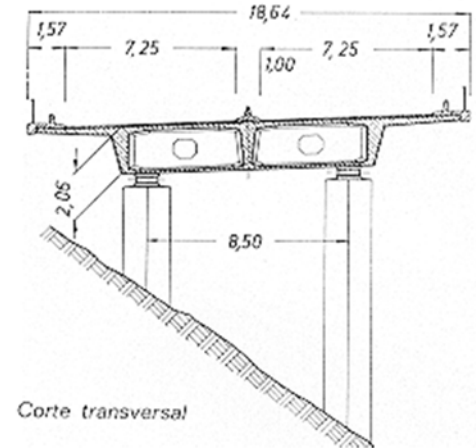
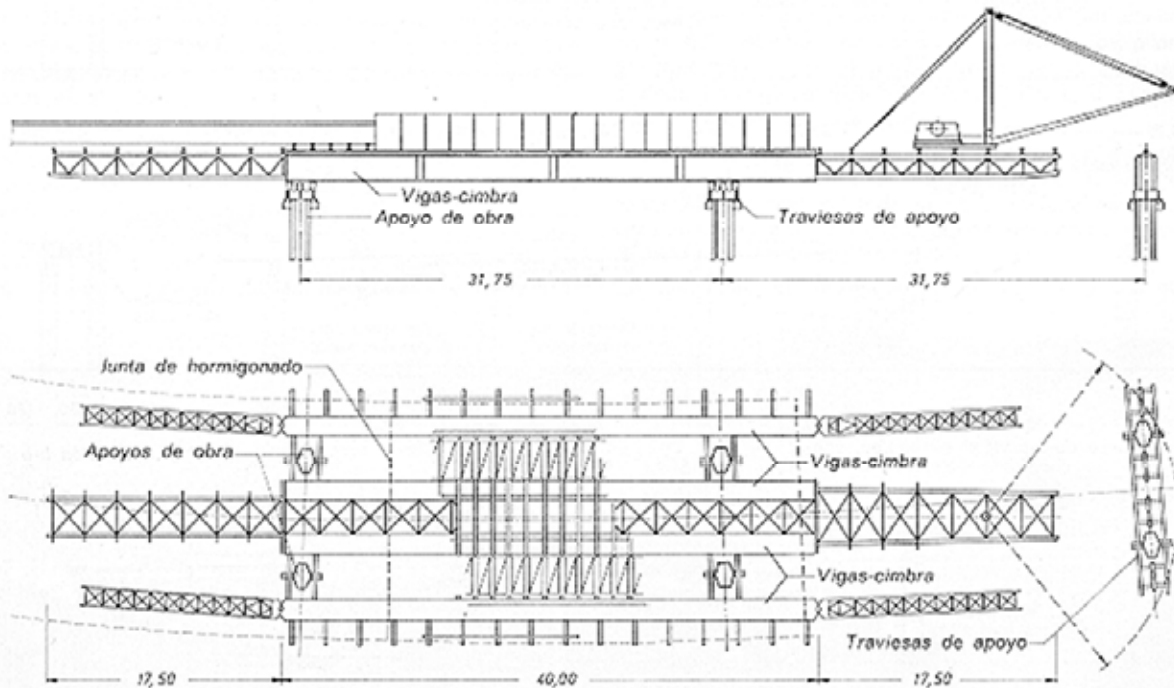


▪Obras: el *puente de Krahenberg*, cerca de Andernach y siguiendo el valle del Rin (Alemania, 1964. H. Wittfoht. Polensky & Zöllner)

<5.3.3 Puentes continuos contruidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▀ Obras: el *punte de Puente de Krahenberg*: esquema general de la cimbra en posición de hormigonado

<5.3.3 Puentes continuos construidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ *Viaducto de Pfeddersheim*, vanos de 45 y 50 m (Alemania, 1962. H. Wittfoht. Polensky & Zöllner)



▪ *Viaducto de Vinxbachtal*, vanos de 45 y 50 m (Alemania, 1962. H. Wittfoht. Polensky & Zöllner)

<5.3.3 Puentes continuos contruidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *puente del Elztal* (Alemania, 1965, vanos de 37.5 m, **U. Finsterwalder**, Dyckerhoff & Widmann)

<5.3.3 Puentes continuos contruidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

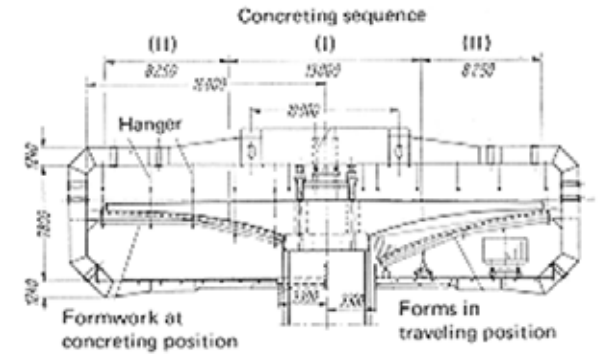
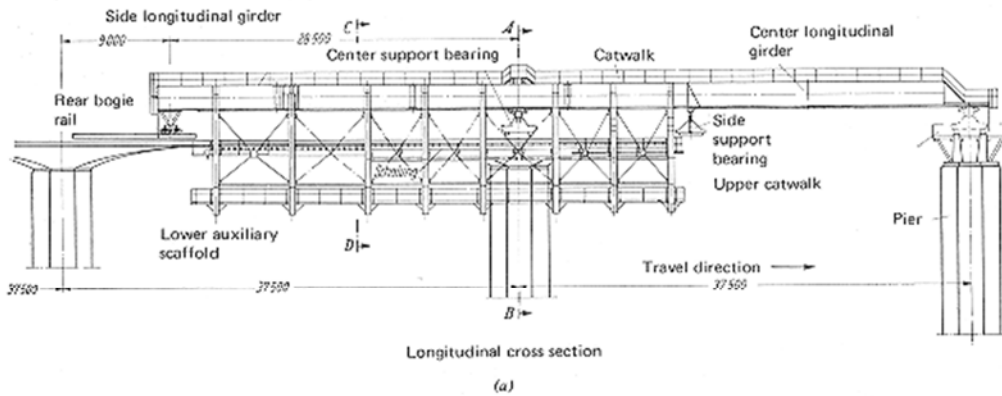


▪Obras: el *puente del Elztal*, construcción

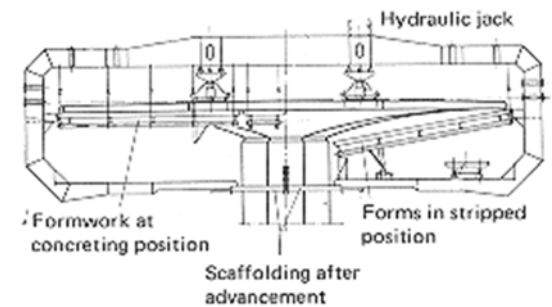
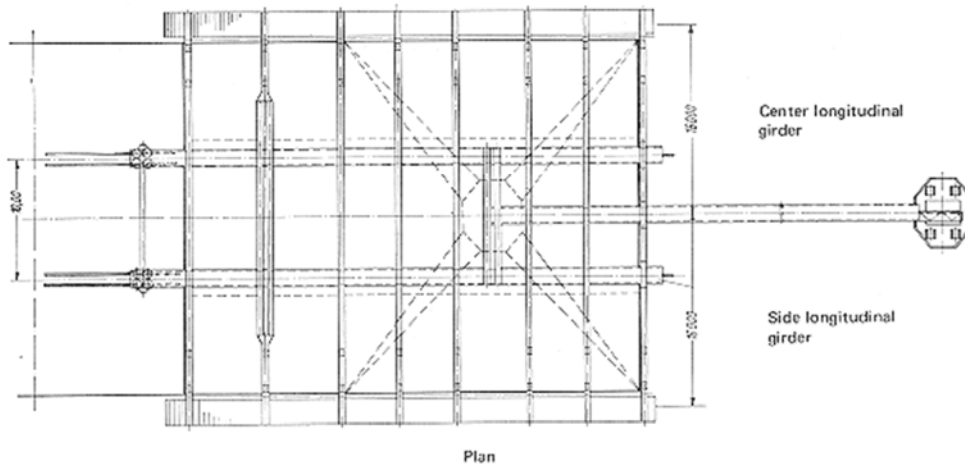
<5.3.3 Puentes continuos contruidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



Section A-B



Section C-D

▀ Obras: el *ponte del Elzta*, detalles de la cimbra móvil

<5.3.3 Puentes continuos construidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *Viaducto de Osormort*, en Cataluña (1995, 11 vanos con atirantamiento inferior, de 40 m de luz, contruidos mediante cimbra autoportante. C.F.C.S.L.)

<5.3.3 Puentes continuos contruidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



La cercha se puede trasladar en tan solo dos horas y media

▪Obras: el *Viaduto da Ribeira* (Portugal, 2001. Dos tableros paralelos de 500 m de longitud con vanos de 40 m, construidos mediante cimbra autoportante. **Construtora Abrantina-PERI**)

<5.3.3 Puentes continuos construidos vano a vano>

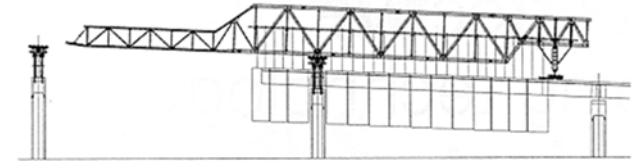
<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

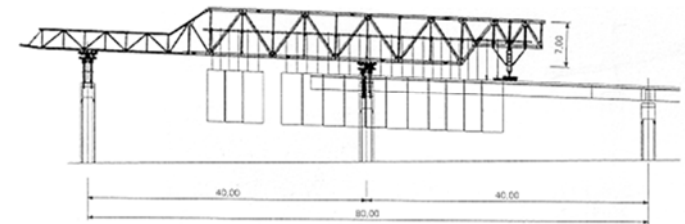
La cercha se diseñó para soportar cargas > 30 t/m



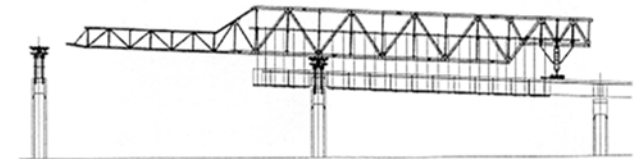
Phase 1



Phase 2



Phase 3



■Obras: el *Viaduto da Ribeira*. Tablero con sección en π ejecutado in situ mediante cimbra móvil autoportante. Velocidad de avance: 1 vano/semana ~ 7m/día

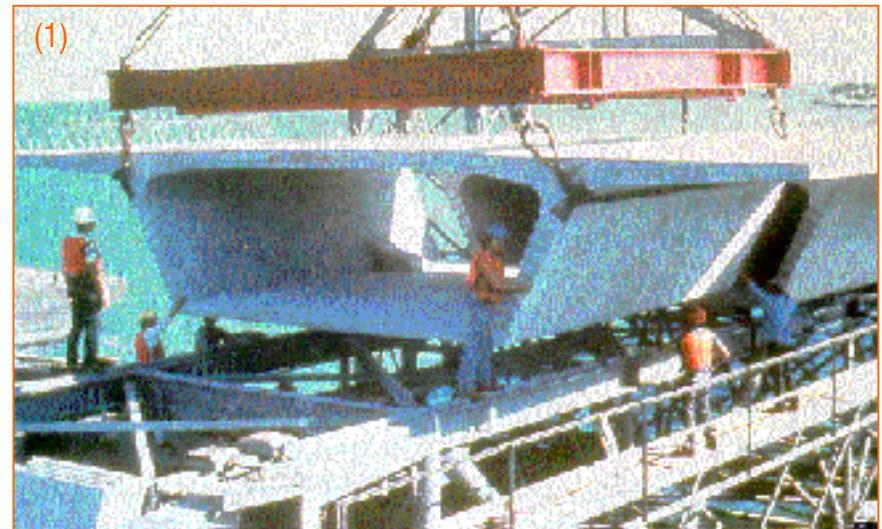
<5.3.3 Puentes continuos contruidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



- Primeros puentes construidos **vano a vano con dovelas prefabricadas** unidas mediante pretensado exterior
- **Puente de Long Key**: 101 vanos de 36 m, montados con cerchas metálicas bajo tablero (108 m/semana)
- **Puente de seven Mile**: 264 vanos de 41.15 m, ensamblados con viga metálica atirantada por encima del tablero



Dovelas de ambos puentes, de 2.01 m de canto y 2.76 m de longitud

▪ Obras: los *puentes de Long Key*⁽¹⁾ y de *Seven Mile*⁽²⁾ (Florida, 1978 y 1983. Figg & Muller)

<5.3.3 Puentes continuos construidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



- PANORÁMICA GENERAL y ejecución análogas a los dos puentes anteriores (misma ingeniería)
- Altura de pilas variable entre 2.5 y 33 m
- 1800 dovelas unidas mediante pretensado exterior con juntas a hueso (sin adhesivo ni mortero)
- Se utilizaron dos equipos de cerchas lanzaderas, llegando a alcanzar velocidades de 33 m/día

▪ Obras: *autopista Rómulo Betancourt* (Venezuela, 1988. Cuatro viaductos con una longitud total de 5084 m de tablero repartidos en vanos de 34 a 46 m. Figg & Muller)

<5.3.3 Puentes continuos construidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



- Dovelas prefabricadas con almas trianguladas unidas mediante *pretensado exterior*
- Cada vano se ensambla dovela a dovela, colgado de una cimbra atirantada
- P. Richard, Bouygues

▪ Obras: viaducto de Bubiyan, en Kuwait (1982, luces de 40 m)

<5.3.3 Puentes continuos contruidos vano a vano>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

- Sistema directamente adaptado de la construcción metálica que requiere medios auxiliares de coste razonable y proporciona buenas calidades de ejecución al centralizar todas las operaciones en una zona restringida y protegida
- Al igual que en la construcción vano a vano in situ, solo existen juntas de hormigonado entre fases
- Solución estructuralmente cara por las condiciones de sollicitación propias del empuje. Estas imponen **cantos importantes y constantes** ($h/L \sim 1/10$) que se adaptan mejor a los puentes de ferrocarril y a los acueductos
- El pretensado impuesto por el lanzamiento del tablero debe **centrarse** y por lo tanto no se ajusta al requerido en servicio
- Luces superiores a las óptimas (~ 40 m) requieren **apoyos o atirantamiento provisionales** y se necesita espacio en estribos para ubicar el área de trabajo
- Solo permite trazados en planta de **curvatura constante**

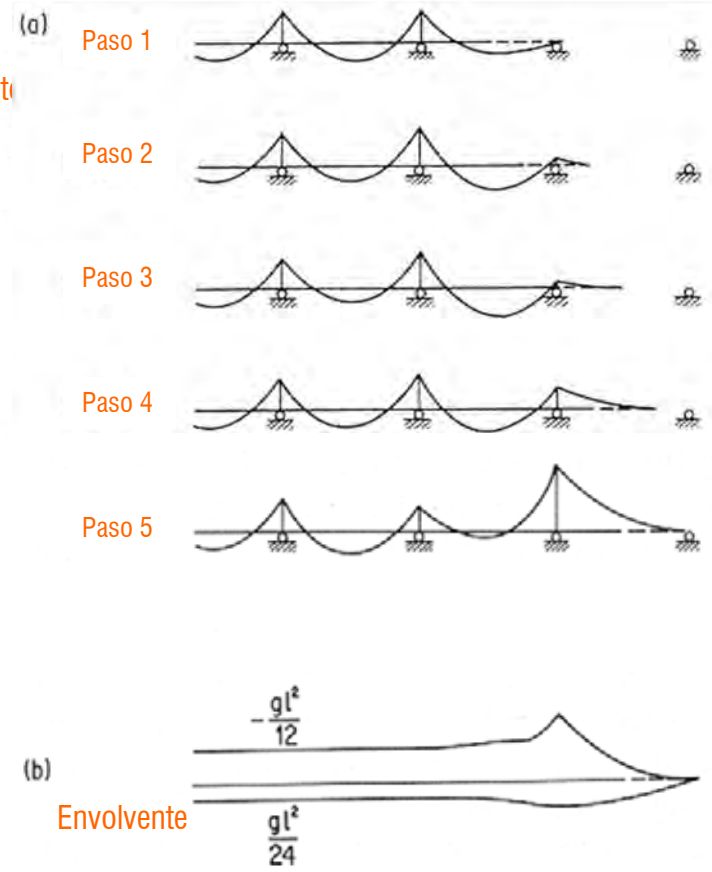
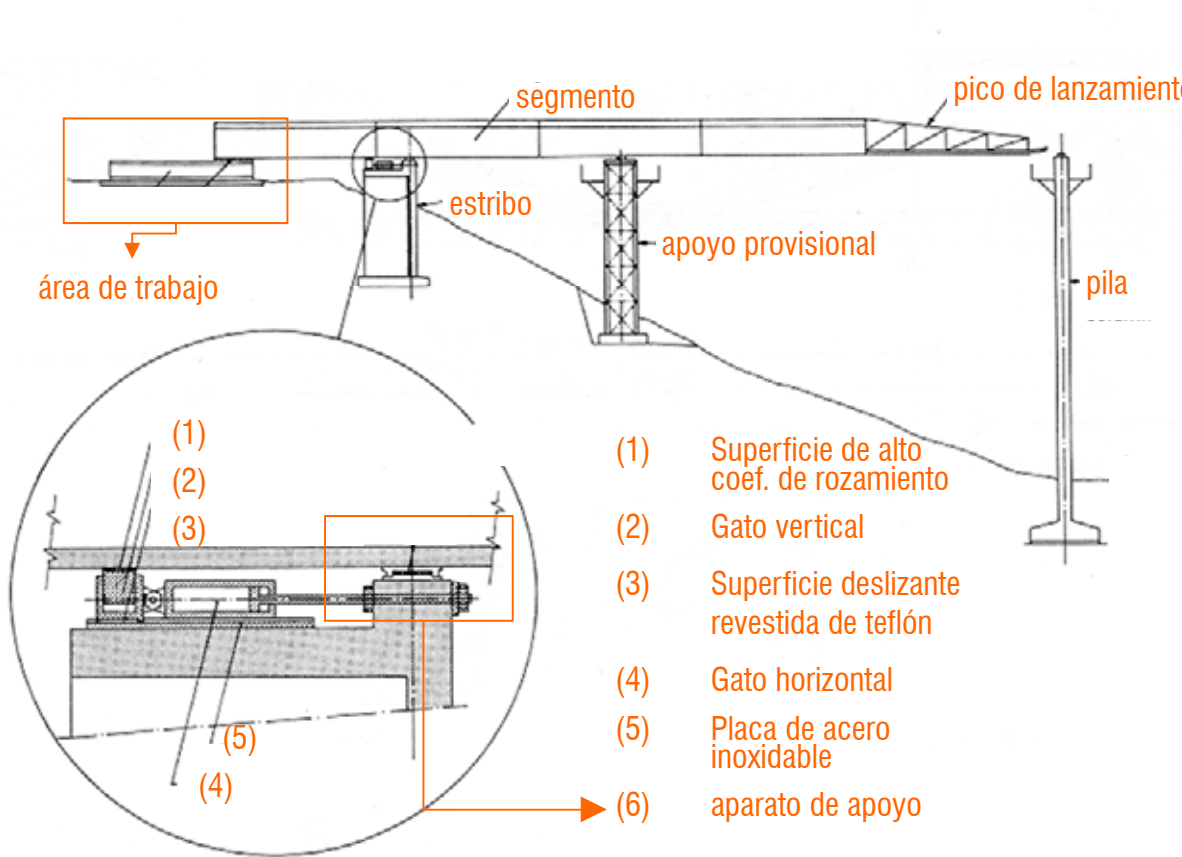


El **puente sobre el río Caroní**: primer puente de hormigón pretensado empujado (Venezuela, 1963. Vanos de 96 m, Leonhardt & Ändra)

<5.3.4 Puentes empujados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

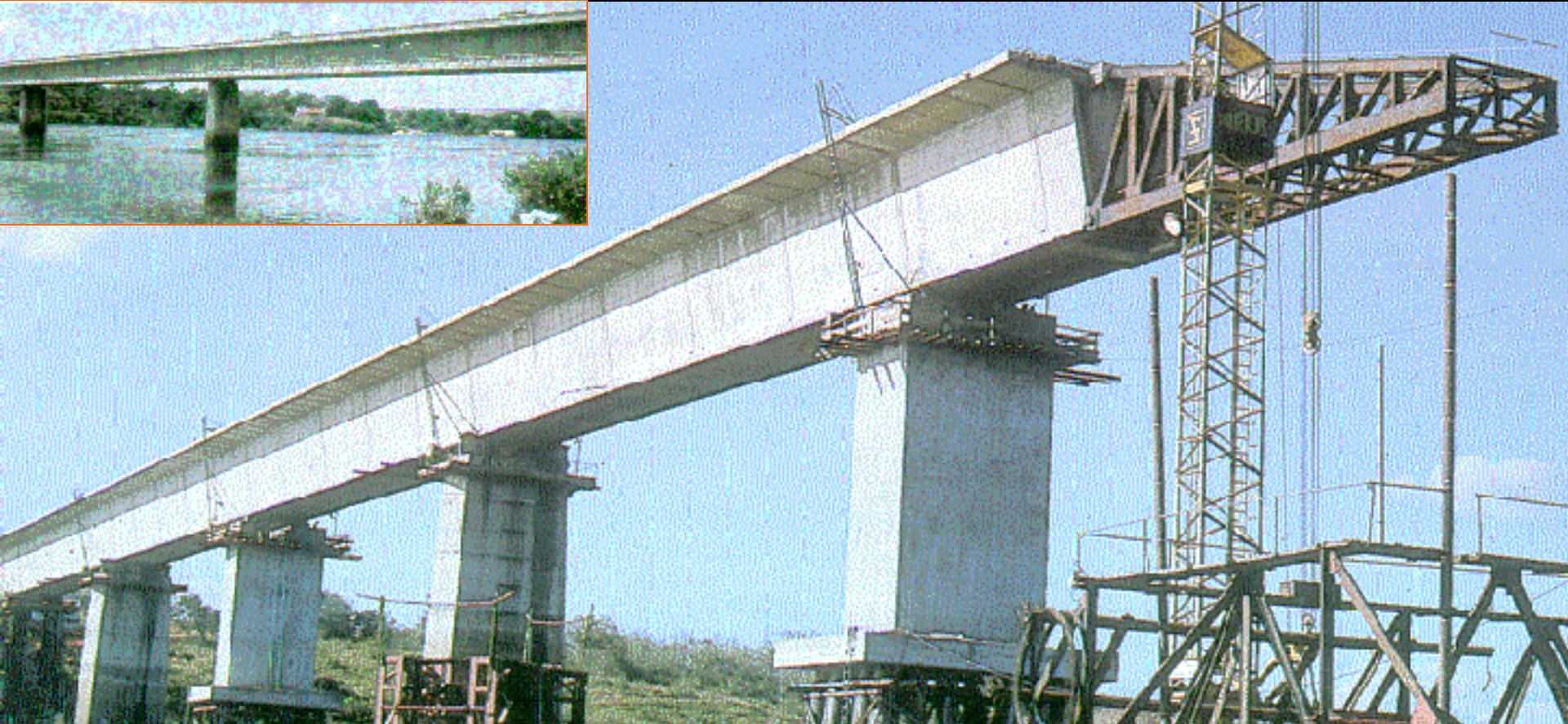


■ Puentes empujados: esquema organizativo, medios auxiliares para el empuje, momentos flectores de peso propio durante el empuje y envolvente asociada

<5.3.4 Puentes empujados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■Obras: el *punte sobre el río Caroní* entre San Félix y Puerto Ordaz (Venezuela, 1963. Vanos de 96 m con apoyos provisionales a media luz. Leonhard & Ändra)

<5.3.4 Puentes empujados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■Obras: el *acueducto del Alcanadre*, en el canal de Cinca, Huesca (1977, vanos de 60 m, C.F.C.S.L.)

<5.3.4 Puentes empujados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

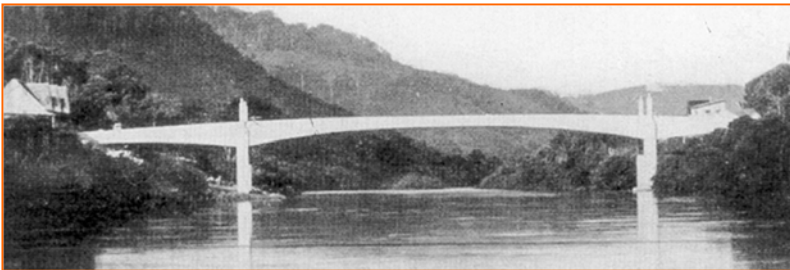
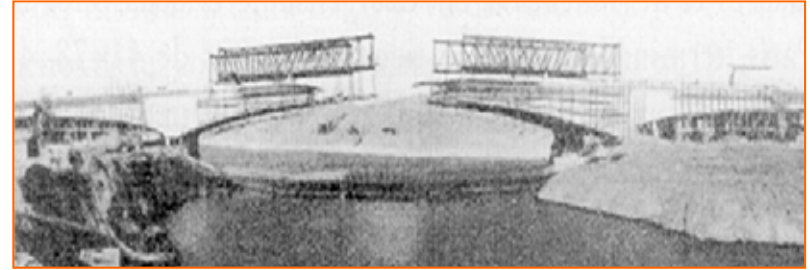
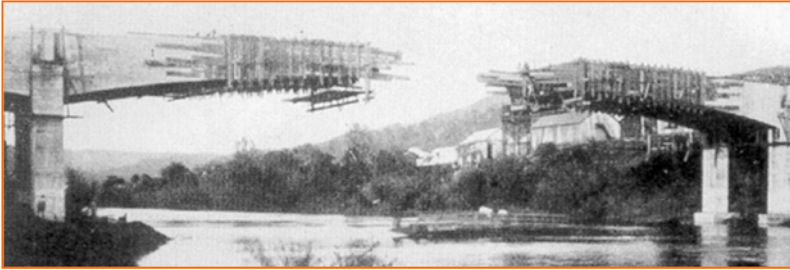
- Esta técnica se desarrolló en el siglo XIX para la construcción de tableros y arcos metálicos con pésimas condiciones de apeo y se aplicó posteriormente a la construcción de puentes de HA
- Permite abordar una amplia gama de luces (de 75 a 300 m), tanto en vanos simples compensados como en largos viaductos, sin necesidad de apoyar en el terreno y con medios auxiliares de coste moderado
- Puede aplicarse a estructuras hormigonadas in situ o prefabricadas por dovelas, con canto y curvatura variables o constantes
- En estructuras de gran luz, para las cuales $(G)/(G+Q) \rightarrow 1$, el **pretensado de voladizo** puede ser más potente que el requerido en servicio salvo que se mantengan las articulaciones centrales
- La supresión de la articulación central, deseable por durabilidad, mantenimiento y confort, exige disponer **tendones de solidarización** en centro de vano
- Para que esta práctica no suponga sobrecoste es entonces necesario reducir los esfuerzos durante el avance con algún dispositivo auxiliar (atirantamiento o estructura de suspensión provisional)



<5.3.5 Puentes contruidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



(1) Puente sobre el río Peixe cerca de Herval. 1931. Vano central de 68.5 m. H. Baumgart (HA)

(2) Puente sobre el canal de Donzère-Mondragon. 1950. Vanos de 79.5+100+79.5 m. A. Caquot (HA)



(3) Puente "Jacques Bouloche" en Bezons. 1951. Vanos de 55+95+55 m. A. Caquot (HA)

(4) Puente de Balduinstein. 1950. Un vano de 62 m. U. Finsterwalder (HP)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

(a) Elementos característicos de los puentes construidos por avance en voladizo:

(a.1) direcciones de avance

(a.2) carros móviles / dovelas prefabricadas

(a.3) elementos auxiliares (apoyos o tirantes provisionales, cerchas...)

direcciones de avance

hormigonado

dovelas in situ

dovelas prefabricadas

Una: voladizo **evolutivo**

Dos: voladizos **compensados**



<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

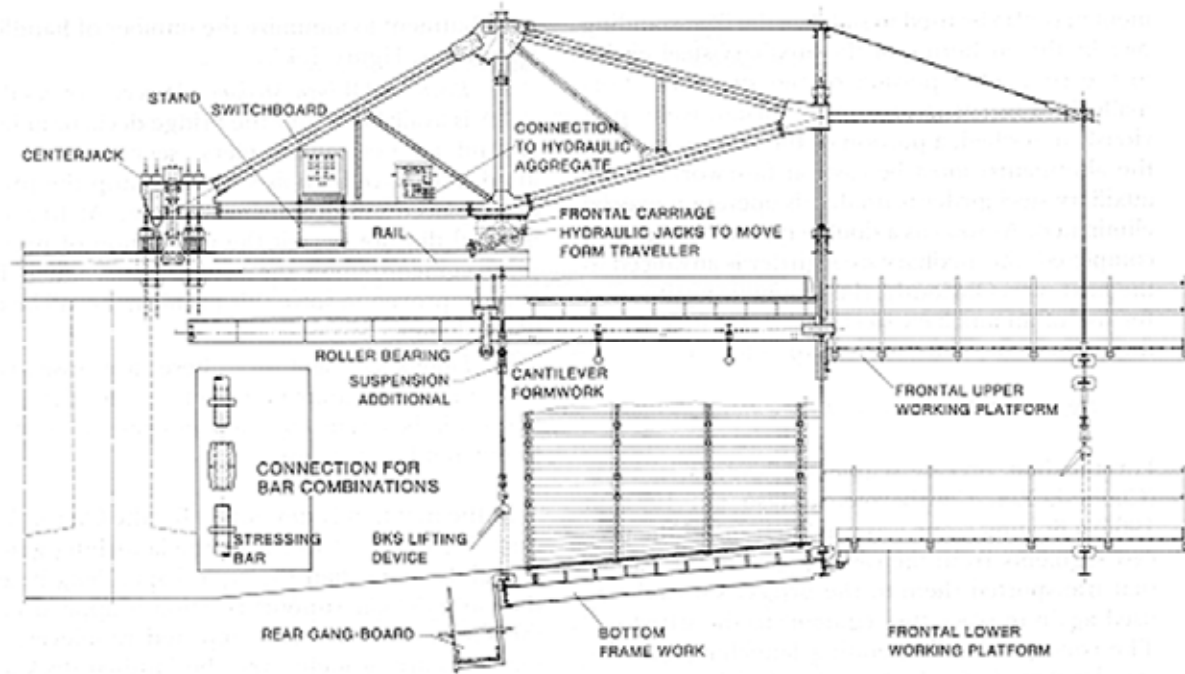
- Básicamente, la construcción por *hormigonado in situ* de dovelas requiere *menos inversión* en equipos especiales, se adapta mejor a estructuras de *pocos vanos y luces grandes* y requiere *mayores plazos de ejecución* (la velocidad media de avance puede ser de *1m/día*)
- En el otro extremo, las *dovelas prefabricadas* permiten *mayores velocidades de avance* (pueden llegar a ser superiores a los *10 m/día*), pero requieren para ello *solicados equipos* de colocación, además de una instalación o *parque de prefabricación* que solo se justifican en obras de *gran longitud y luces más modestas* (por el peso de las dovelas)



<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ **Carro móvil de 1ª generación** de la empresa Dyckerhoff & Widmann. Sus funciones:

- Asegurar el correcto *posicionamiento* de los moldes
- Soportar el *peso* del hormigón recién vertido
- Facilitar su *traslado* hacia delante, para hormigonar la dovela siguiente

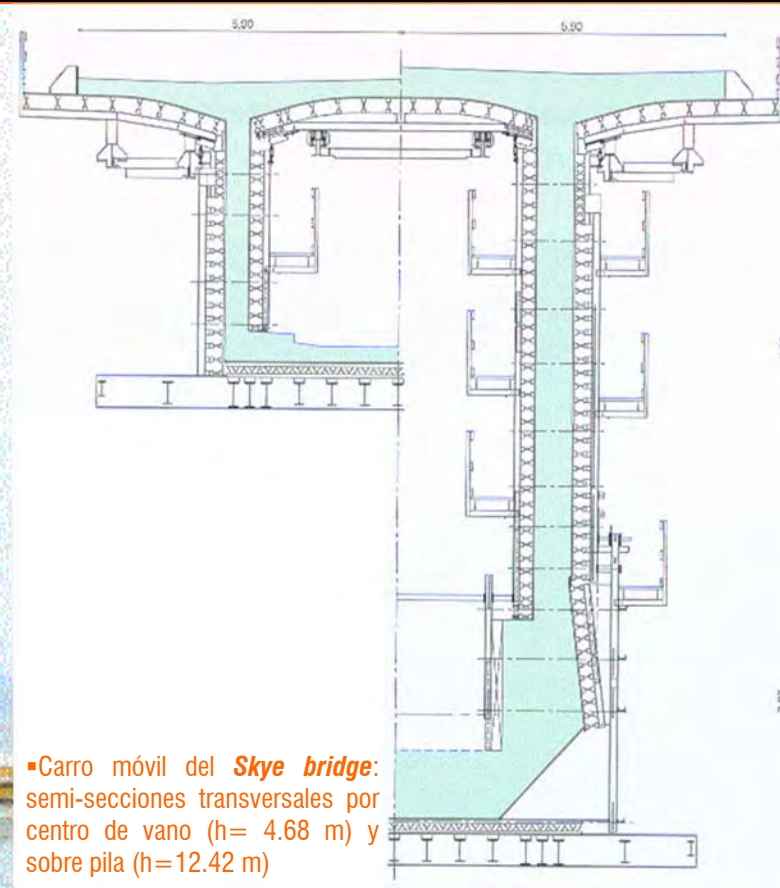
vienen desempeñadas por *distintas* partes del equipo

(a.1) Los carros móviles

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Carro móvil del *Skye bridge*: semi-secciones transversales por centro de vano ($h= 4.68$ m) y sobre pila ($h=12.42$ m)

(a.1) Los carros móviles, ejemplo de carro tradicional: carros móviles del *Skye bridge*, construidos por PERI (Escocia, 1995, 250 m de luz. Miller-Dywidag)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ **Carro móvil de 2ª generación.** Las funciones citadas:

- Asegurar el correcto posicionamiento de los moldes
- Soportar el peso del hormigón recién vertido
- Facilitar su traslado hacia delante, para hormigonar la dovela siguiente

quedan integradas en los propios moldes, al ir estos rigidizados por bastidores triangulados, lo que los convierte en **autoportantes**

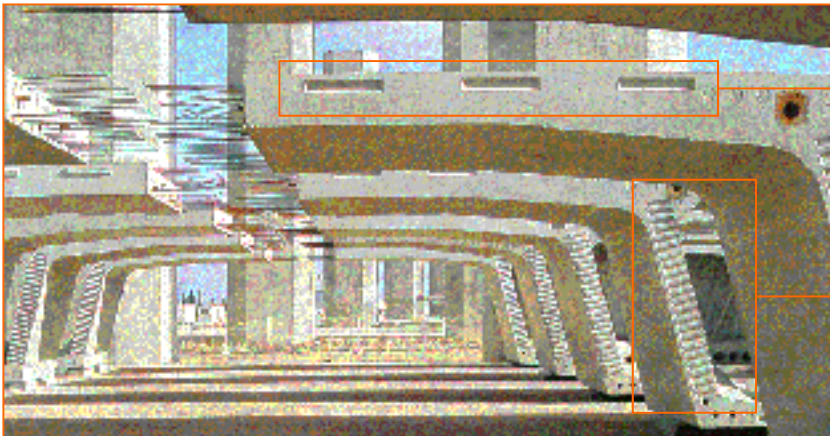
(a.1) Los carros móviles, ejemplo de carro autoportante del *puente de Chevirée* (Francia, 1989, peso total del equipo: 400 t)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

- Proporcionan importantes *reducciones de plazos* si se unen mediante *junta seca*, encolando las dovelas con resinas epóxicas
- Los *hormigones* empleados son de *mayor calidad* (50 MPa en adelante) y *edad*, aspectos siempre favorables para el pretensado (reducción de pérdidas diferidas...). Ello se consigue con tratamientos térmicos, calentando los moldes, por curado al vapor...
- Para su adecuada *conjugación geométrica y mecánica*, las dovelas disponen de *llaves* y se hormigonan una contra otra, en *banco o en célula de prefabricación*



▪ Llaves de alineación en losas superior e inferior

▪ Llaves múltiples en almas, para descargar al adhesivo de cualquier función resistente

(a.2) Las dovelas prefabricadas

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



- (1) Dovela de la **autopista Rómulo Betancourt** (Venezuela, 1988)
- (2) Dovelas de tres almas del **viaducto F9** (Melbourne, 1990)
- (3) Dovelas del **viaducto Jahra-Ghazali**, con voladizos celulares (Koweit, 1990)
- (4) Dovelas del **viaducto West Kowloon** (Hong Kong, 1995)

(a.2) Las dovelas prefabricadas

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■Obras: el *puente Vasco de Gama* (Portugal, 1997. Longitud total: 18 km, de los cuales 829 m corresponden al puente atirantado. A. Rito. NOVAPONTE)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



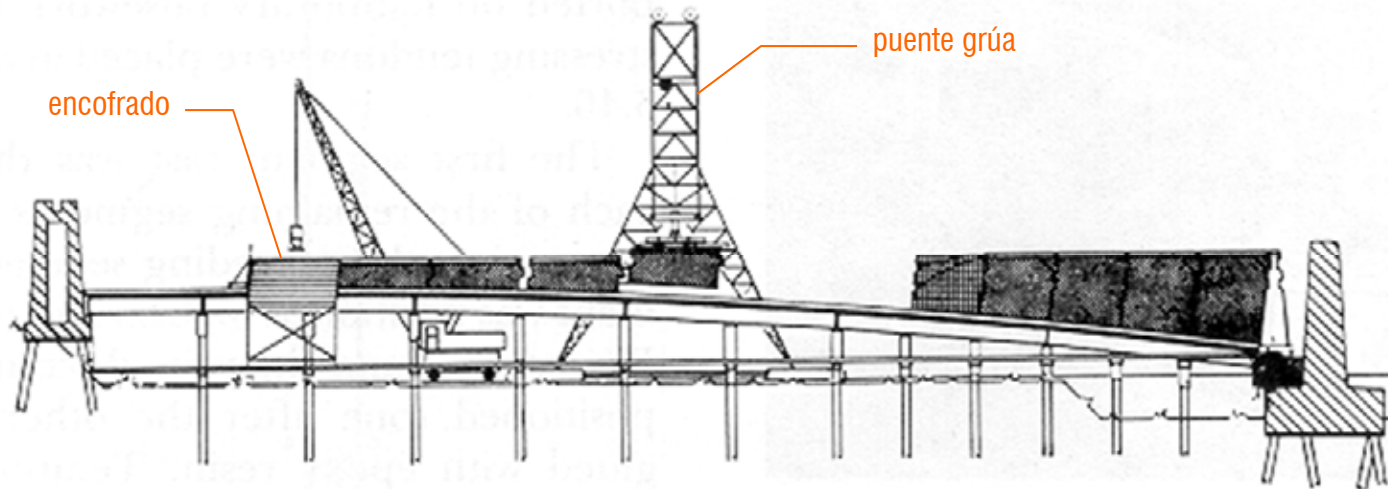
■Obras: el *punte Vasco de Gama*, parque de dovelas, con las células horizontales de prefabricación, los puentes grúa para su traslado...

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

- En este método, se hormigona de forma secuencial los **dos voladizos** y la **dovela sobre pila**, todo ello sobre un mismo banco, dovela contra dovela. De ese modo, la geometría queda perfectamente ajustada, cualquiera que sea la complejidad de formas en planta o en alzado.
- Si ello exige demasiado espacio, se puede entonces optar por producir solo la mitad de un vano*



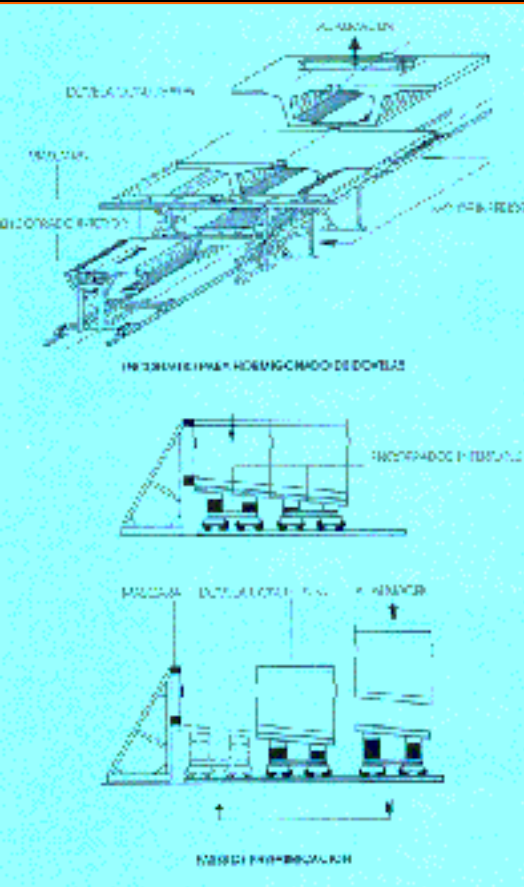
(*) Banco de prefabricación para un **semivoladizo**

(a.2) Las dovelas prefabricadas: **fabricación en banco**

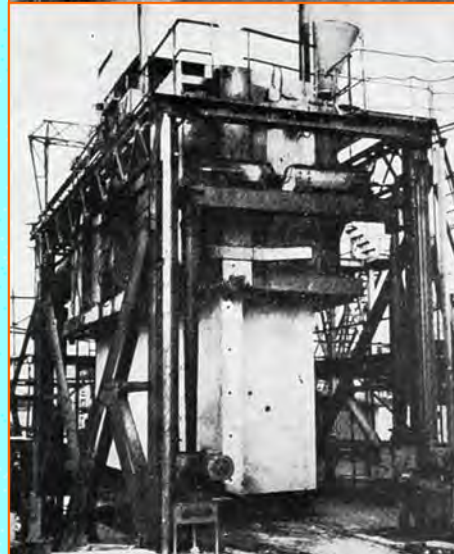
<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■Célula horizontal del *Pont Aval* en París



■Célula vertical del *viaducto de St Denis*

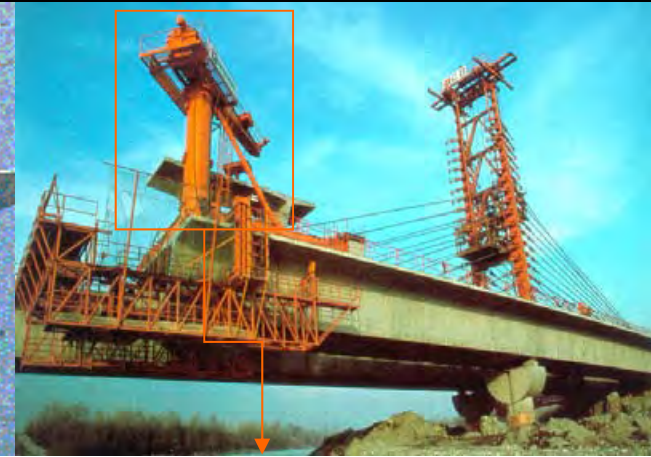
■Esta técnica libera más espacio en el parque de dovelas, pero exige mayores precauciones de reglaje que el banco, al intervenir las dovelas exclusivamente de dos en dos. En particular, ello complica notablemente los casos de geometría variable

(a.2) Las dovelas prefabricadas: *fabricación en célula*

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



dovela sobre carretón ←

grúa móvil para la colocación de la dovela

(1) Colocación mediante grúa autónoma

Puente de Vasco de Gama. Los tramos del viaducto se construyeron por voladizos compensados trasladando las dovelas sobre una plataforma flotante provista de grúa para su elevación y posicionamiento

(2) Colocación desde el voladizo

Las dovelas se trasladan mediante carretones sobre el tablero ya construido hasta alcanzar el extremo del mismo. Este sistema se adapta bien a **voladizos evolutivos**

(a.2) Las dovelas prefabricadas: métodos de colocación de dovelas

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



(3) Colocación mediante cercha lanzadera

Puente de St. Cloud sobre el Sena (1974, luz máxima 102 m. Colocación de dovelas con cercha superior de 122 m atirantada. J. Muller y J. Mathivat. Campenon Bernard). En esta obra, pese a su complejidad (trazado curvo $R=350$ m, fuerte interferencia con el tráfico en el viaducto de St. cloud) se avanzó a una velocidad media de 40m/semana. Esta cercha se reutilizó en los **puentes de Angers y Sallingsund**

(a.2) Las dovelas prefabricadas: métodos de colocación de dovelas

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>



(3) Colocación mediante cercha lanzadera

Viaducto F9 en Melbourne (1990, viga de lanzamiento atirantada de 101 m de longitud total. Road Construction Authority. Citra Construction Ltd). En esta obra de 121 tramos con luces variando entre 24.1 y 54.1 m, se colocaron 2068 dovelas en condiciones similares a las de la obra anterior: geometría variable del trazado, numerosos cruces de carreteras y vías férreas...

05 Puentes de hormigón pretensado

(b) **Diseño del pretensado** de los puentes construidos por voladizos compensados:

- (b.1) cálculos estáticos (según C. Menn)
- (b.2) disposición del pretensado de voladizo
- (b.3) disposición de los tendones de solidarización
- (b.4) disposición de los tendones de continuidad

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

▪ Para este tipo de puentes, se puede estimar

▪ El cumplimiento del *ELU* de rotura exige que

donde γ representa un coeficiente *global* de seguridad, por lo tanto el máximo aprovechamiento del acero conduce a

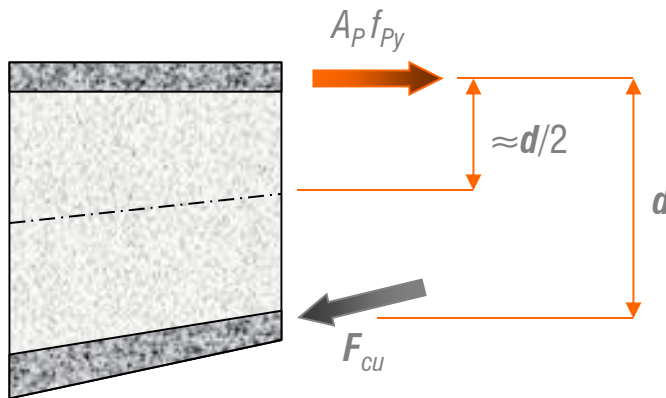
$$M_Q \sim 0.2M_G$$

$$\gamma(M_G + M_Q) \leq d (A_P f_{Py} + A_S f_{Sy})$$

$$\gamma(M_G + M_Q) = d(A_P f_{Py} + A_S f_{Sy})$$

Introduciendo la condición $M_Q = 0.2M_G$ y $A_S = 0$ (minimización del acero pasivo) se obtiene:

$$\frac{1.2\gamma M_G}{f_{Py}d} = A_P$$



(b.1) Cálculos estáticos (según C. Menn)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

▪ Si el momento debido al pretensado se define como $M_P = \frac{d}{2} A_P \sigma_P$ resulta entonces

$$M_P = 0.6 \gamma \frac{\sigma_P}{f_{py}} M_G$$

y aceptando que $\sigma_P = 0.7 f_{py}$, $\gamma = 1.8$ se llega finalmente a

$$M_P = 0.76 M_G \quad \blacksquare$$

▪ A pesar del bajo momento de pretensado propuesto, por la eficiente forma de la sección de este tipo de puentes el cociente N_P/A_c es en general mayor que en los puentes convencionales, llegando al **pretensado total** para $(G + \alpha Q)$, siendo αQ una fracción **sustancial** de las acciones variables

▪ Esta propiedad resulta de la condición $M_Q \sim 0.2 M_G$, válida para este tipo de estructuras por ser en general de mayor luz que las construidas mediante cimbra apeada

▪ La diferencia entre M_P y M_G produce deformaciones elásticas y plásticas en la viga que deben compensarse mediante **contraflechas**

(b.1) Cálculos estáticos (según C. Menn)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

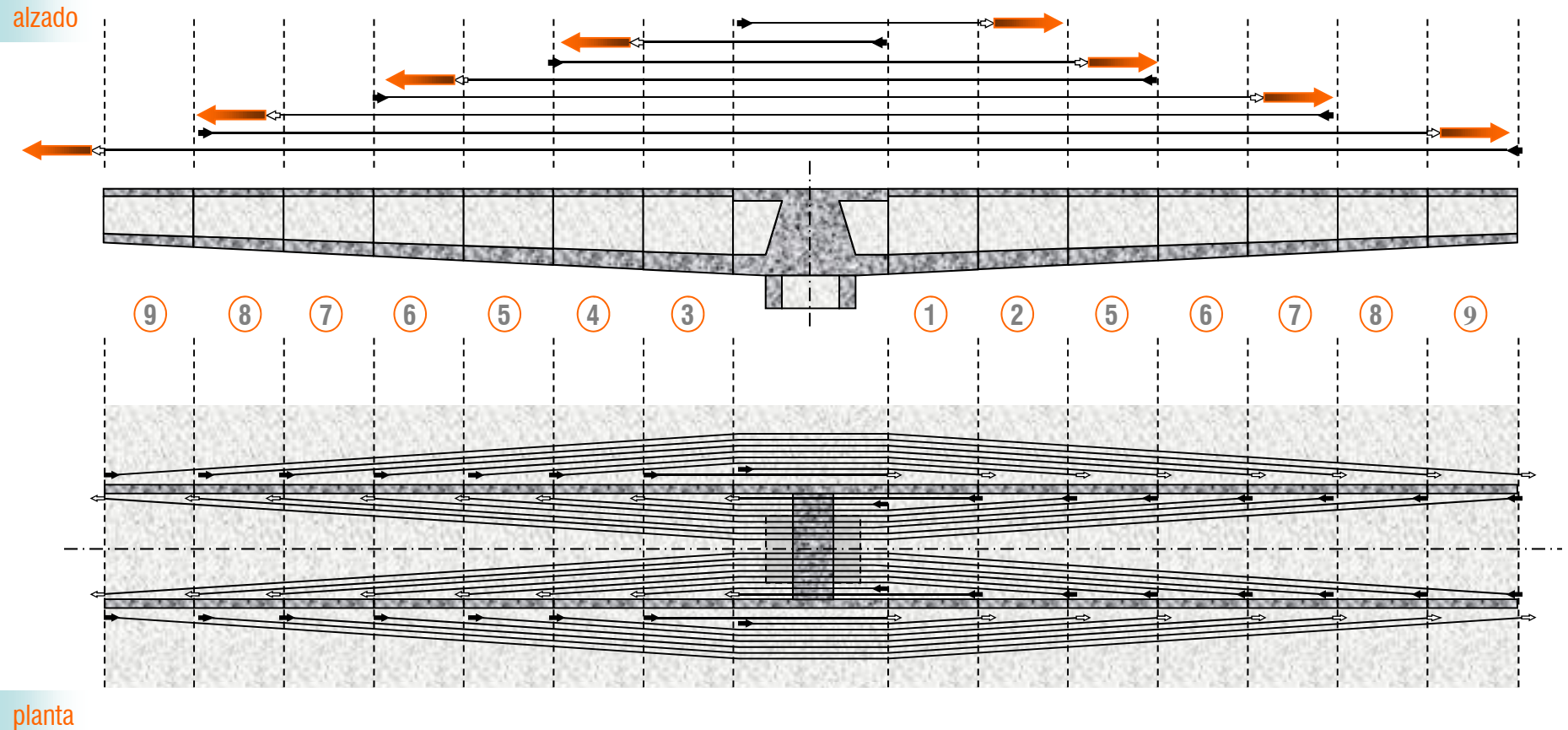
- El criterio propuesto, basado en minimizar A_s , conlleva importantes ventajas constructivas puesto que el acero pasivo tiene un **mal aprovechamiento** en la construcción por voladizos a causa de los inevitables **solapes** asociados a la ejecución de cada dovela, además de las molestias producidas por las esperas en las operaciones de acoplamiento de tendones
- Evidentemente, el control de la fisuración requiere un armado mínimo cuya cuantía geométrica puede fijarse entre el 0.6 y el 0.8%

(b.1) Cálculos estáticos (según C. Menn)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

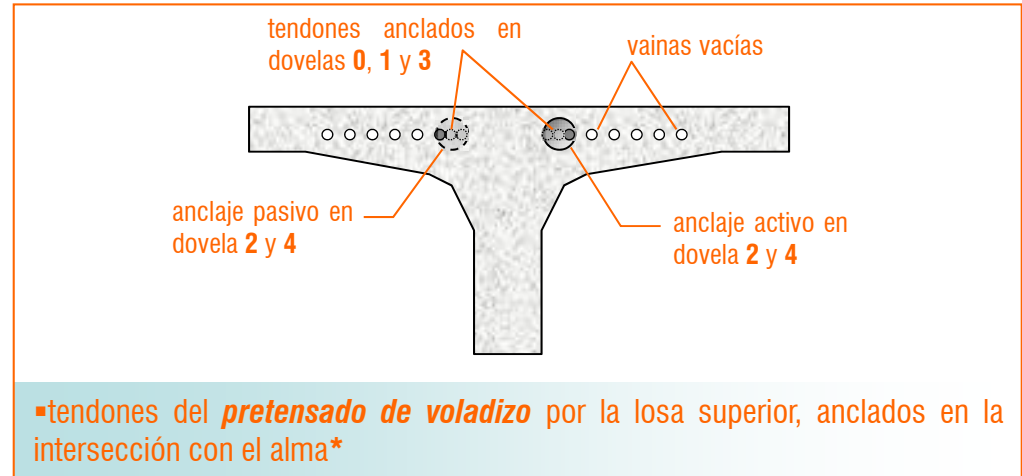
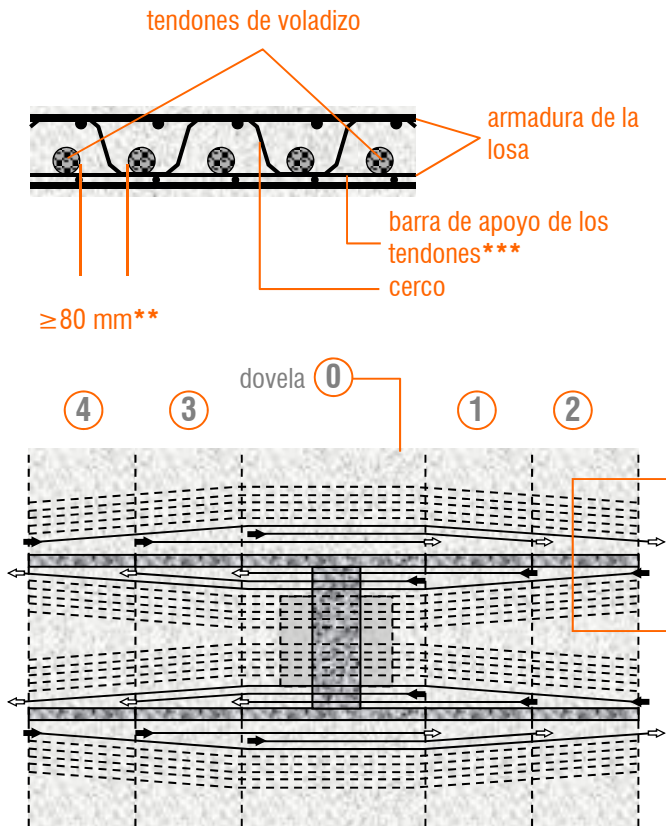


(b.2) Pretensado de voladizo: *disposición de tendones (en losa superior)*

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



(*) esta disposición resulta más sencilla que anclar más abajo dentro del alma, como tradicionalmente se hacía, pese a la reducción de cortante asociada a la inclinación del cable

(**) la reducción de resistencia a cortante en la losa debida a la presencia de las vainas requiere disponer cercos entre estas

(***) esta puede suprimirse, apoyando las vainas sobre la armadura inferior de la losa a costa de una pequeña pérdida de excentricidad

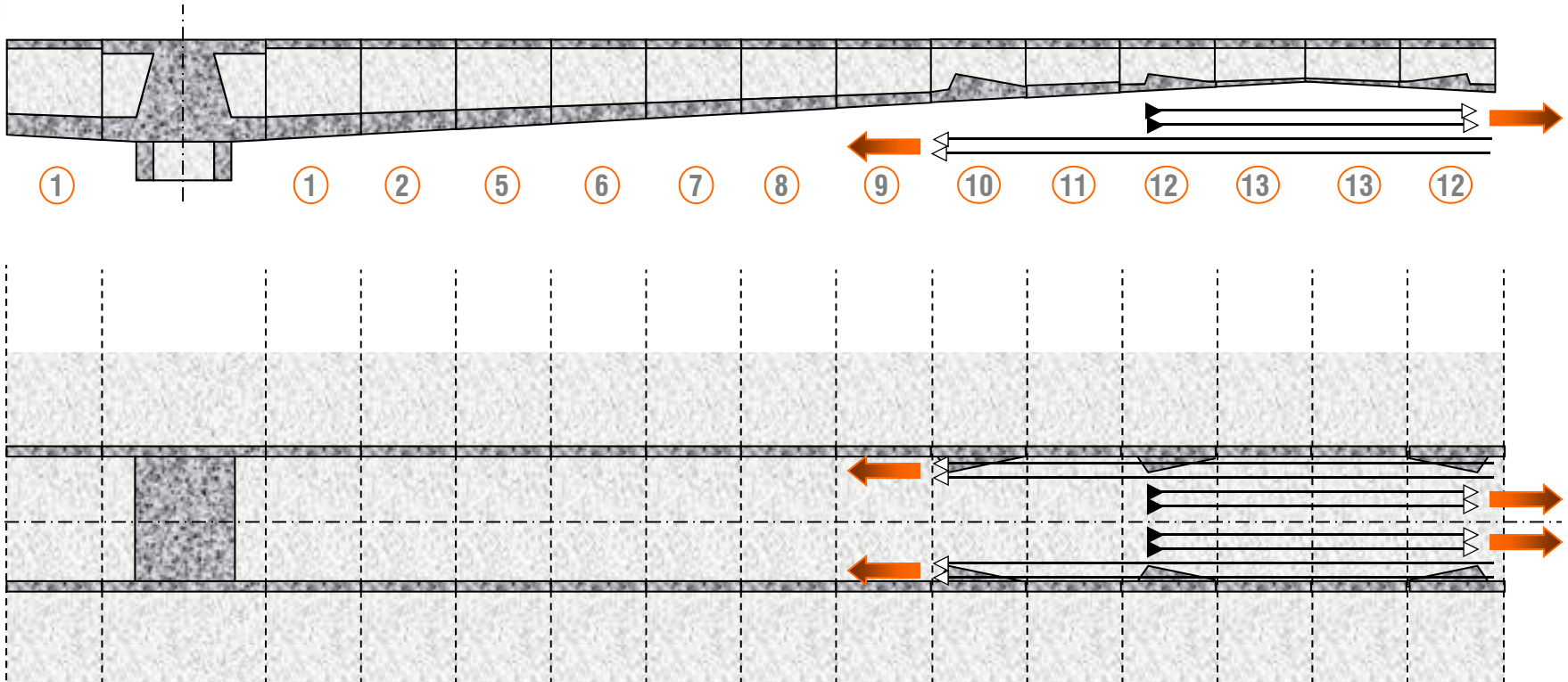
(b.2) Pretensado de voladizo: detalles

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

alzado



planta

(b.3) Pretensado de solidarización: *disposición de tendones (en losa de fondo)*

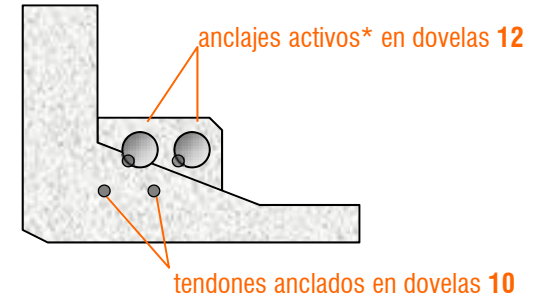
<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

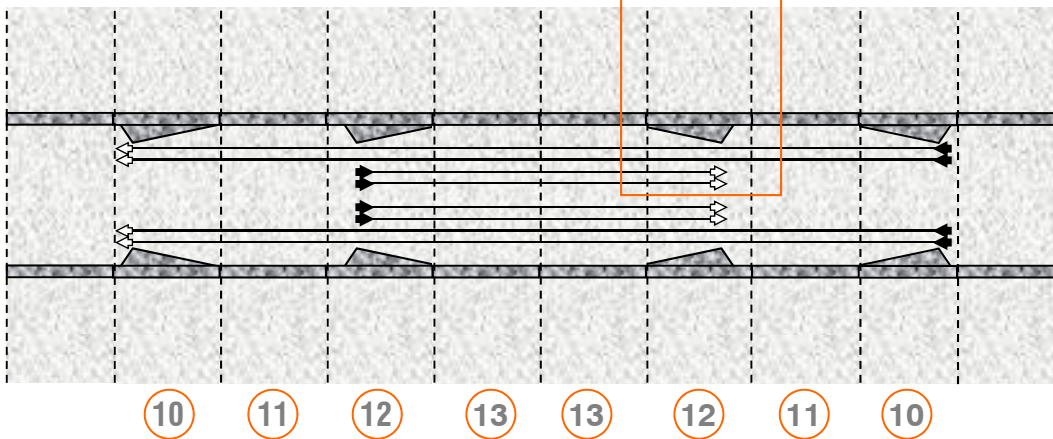
05 Puentes de hormigón pretensado

(*) los bloques de anclaje deben conectarse a la unión alma-losa de fondo mediante cercos

(**) si la viga es de canto variable, en el armado de la losa inferior debe tenerse en cuenta la componente vertical de las fuerzas de anclaje movilizadas por los bloques



▪ **tendones de solidarización** por la losa inferior, próximos a las almas**



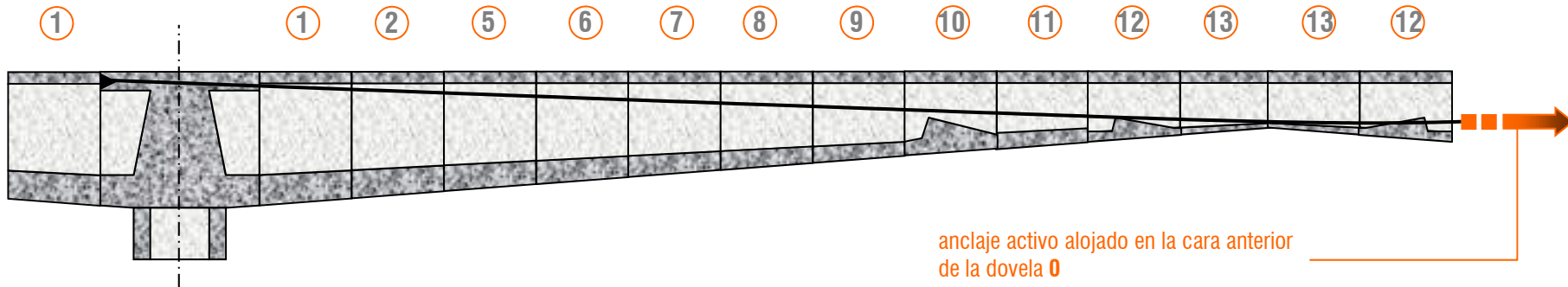
(b.3) Pretensado de solidarización: detalles

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

alzado



- Los tendones de continuidad se disponen en algunos casos, como pretensado de reserva, para corregir las deformaciones *realmente* alcanzadas durante el proceso de avance y tras el cierre. Por ello las vainas, colocadas antes del hormigonado cada dovela, deben dimensionarse generosamente

(b.4) Pretensado de continuidad: *disposición de tendones (por las almas)*

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

(c) Ejemplos de puentes construidos por avance en voladizo:

(c.1) voladizo evolutivo

- *hormigonado in situ*
- *mediante dovelas prefabricadas*

(c.2) voladizos compensados

- *hormigonado in situ*
- *mediante dovelas prefabricadas*

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

- Todas las fases de la ejecución son continuas: *utilizando la parte de tablero ya ejecutada se traslada al personal, material y equipos sin depender de la accesibilidad de la zona de obras*
- Las pilas solo reciben cargas verticales
- Admite canto variable y trazados curvos en planta
- El primer vano suele ejecutarse mediante cimbra tradicional
- Durante la construcción, las reacciones en pilas y los esfuerzos en tablero debidos a (G) son distintos y más desfavorables que en servicio → **limita las luces abordables y requiere frecuentemente apoyos o atirantamiento provisionales**
- Los plazos son mayores, aunque pueden reducirse notablemente con dovelas prefabricadas

hormigonado in situ

Puente de Mangfall (Alemania)	1959	108 m	Dyckerhoff & Widmann
Accesos al puente de Bendorf (Alemania)	1964	58 m	Dyckerhoff & Widmann
Puente de Ounasjoki (Finlandia)	1967	70 m	Dyckerhoff & Widmann
Puentes de Alconéctar y de La Plata (España)	1967	85 m	Dyckerhoff & Widmann
Viaducto de Ambachtal (Alemania)	1968	78 m	Dywidag, Wayss & Freytag

dovelas prefabricadas

Viaducto de Rombas (Francia)	-	45 m	-
Viaducto de Linn Cove (EEUU)	1982	55 m	-
Puente de Francin (Francia)	1990	54 m	Campenon Bernard

(c.1) Voladizo evolutivo: *el ahorro en equipos se contrarresta por plazos mayores*

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

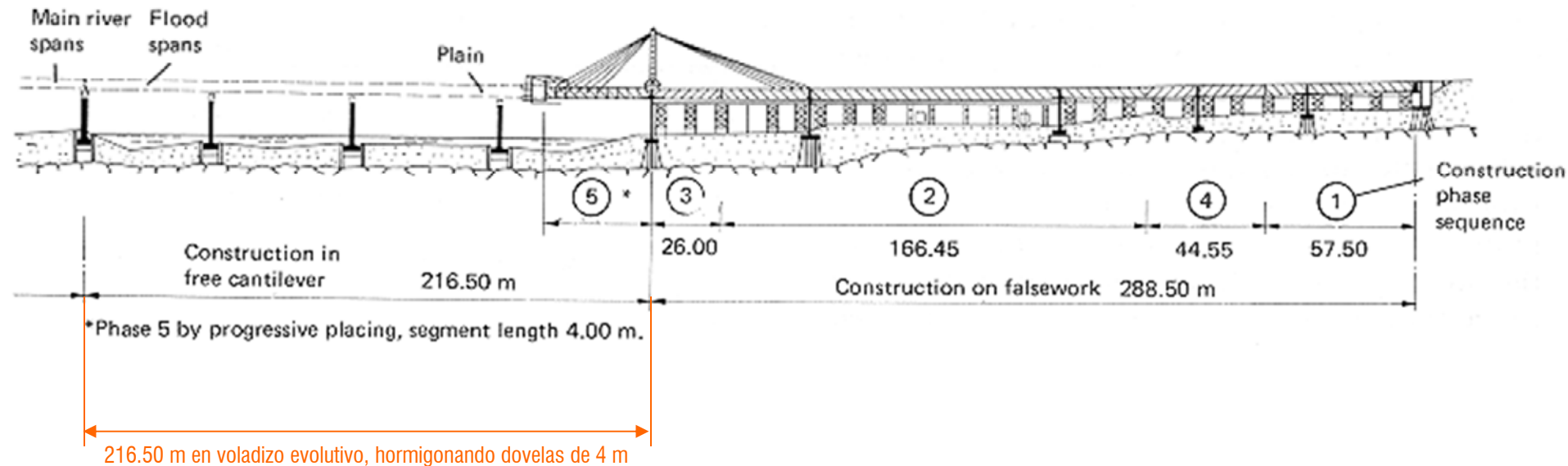


▪ El *puente de Mangfall* en la autopista München-Salzburg (1959, vanos de 90+108+90 m. U. Finsterwalder y G. Lohmer. Dyckerhoff & Widmann)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



•Obras: *accesos al puente de Bendorf* sobre el Rin (1964, cuatro vanos de 48 a 58 m de luz. U. Finsterwalder. Dyckerhoff & Widmann)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: *puente de Ounasjoki* (Finlandia, 1967, vanos de 50 y 70 m. Dyckerhoff & Widmann)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ *Puente de Alconectar* sobre el río Tajo, para carretera y ferrocarril (1967, luces de hasta 85 m. Dyckerhoff & Widmann)

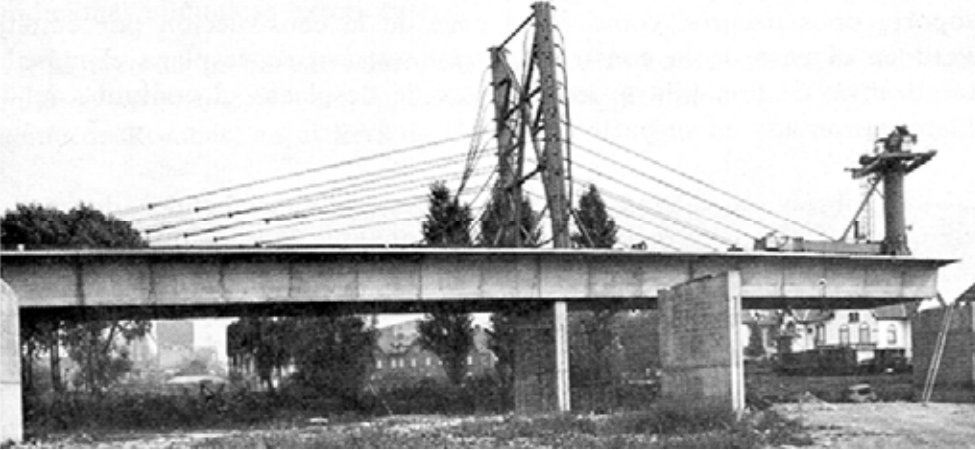


▪ *Viaducto de Ambachtal* (1968, luces de 68 m. Dyckerhoff & Widmann y Wayss & Freytag)

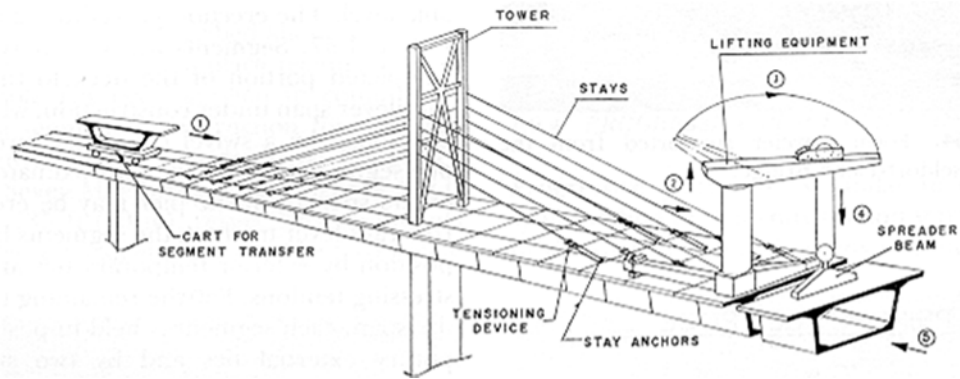
<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



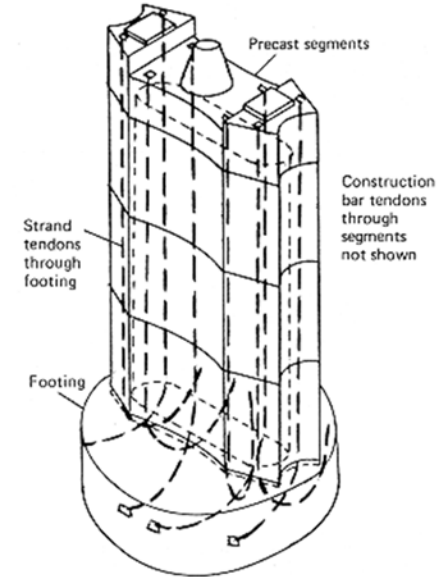
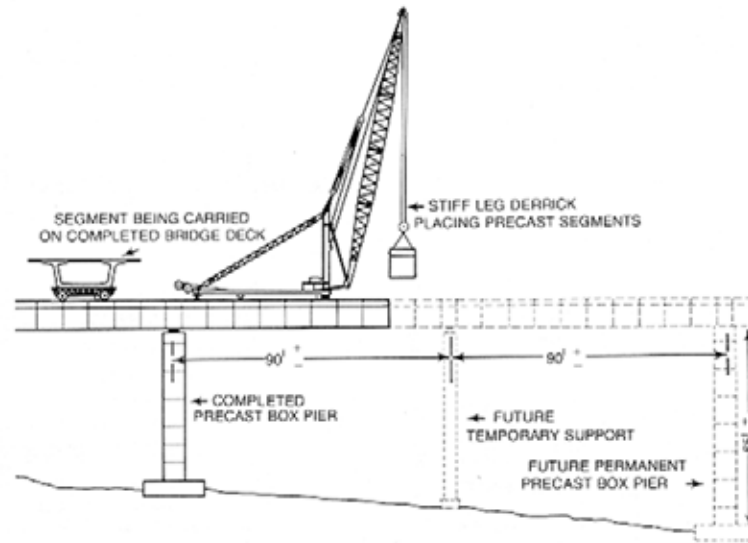
▪ *Viaducto de Rombas* (Francia, luces de 23 a 45 m para dovelas de 2.50 m de canto). En esta obra de planta curva se aplicó por primera vez la prefabricación por dovelas a la construcción en voladizo evolutivo



<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

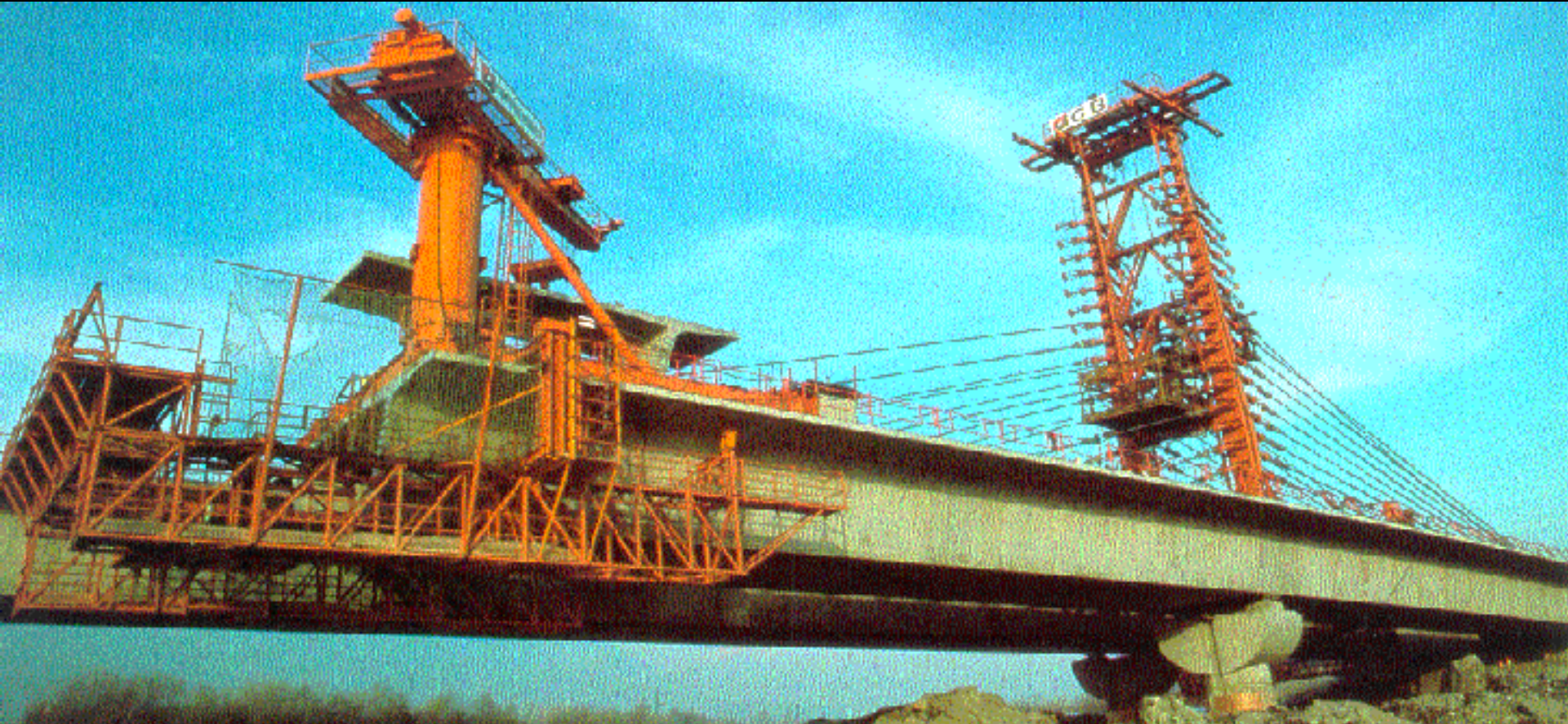


▀ Obras: *viaducto de Linn Cove* (Carolina del Norte, 1982, luces de 30 a 55 m)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

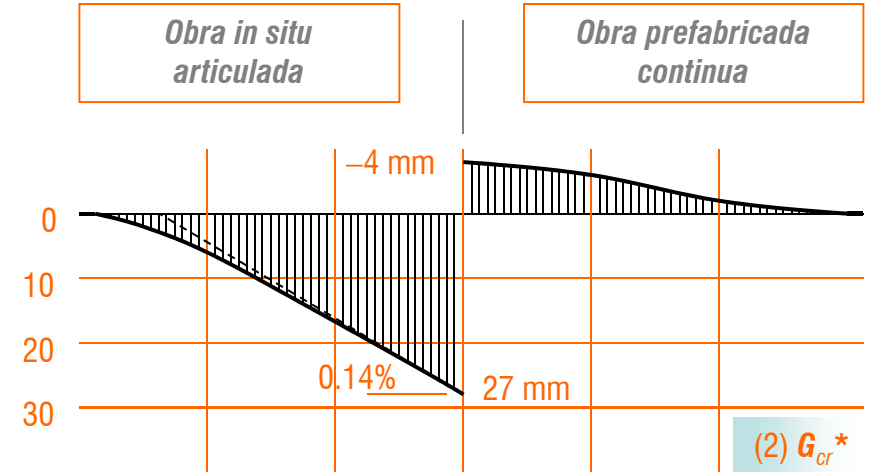
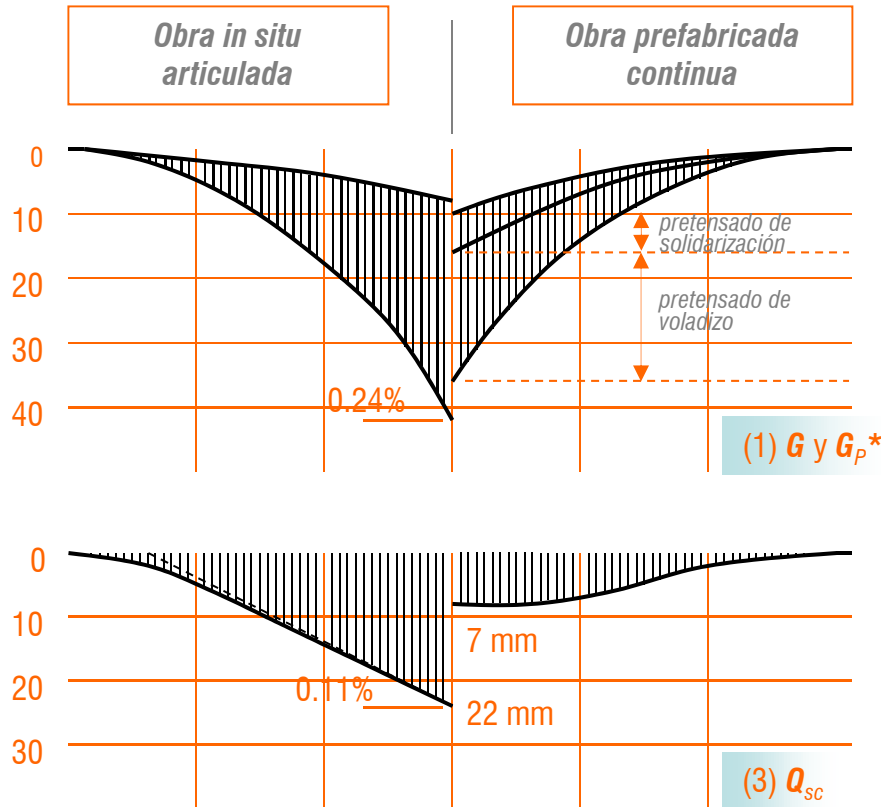


▪Obras: *ponte de Francin* (Francia, 1990, luces de 45 y 54 m. Proyecto estructural de EEG, proyecto del mástil de atirantamiento: Campenon Bernard y Freyssinet Int., **Campenon Bernard**)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



Puente de Choisy-le-Roi: primer puente de dovelas prefabricadas encoladas. Comparación de las deformaciones registradas por el tablero:

- (1) Bajo peso propio y pretensado
- (2) Diferidas (notable efecto del pretensado de solidarización)
- (3) Bajo sobrecargas

(c.2) Voladizos compensados: *articulación central y hormigonado in situ VS continuidad y dovelas prefabricadas*

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

Respecto a sus inicios, las principales innovaciones han consistido en:

- **Supresión de la articulación central**, renunciando al diseño de Finsterwalder para sus primeras grandes realizaciones (Nibelungos, Coblenza, Bendorf...)
- **Empleo de dovelas prefabricadas encoladas** (junta seca), iniciado en el puente de Choisy-le-Roi en 1962
- Dar continuidad a la armadura longitudinal ralentiza notablemente la construcción y consume materiales. Ello es inevitable con la armadura activa pero puede atenuarse para la pasiva (en dovelas prefabricadas, esta es necesariamente discontinua)
- El **mejor** diseño de estos puentes requiere un adecuado balance entre optimización resistente y sencillez/velocidad de ejecución

hormigonado in situ

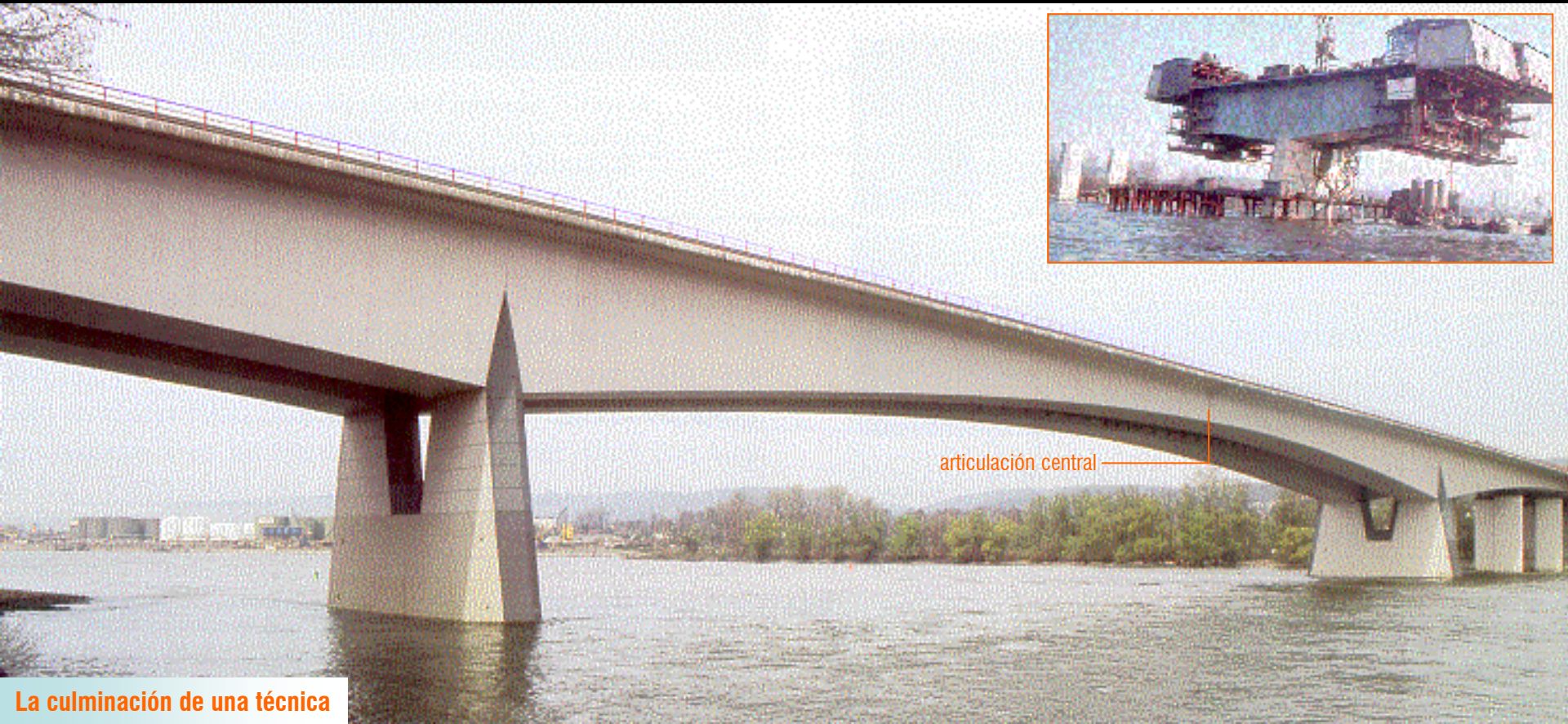
Puente de Bendorf (Alemania)	1964	208 m	U. Finsterwalder
Puente de Pine Valley Creek (EEUU)	1974	137 m	Man-Chung Tang y CALTRANS
Puente de Koror-Babelthaup (EEUU)	1978	241 m	A. Yee & Associates
Puente de Kochertal (Alemania)	1980	138 m	Dywidag, Wayss & Freytag, Zublin
Puente de Velje fjord (Dinamarca)	1980	110 m	H.A. Lindberg
Puente de Gateway (Australia)	1985	260 m	P. Matt
Puente de San Joao (Portugal)	1990	250 m	E. Cardoso

(c.2) Voladizos compensados: *esta técnica se aplica hoy en día normalmente en el intervalo [75 , 300 m]*

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



articulación central

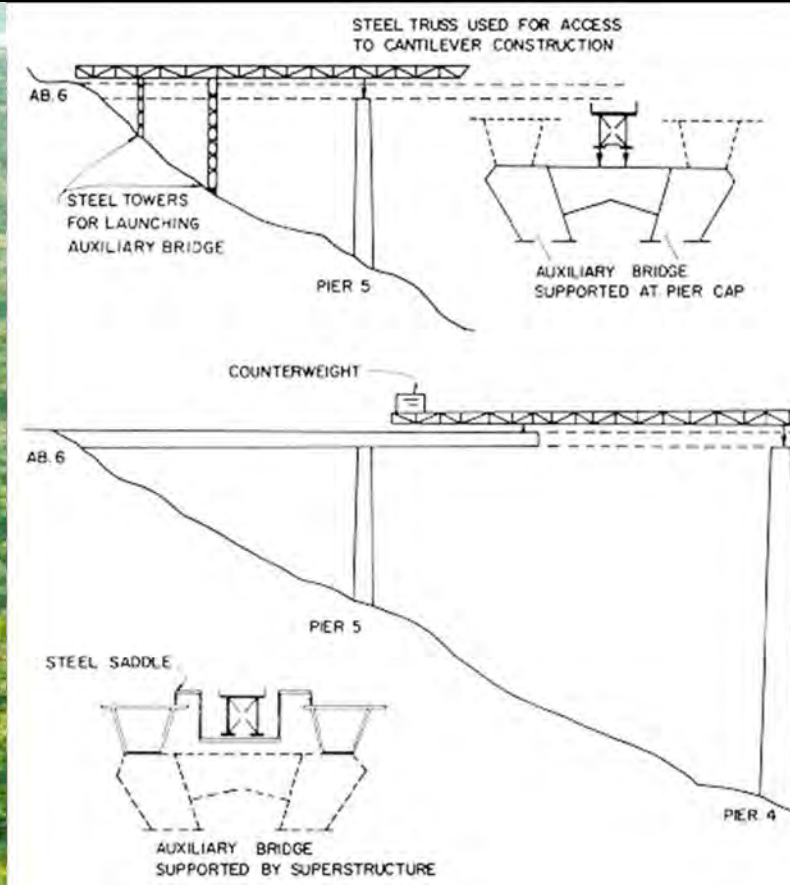
La culminación de una técnica

▪Obras: el *punte de Bendorf* sobre el Rin (1964, 208 m de luz con articulación central. U. Finsterwalder, G. Lohmer. Dyckerhoff & Widmann)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■ En los Estados Unidos de América, el primer puente de hormigón pretensado construido por voladizos compensados in situ fue el de **Pine Valley Creek**, entre San Diego y El Centro, California, mientras que las dovelas prefabricadas no se introdujeron hasta 1978

■ Obras: el **puente de Pine Valley Creek** en la Cleveland National Forest (1974, 137 m de vano máximo. Man-Chung Tang y CALTRANS)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



El primer puente construido por voladizos compensados con cercha por encima fue el **viaducto de Siegtal** (1969, H. Wittfoht, **Polensky & Zöllner**), con dos tableros de 105 m de luz máxima y pilas de hasta 80 m

■Obras: el **viaducto de Kochertal** (1980, 81+7×138+81 m, pilas de 180 m. Wayss & Freytag, Dyckerhoff & Widmann, Zublin)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

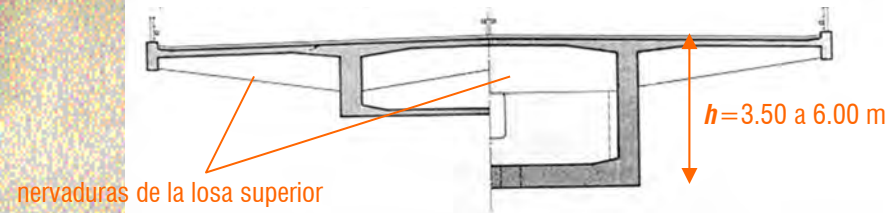


■Obras: el *viaducto de Kochertal*, voladizos compensados con cercha por arriba (el cajón se hormigona in situ mientras que voladizos laterales y puntales, ambos prefabricados, se añaden en 2ª fase)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

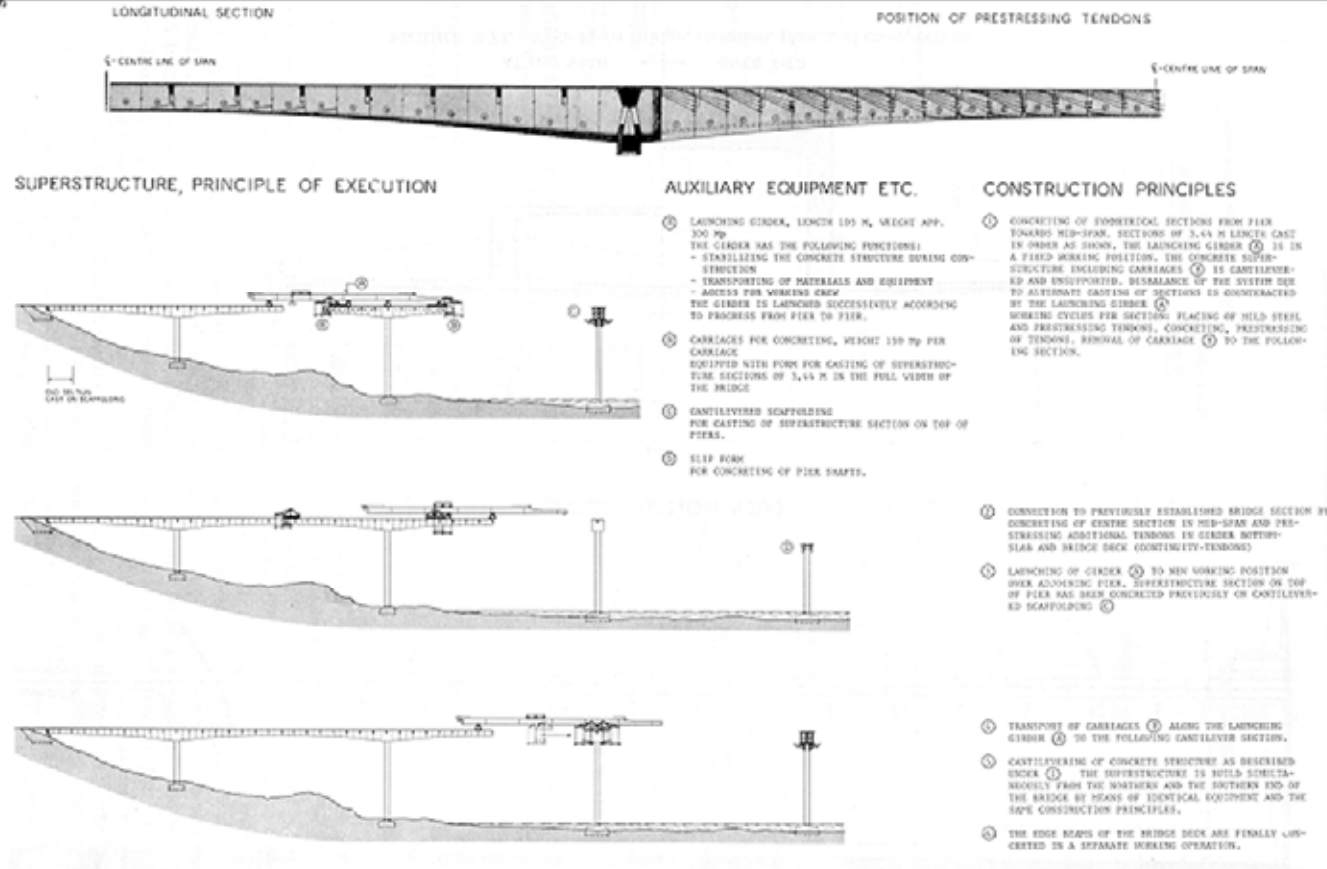


▪Obras: el *punte de Vejle fjord* (Dinamarca, 1980. Catorce vanos de 110 m con losa superior nervada. H.A. Lindberg)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■ Obras: el *punte de Vejle fjord*, fases de construcción del tablero

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *punte de Gateway*, en Brisbane (1985, vano máximo de 260 m, P. Matt)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *ponte de San Joao*, en Oporto, para ferrocarril (1990, vano máximo de 250 m. E Cardoso)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *ponte de San Joao* en construcción y detalle de las pilas

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

dovelas prefabricadas

Puente de Choisy-le-Roi	1964	55 m	Campenon Bernard
Puente de Oosterschelde (Holanda)	1965	95 m	Van Hattum
Viaducto de Oléron (Francia)	1966	79 m	Campenon Bernard
Puente de Juvisy (Francia)	1968	67 m	Campenon Bernard
Pont Aval	1968	92 m	Campenon Bernard
Viaduc de Chillon	1969	104 m	S.G.T.M.
Pont de Saint Cloud	1974	102 m	Campenon Bernard
Puente de Sallingsund (Dinamarca)	1978	93 m	-
Puente de Clichy (Francia)	1978	85 m	-
Puente de Ottmarsheim (Francia)	1979	172 m	Coignet

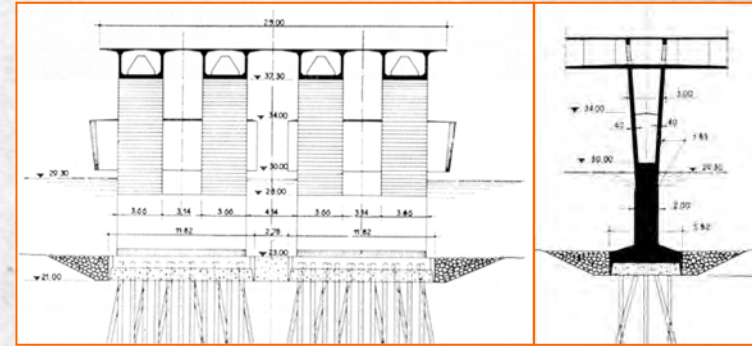
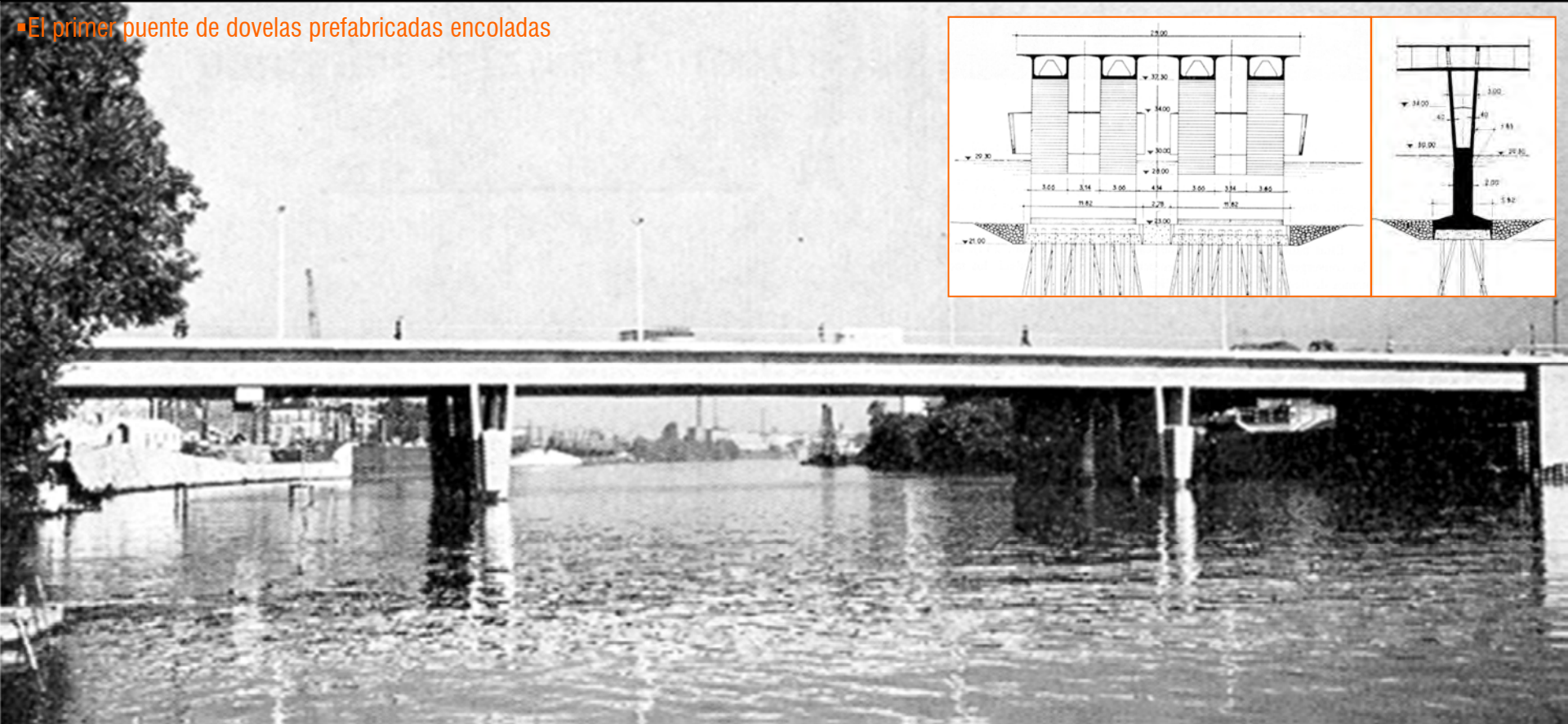
(c.2) Voladizos compensados: *puentes de dovelas prefabricadas*

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

▪ El primer puente de dovelas prefabricadas encoladas

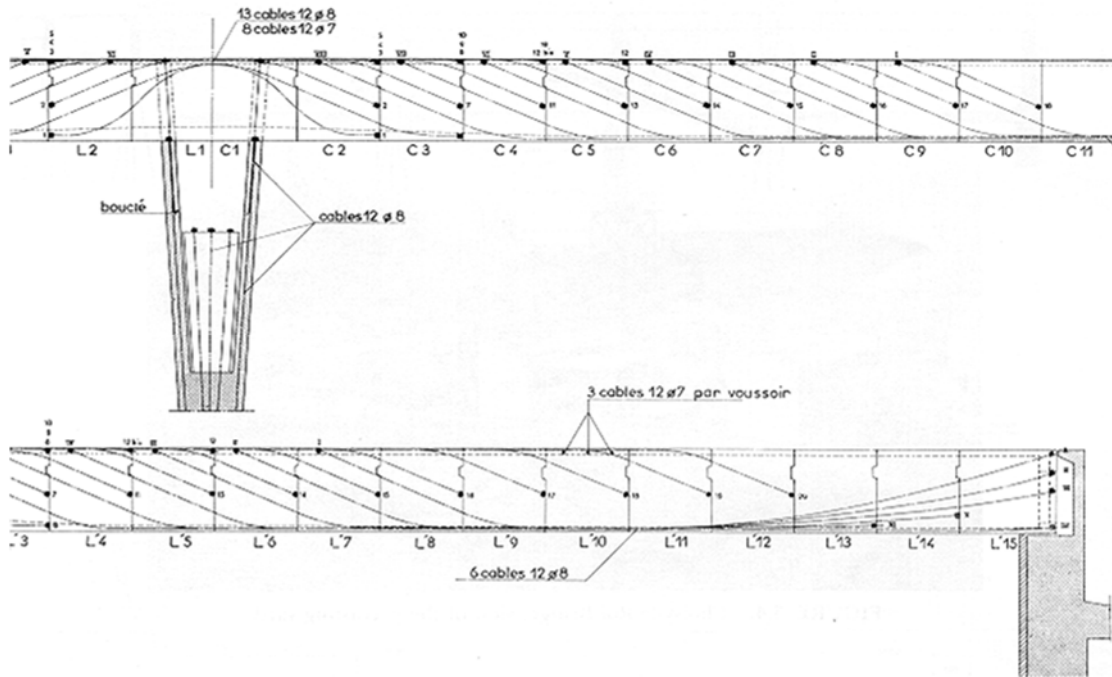


▪ Obras: el *puente de Choisy-le-Roi* (Francia, 1962-1964, 37.5+55+37.5 m, Campenon Bernard)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■ Banco de prefabricación de Choisy-le-Roi: diseñado para dos semivoladizos, de longitud por lo tanto igual a la de un vano

■ Pretensado de voladizo y de solidarización del puente de Choisy-le-Roi. Obsérvese la única llave de cortante en las almas (dovelas de primera generación)

■ Obras: el *puente de Choisy-le-Roi*

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *punte de Oosterschelde*, sobre el Escalda Oriental (Holanda, 1965, longitud total 5 km, con vanos de 95 m. Van Hattum)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *ponte de Oosterschelde* (detalle del vano típico y pila)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *puente de Oosterschelde* (construcción en voladizo con dovelas prefabricadas de 600 T y juntas húmedas)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



Construcción con lanzadera

▪Obras: el *viaducto de Oléron* (Francia, 1966, vanos de 79 m, 2900 m de longitud total. Campenon Bernard)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *ponte de Juvisy* (Francia, 1968, 6 vanos, el máximo de 66.6 m. Campenon Bernard)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *pont Aval* (Francia, 1968, luz máxima de 92 m, Campenon Bernard)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *viaduc de Chillon* (Suiza, 1969, vano máximo de 104 m)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

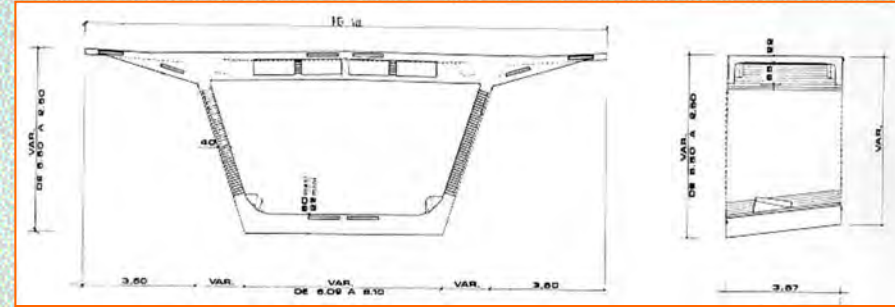
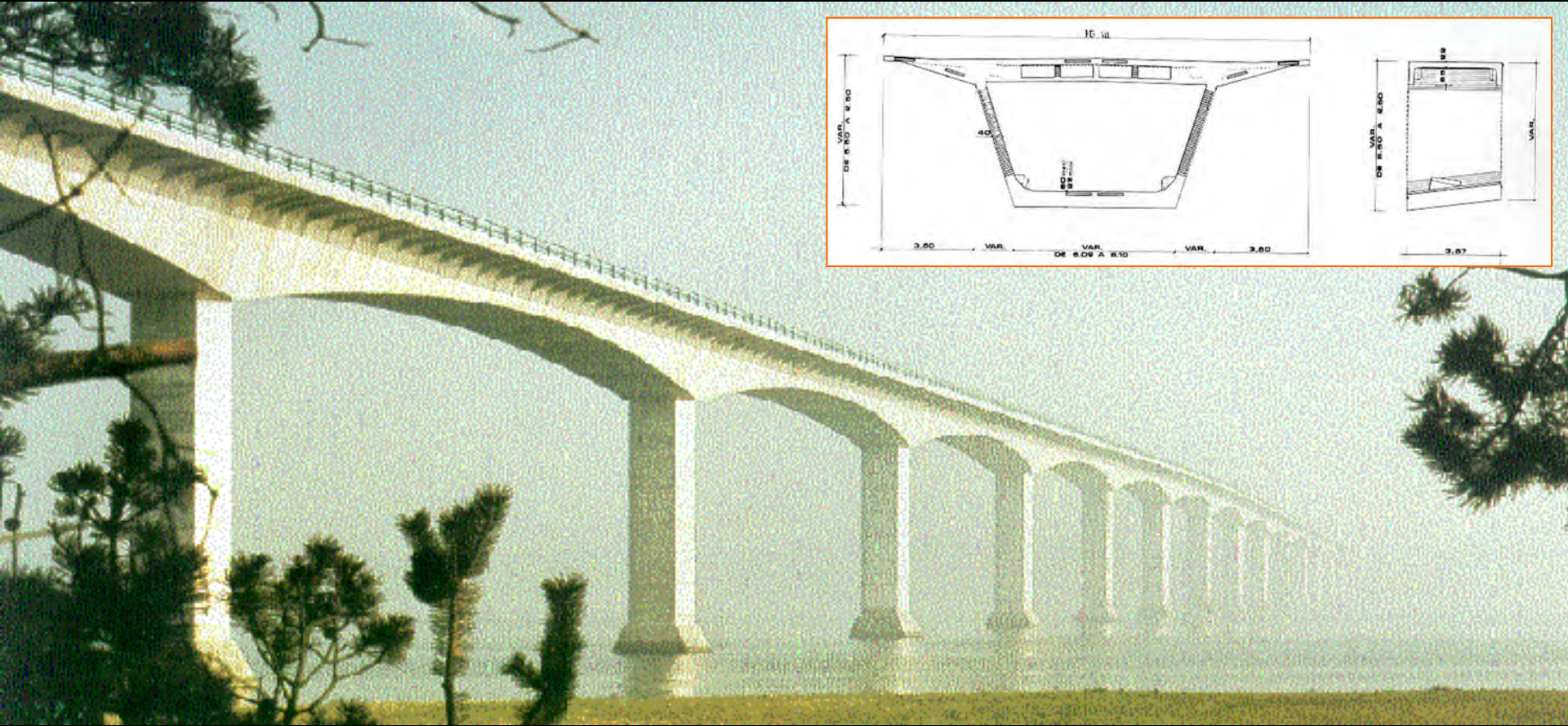


▪Obras: el *pont de St Cloud* (Francia, 1974, luz máxima de 101.8 m, J. Muller y J. Mathivat, **Campenon Bernard**)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

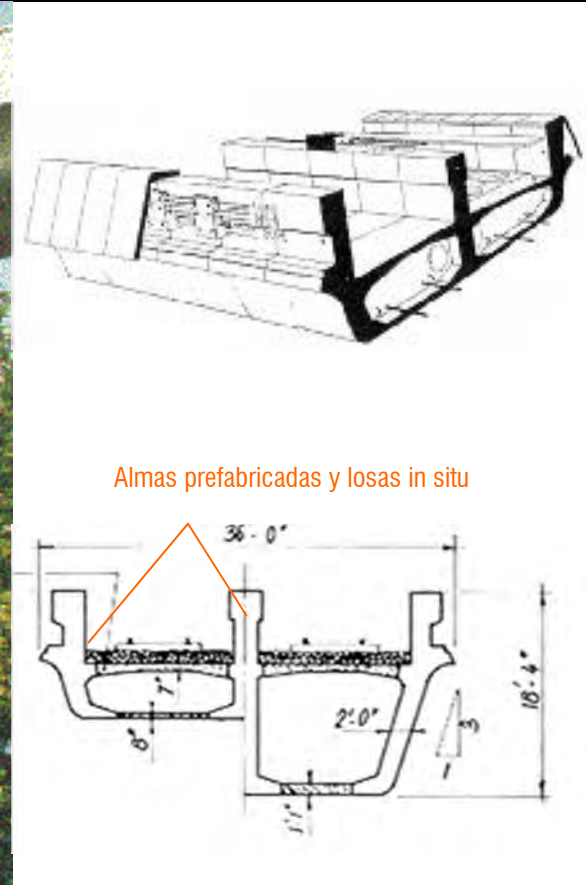


▀Obras: el *pont de Sallingsund* (Dinamarca, 1978, 51+17×93+51 m)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■Obras: el *viaducto de Clichy*, para la línea 13bis de la R.A.T.P. (1978, vano máximo de 85 m)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

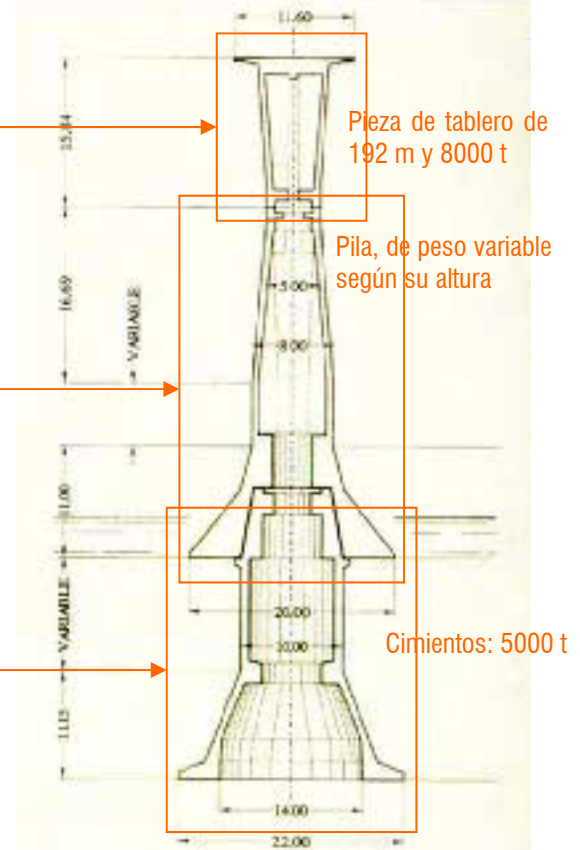


▪Obras: el *puente de Ottmarsheim*, sobre el gran canal de Alsacia (1979, sus vanos principales, de 144 y 172 m de luz, poseen zonas de 72 y 100 m en hormigón ligero. Coignet)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■Obras: el *Confederation Bridge* en el estrecho de Northumberland entre Prince Edward Island y New Brunswick (Canadá, 1997, Jean Muller International. **Buckland & Taylor**)

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

▪Puente de Northumberland, vistas de las piezas acopiadas en el parque de la isla prince edward



▪Campanas contra impactos de bloques de hielo



▪Obras: el *Confederation Bridge*, 13 km de longitud con vanos principales tipo Gerber, de 250 m de luz

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



- (a) Aspecto general de la obra
- (b) Vanos laterales de 93 m con dovelas prefabricadas por voladizos compensados
- (c) Colocación de una pieza de cimentación de 5000 t con grúa flotante
- (d) Transporte y montaje de un doble voladizo de 192 m y 8000 t mediante grúa flotante

■Obras: el *Confederation Bridge*, aspecto general y distintas fases de la construcción

<5.3.5 Puentes construidos por avance en voladizo>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

- Morfología que se adapta bien a cortes profundos en el terreno, al aproximarse por su forma y comportamiento a los **arcos de tablero superior**: compresiones en el vano principal, favorables para el hormigón, y fuertes empujes al terreno
- Puede adaptarse a circunstancias distintas del terreno (baja capacidad portante) o de la orografía (pasos de escasa altura) incorporando células triangulares, pasivas o pretensadas respectivamente
- Se integra mal en viaductos con pilas rectas si se opta por esta tipología para el vano máximo (*Martigues, Sfalassa...*)
- Se adapta mal a trazados curvos en planta
- La ejecución de las pilas inclinadas requiere apoyos o atirantamientos provisionales que han de mantenerse hasta cerrar el vano central

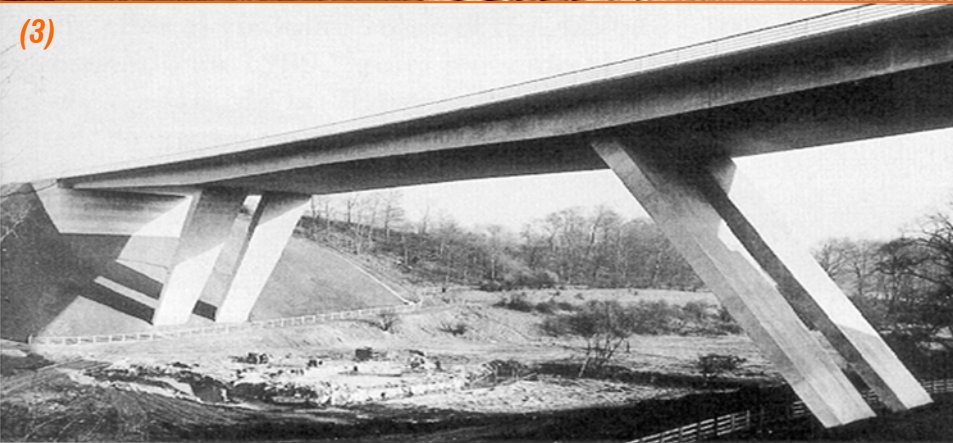
□ En **1925**, Maillart construyó un acueducto de hormigón armado con pilas inclinadas sobre el río Aguas Negras. Posteriormente, Freyssinet diseñó la serie del Marne y el puente Saint Michel, todos ellos con soportes inclinados solidarios del tablero, pero fue Finsterwalder quien nuevamente aplicó el hormigón pretensado a esta singular tipología en **1954**



<5.3.6 Puentes pórtico de apoyos inclinados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



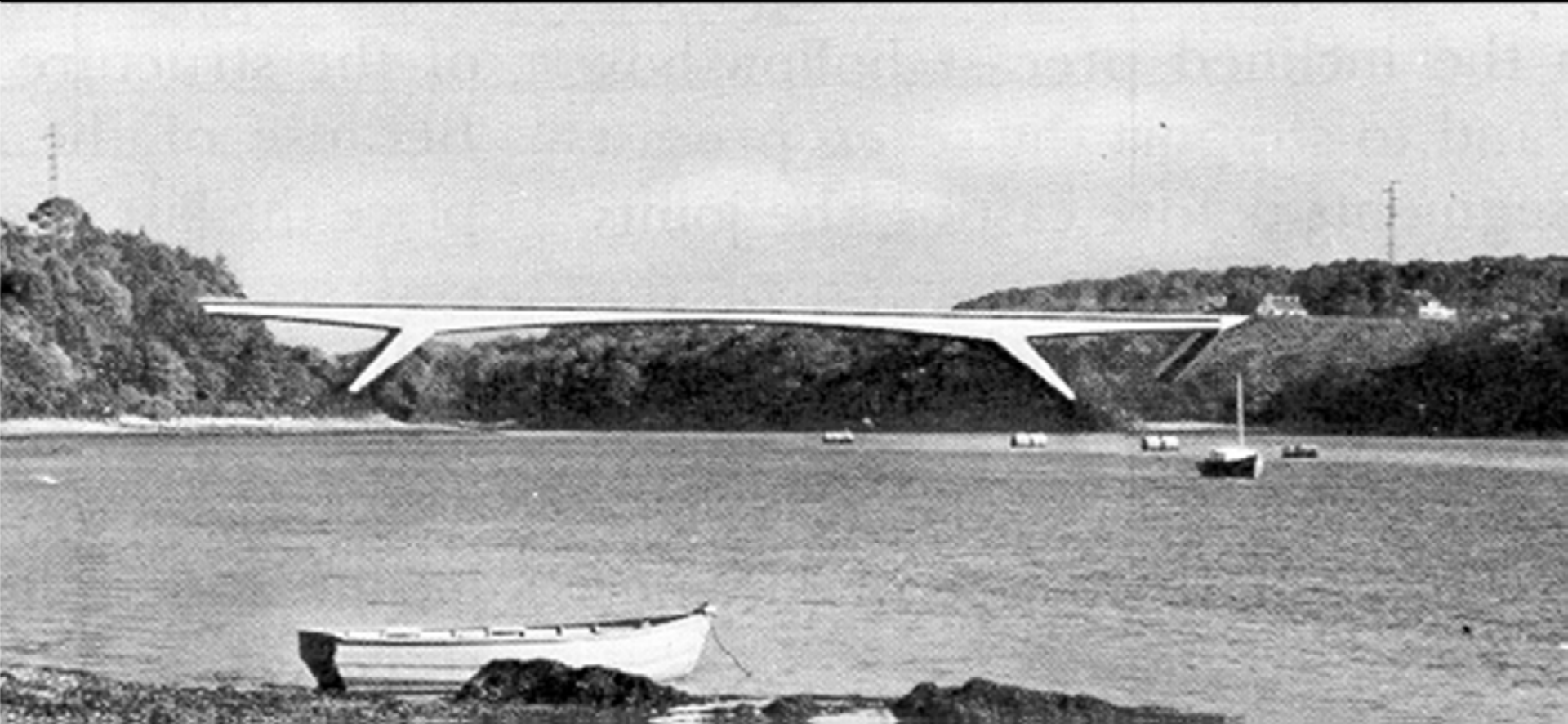
□ Primeros pórticos de apoyos inclinados en hormigón pretensado

- (1) *Puente de ferrocarril de Horremer* (1954, vano central de 85 m. U. Finsterwalder, Dyckerhoff & Widmann)
- (2) *Puente de Wentbridge* (1960, 92 m de luz. S.M. Lovell)
- (3) *Puente sobre el río Tuinico* en Cuba (1960, vano central de 75 m. Sáenz, Cancio & Martín)

<5.3.6 Puentes pórtico de apoyos inclinados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

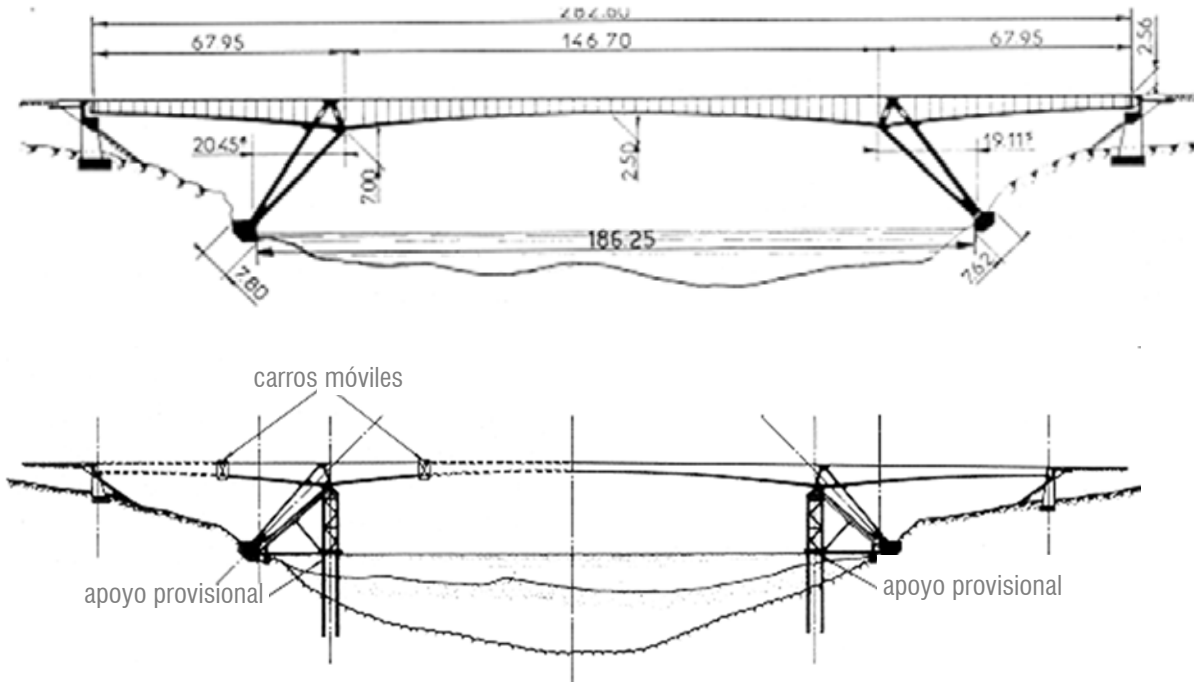


▪Obras: el *puente del Bonhomme*, sobre el río Blavet (1974, vano de 186.25 m, J. Mathivat)

<5.3.6 Puentes pórtico de apoyos inclinados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

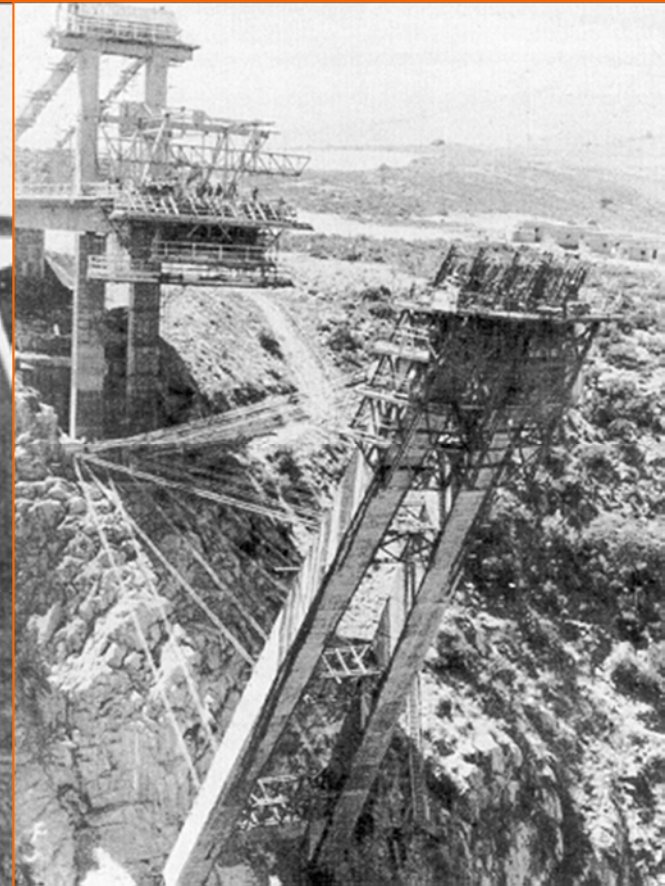
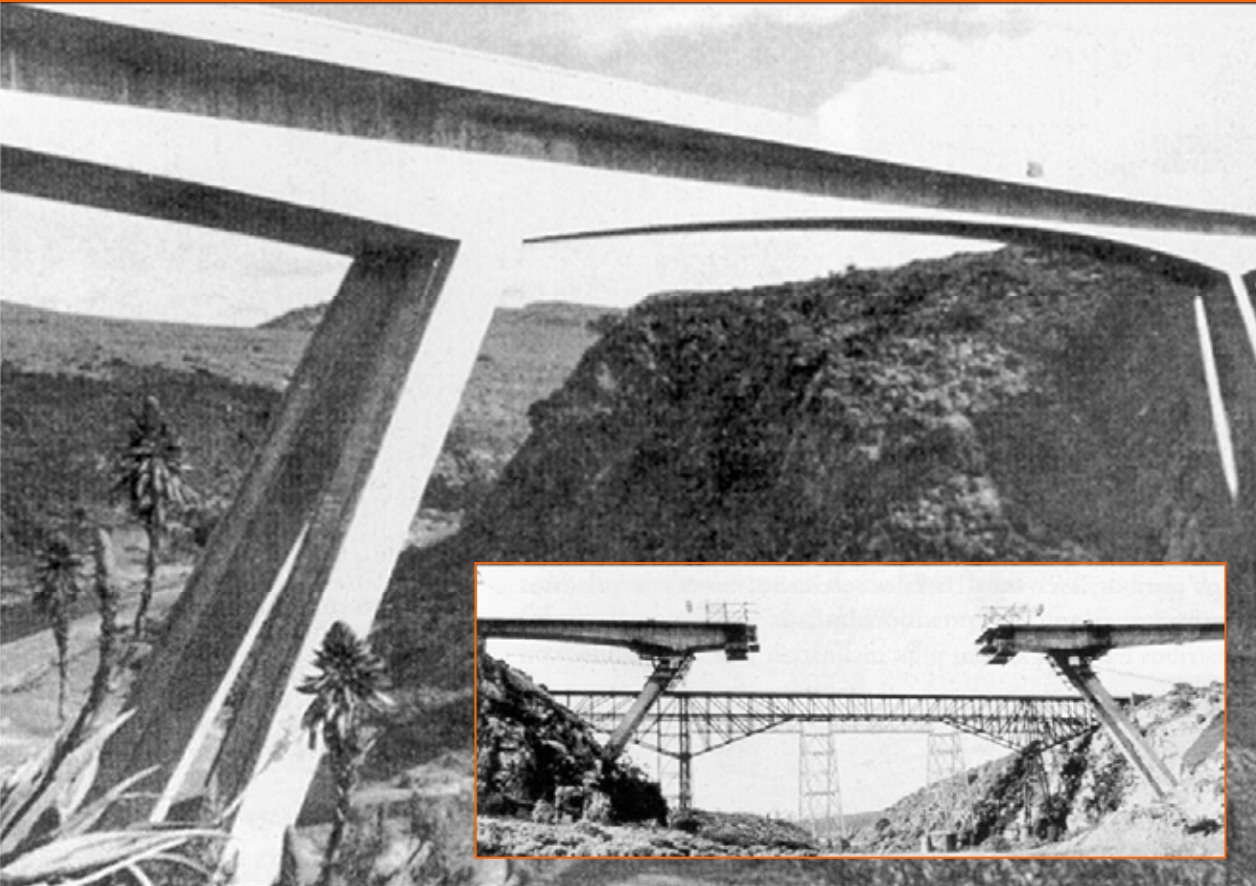


▪Obras: el *ponte del Bonhomme*, sobre el río Blavet (1974, vano de 186.25 m, J. Mathivat)

<5.3.6 Puentes pórtico de apoyos inclinados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

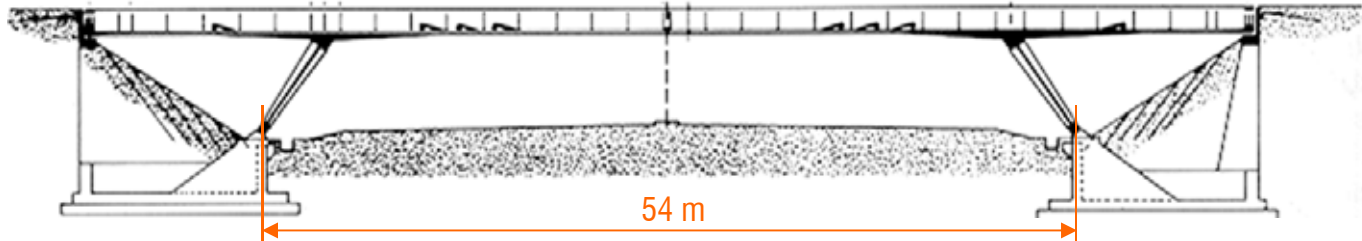
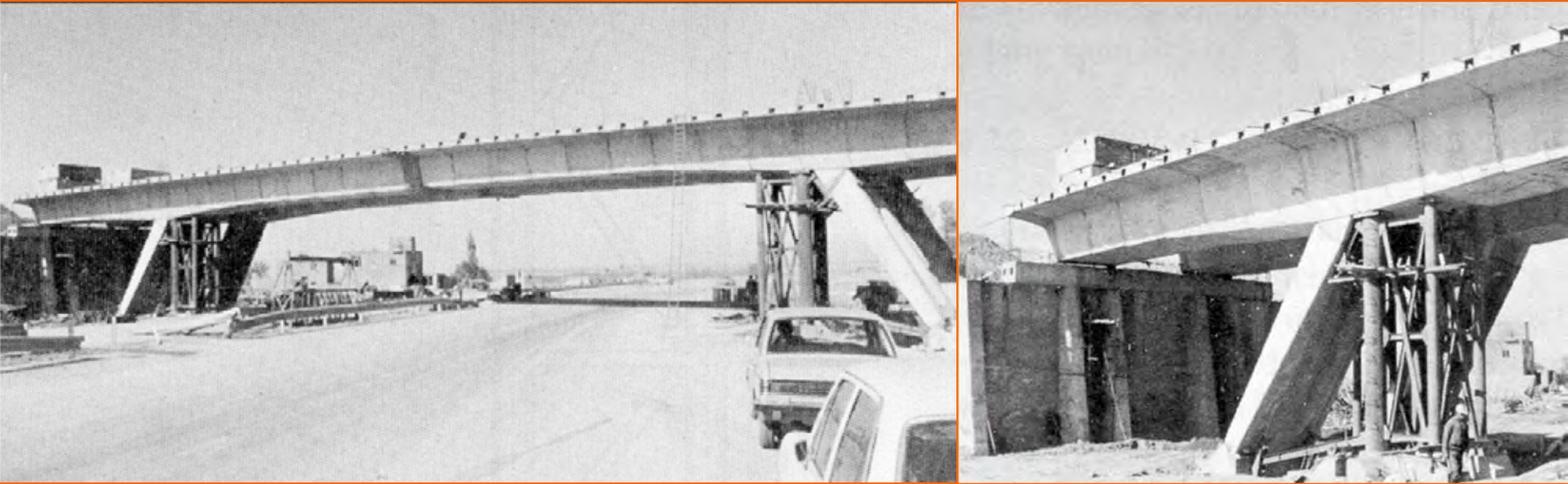


■Obras: el *ponte sobre el río Gouritz* en Mosel-Bay (Sudáfrica, 1978, vano de 170 m, Liebenberg & Stander)

<5.3.6 Puentes pórtico de apoyos inclinados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: *pasos superiores de autopista en oriente medio* (1981, 17 estructuras con vano central de 54 m)

<5.3.6 Puentes pórtico de apoyos inclinados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

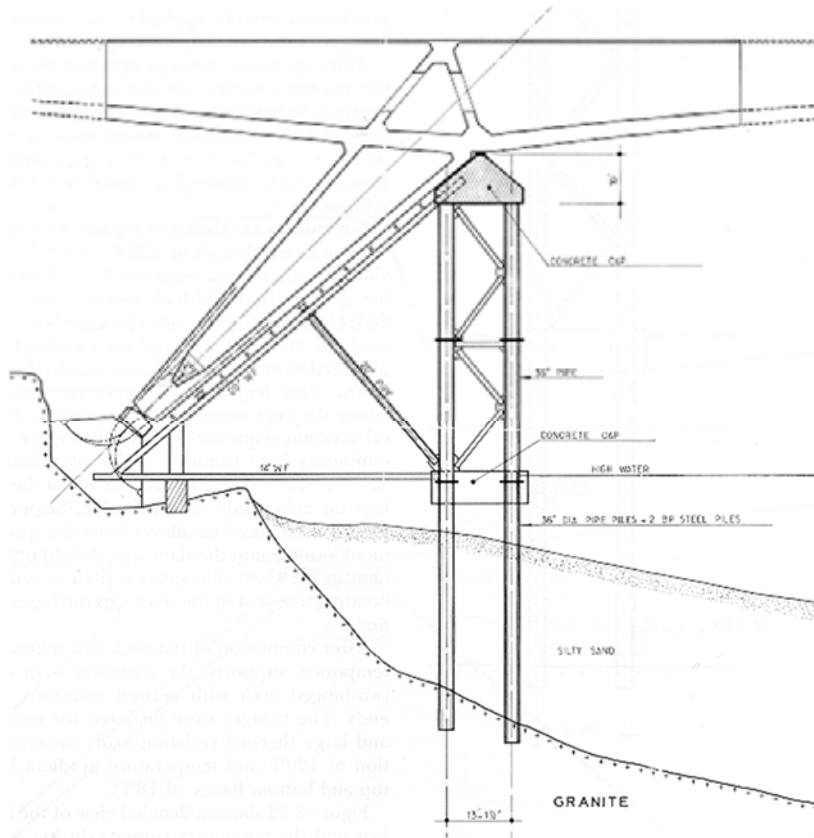


▪Obras: el *puente sobre el Truyère* (1993, pórtico de apoyos inclinados de **195.5 m** de luz, dovelas prefabricadas)

<5.3.6 Puentes pórtico de apoyos inclinados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Apoyos provisionales de los puentes del *Bonhomme* y *sobre el Truyère*

<5.3.6 Puentes pórtico de apoyos inclinados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

□ En 1926, Eduardo Torroja construyó un acueducto de hormigón armado atirantado sobre el río Guadalete, para el abastecimiento de Jerez de la Frontera. Veinticinco años después, Albert Caquot proyectó otro puente atirantado de hormigón armado sobre el canal Donzère-Mondragon



▪ **Acueducto de Tempul**, sobre el río Guadalete (E. Torroja, 1926, 58 m de luz, HA)



▪ **Puente sobre el canal Donzère-Mondragon** (A. Caquot, 1952, 81 m de luz, HA)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

- Esta morfología permite diseñar tableros muy esbeltos si se opta por un atirantamiento múltiple, pudiendo llegar a ser determinante para el diseño el comportamiento aerodinámico
- Las compresiones en el tablero debidas a la inclinación de tirantes son favorables para el hormigón
- El estado actual de la técnica hace que la construcción de puentes atirantados con tablero de hormigón sea de **análoga complejidad** al caso metálico
- Las características dinámicas del tablero de hormigón (masa y amortiguamiento) mejoran el comportamiento dinámico del puente
- La evolución del diseño ha sido hacia **tirantes múltiples** para conseguir tableros más esbeltos y más fáciles de construir por la técnica de voladizos sucesivos, que se ajusta perfectamente a esta tipología



- Con la tecnología actual, su límite estructural parece situarse en los 600 m de luz, siendo las soluciones de tablero metálico las que *conectan* con los puentes colgantes

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

□ Distintas escuelas o tendencias en el diseño de puentes atirantados con tablero de hormigón pretensado:

- La italiana de Ricardo Morandi
- La alemana, de Finsterwalder a Leonhardt
- La francesa, de Muller y Mathivat
- La española, de C.F.C.S.L

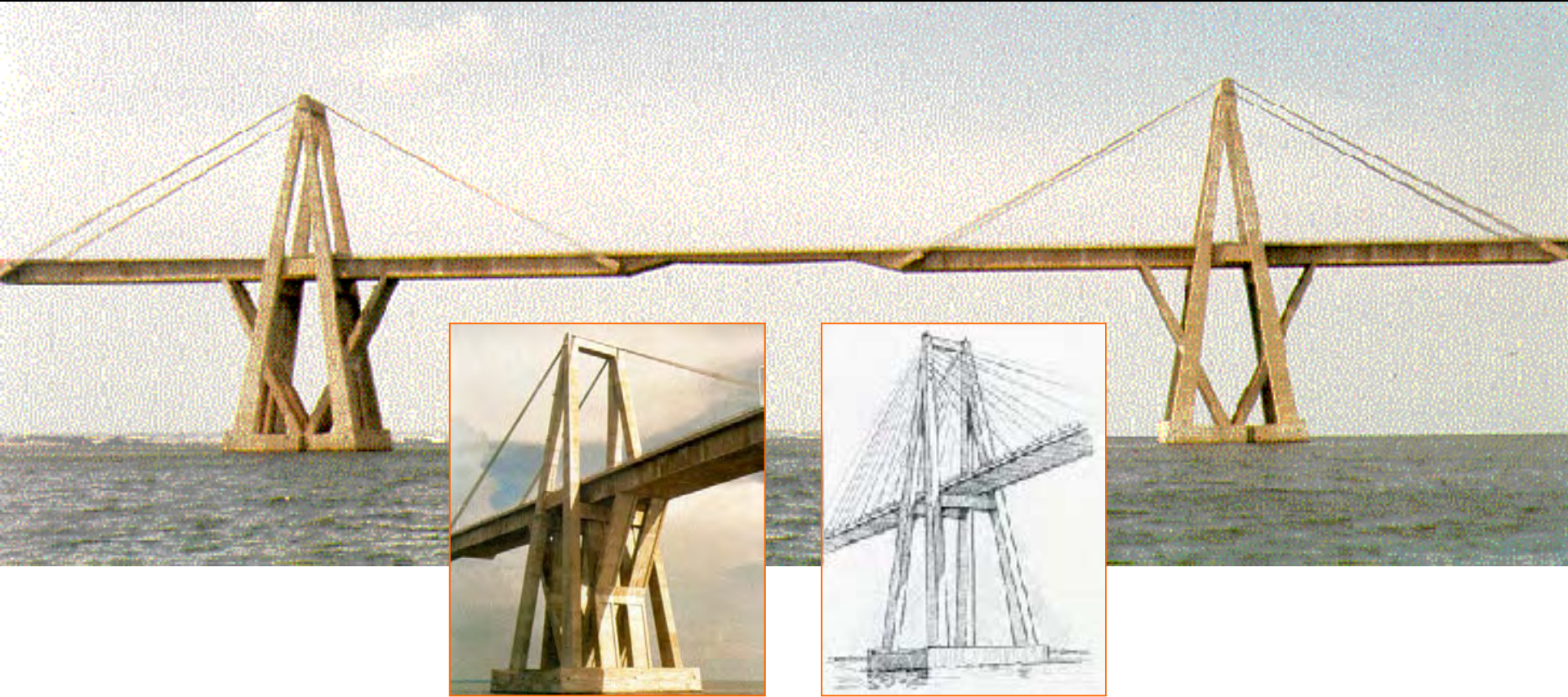


▪ Obras: el *ponte sobre el lago de Maracaibo* (1962, vista general del viaducto, con vanos atirantados de 235 m, Ricardo Morandi)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *punte sobre el lago de Maracaibo*, vistas de los pilonos y diseño alternativo propuesto por Leonhardt

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

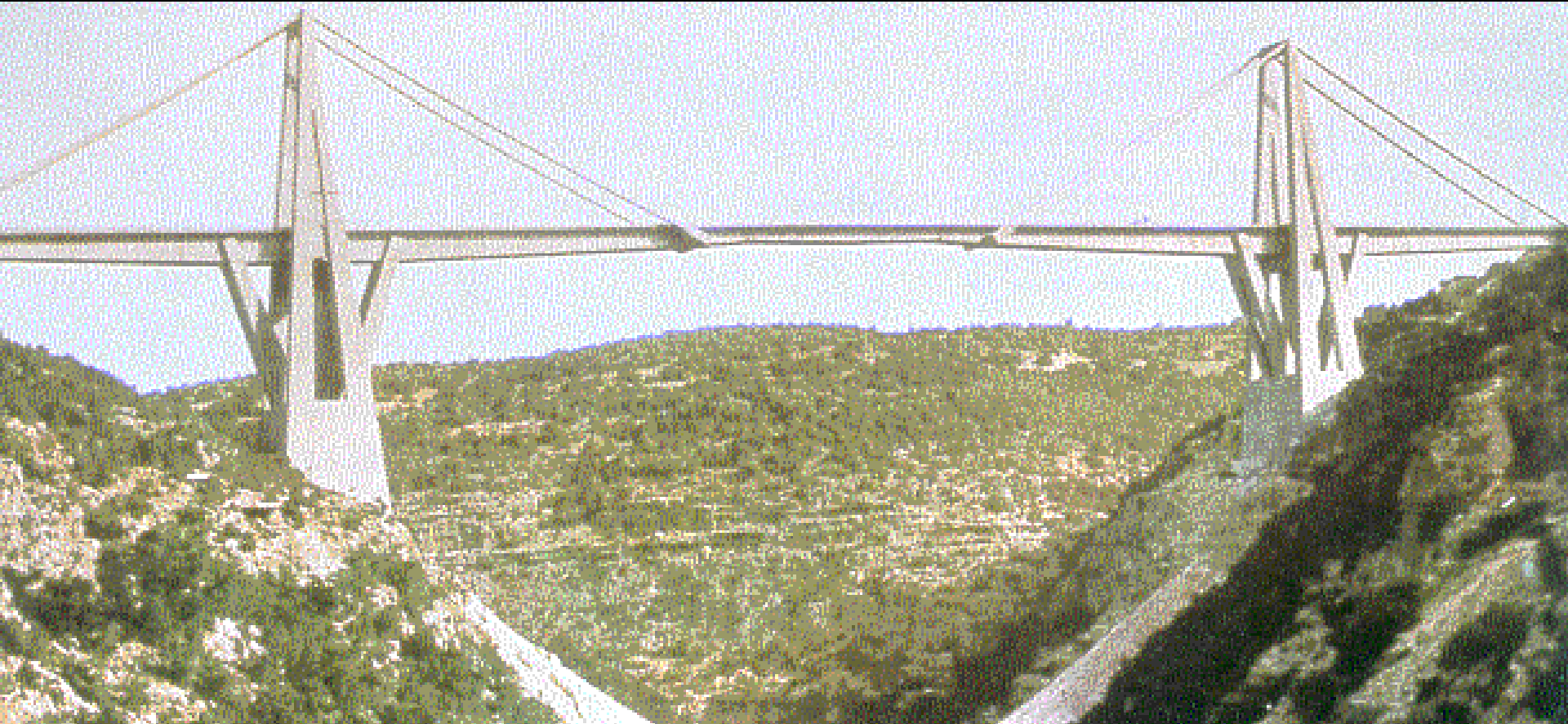


■Obras: el *Viaducto de Polcevera* (Génova, 1964, vanos de 210 m, R. Morandi)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *ponte de Wadi-Cuf* (Libia, 1971, 282 m de luz, R. Morandi)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



- (1) **Ansa de la Magliana**, en la autopista de Roma al aeropuerto (R. Morandi, 1967, 137 m de luz)
- (2) **Puente de Barranquilla**, sobre el río Magdalena, Colombia (R. Morandi, 1974, 140 m de luz)
- (3) **Viaducto de Carpineto**, en Potenza (R. Morandi, 1977, 160 m de luz)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



La escuela de Morandi

▪Obras: el *punte de Chaco-Corrientes* sobre el río Paraná (Argentina, 1973, 245 m de luz, J. Courbon y Ammann & Whitney)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



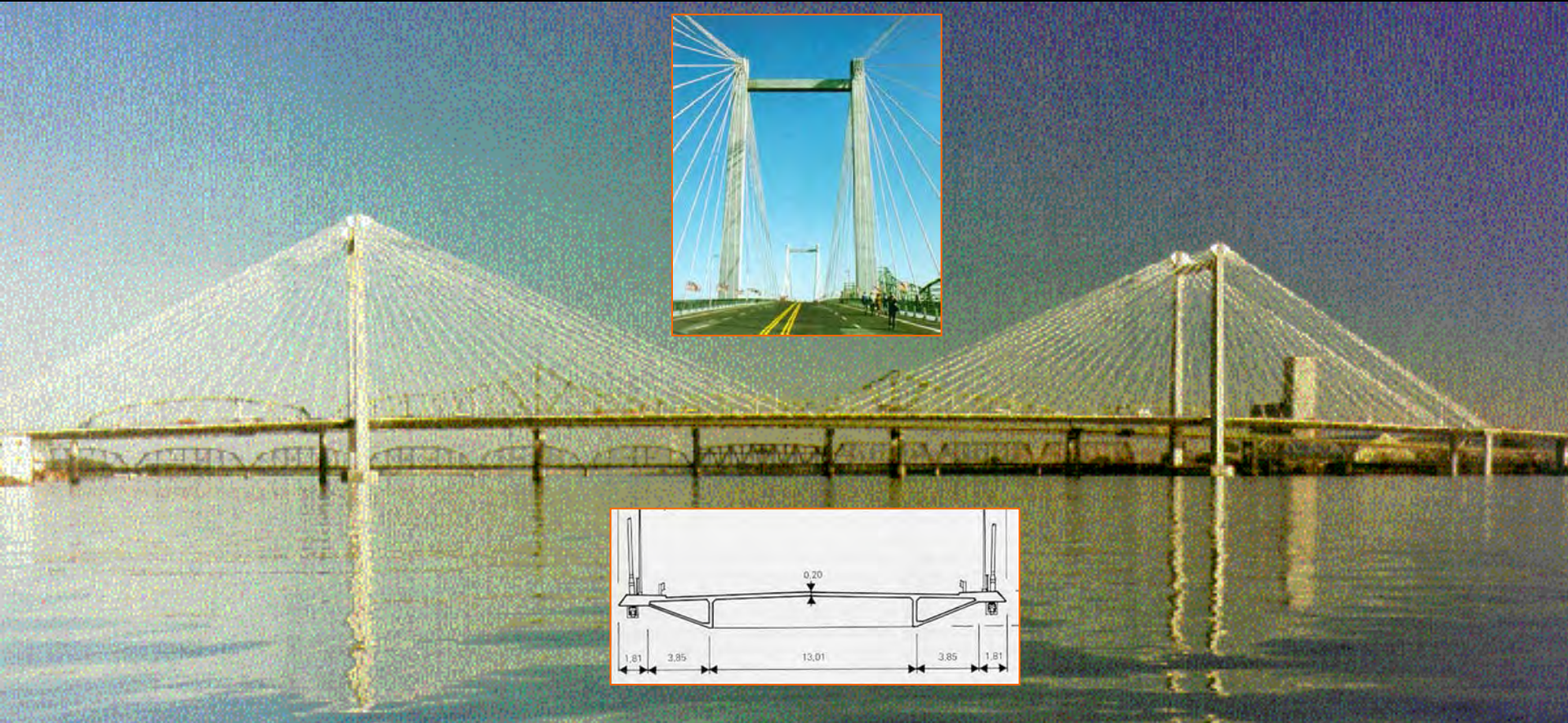
Primer atirantamiento múltiple con tablero de hormigón

▀Obras: el *ponte de la factoría Hoechst* sobre el Main (1972, 148 m de luz, U. Finsterwalder. Dyckerhoff & Widmann)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▀ Obras: el *punte de Pasco-Kennewick* sobre el río Columbia (1978, 299 m de luz, A. Grant y Leonhardt & Ändra)

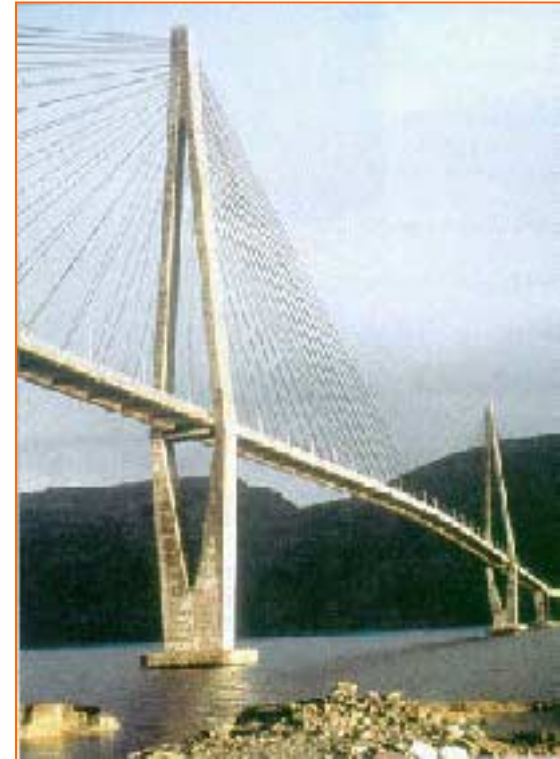
<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ **Puente Posadas-Encarnación**, sobre el río Paraná (Argentina, 1987, 330 m de luz. Heckausen, Cabjolsky y Leonhardt & Ändra)

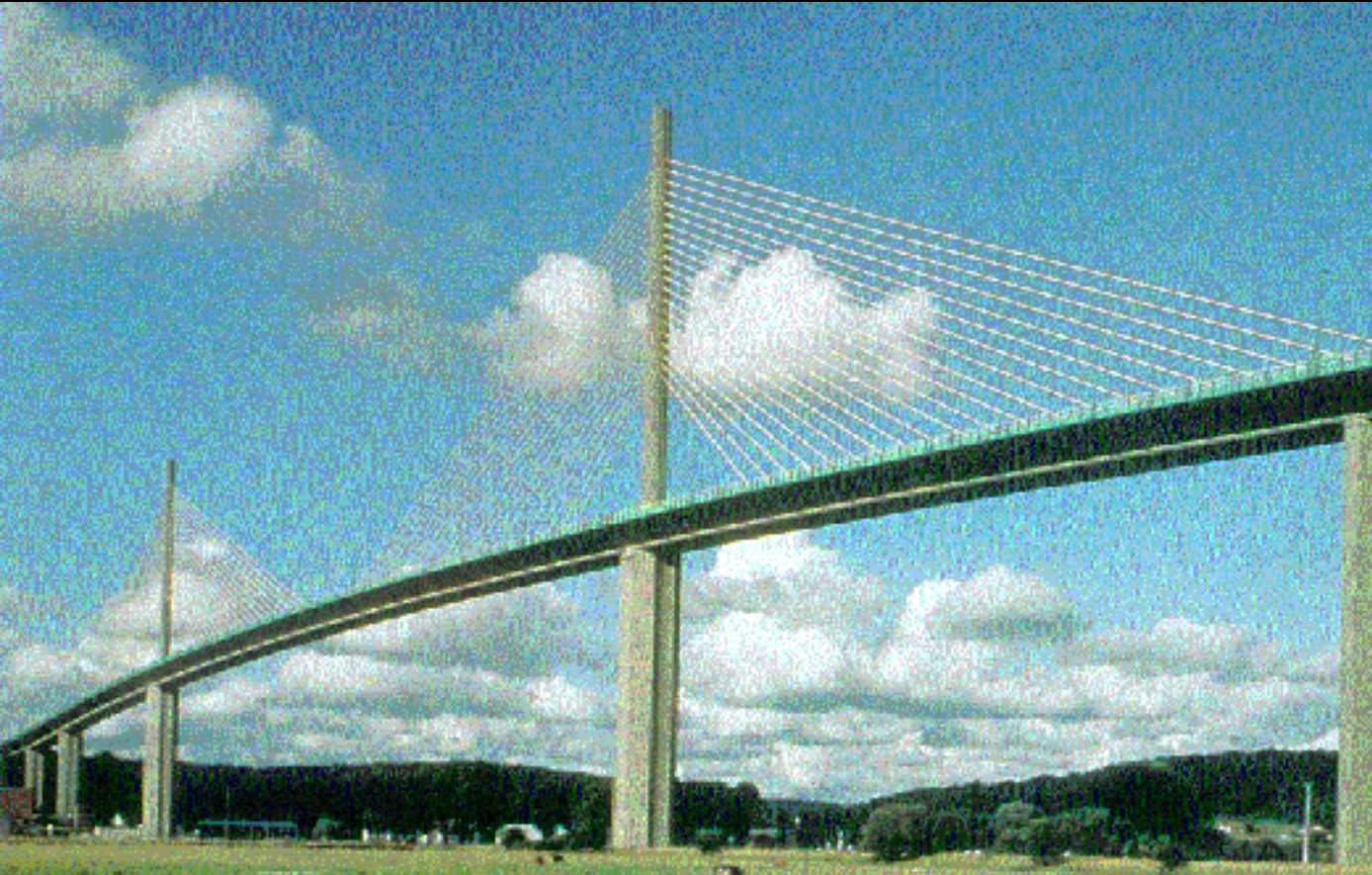


▪ **Puente Helgeland** sobre el fiordo de Leif (Noruega, 1991, 425 m de luz. Leonhardt & Ändra y A. Jakobsen)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



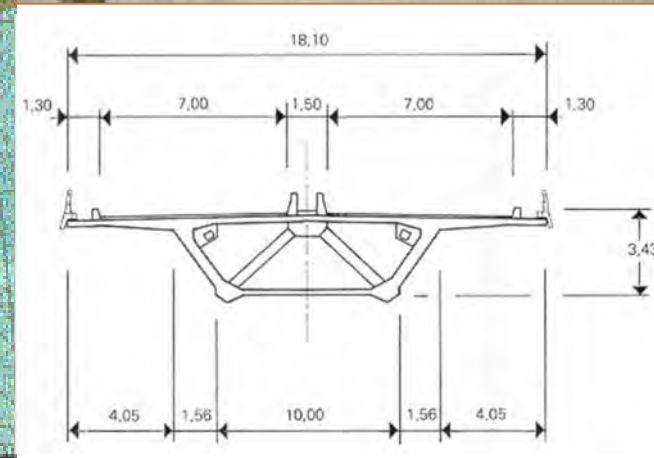
■Obras: el *puente de Brotonne sobre el Sena* (1977, 320 m de luz, J. Muller y J. Mathivat. Campenon Bernard)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

Unión rígida pilono-tablero



■Obras: el *punte sobre el río Coatzacoalcos*, en México (1984, 288 m de luz, J. Mathivat)

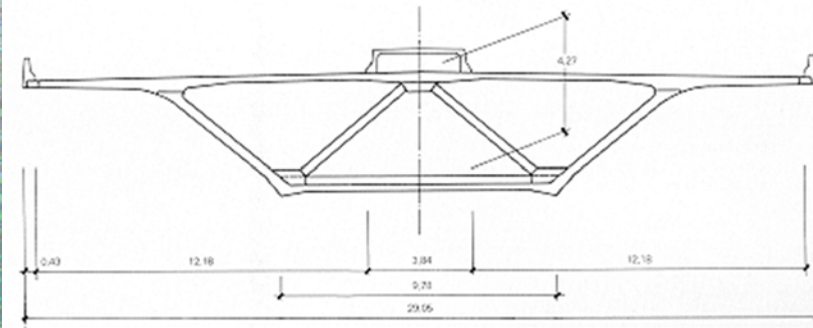
<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▀Obras: el *puente Sunshine Skyway* sobre la Bahía de Tampa (1987, 366 m de luz, J. Muller Int.)



<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

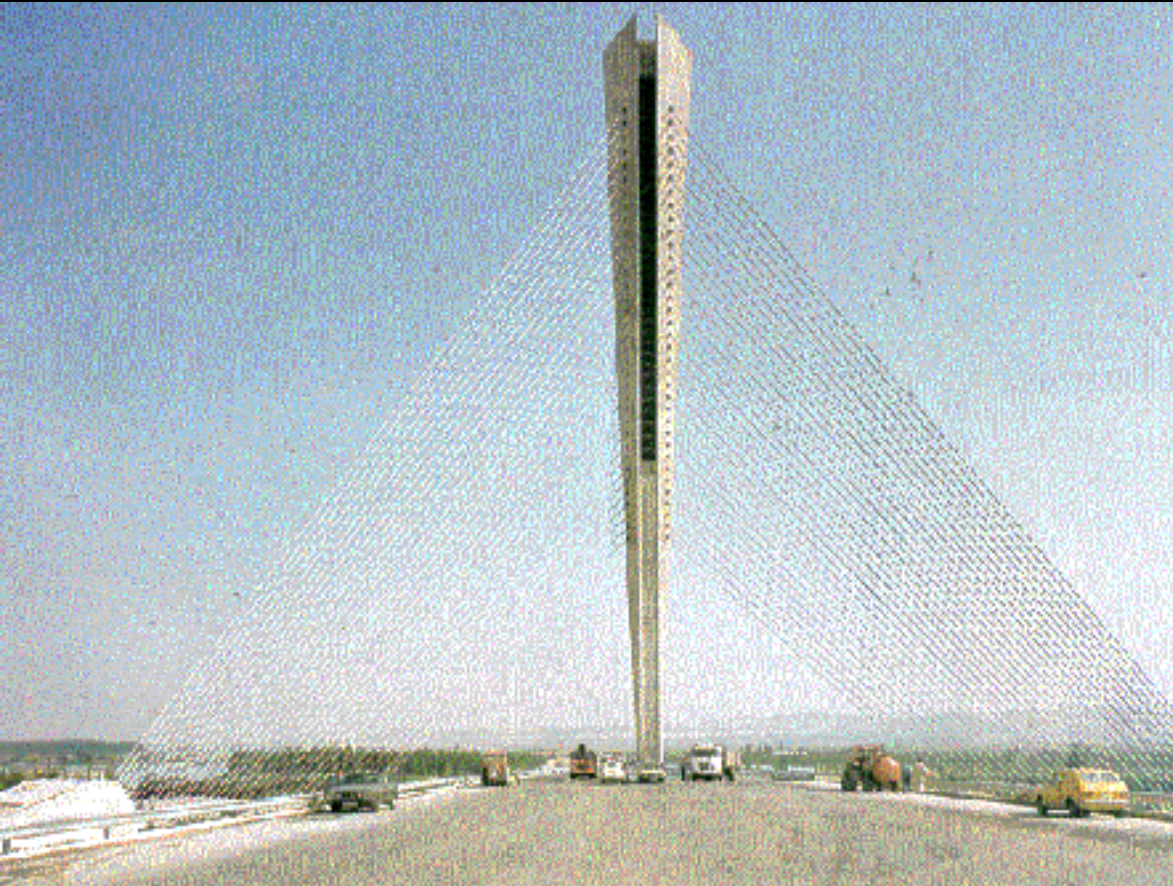


▪Obras: el *puente Sancho el Mayor* sobre el Ebro, cerca de Castejón (1978, 146 m de luz, C.F.C.S.L.)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

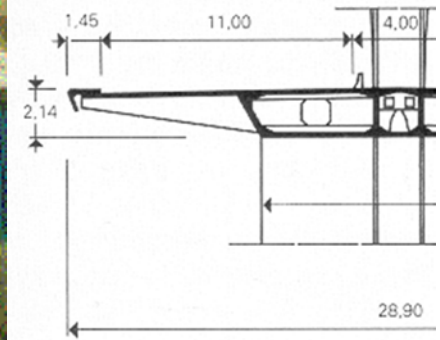
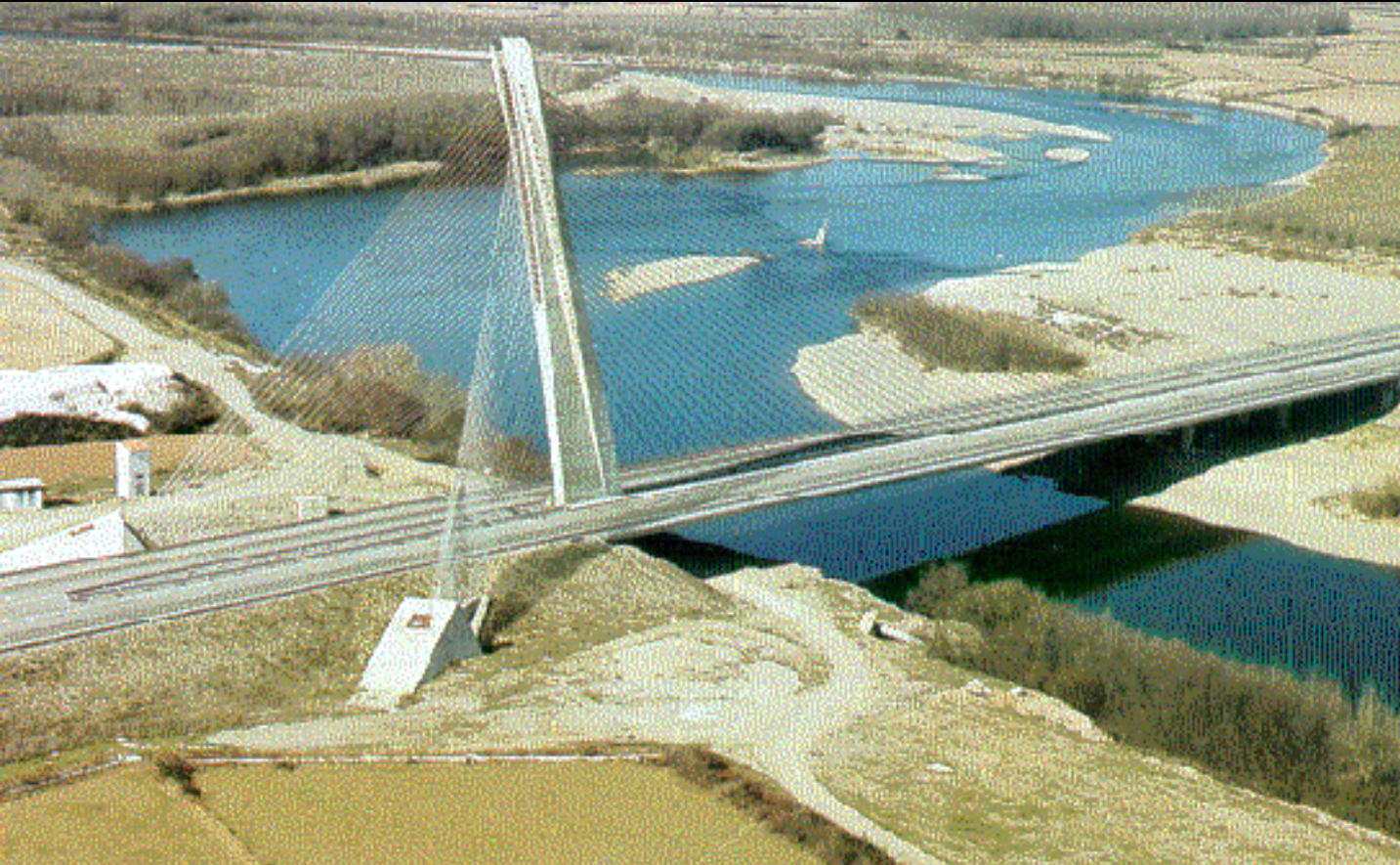


▪Obras: el *punte Sancho el Mayor*, vista frontal del pilono

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

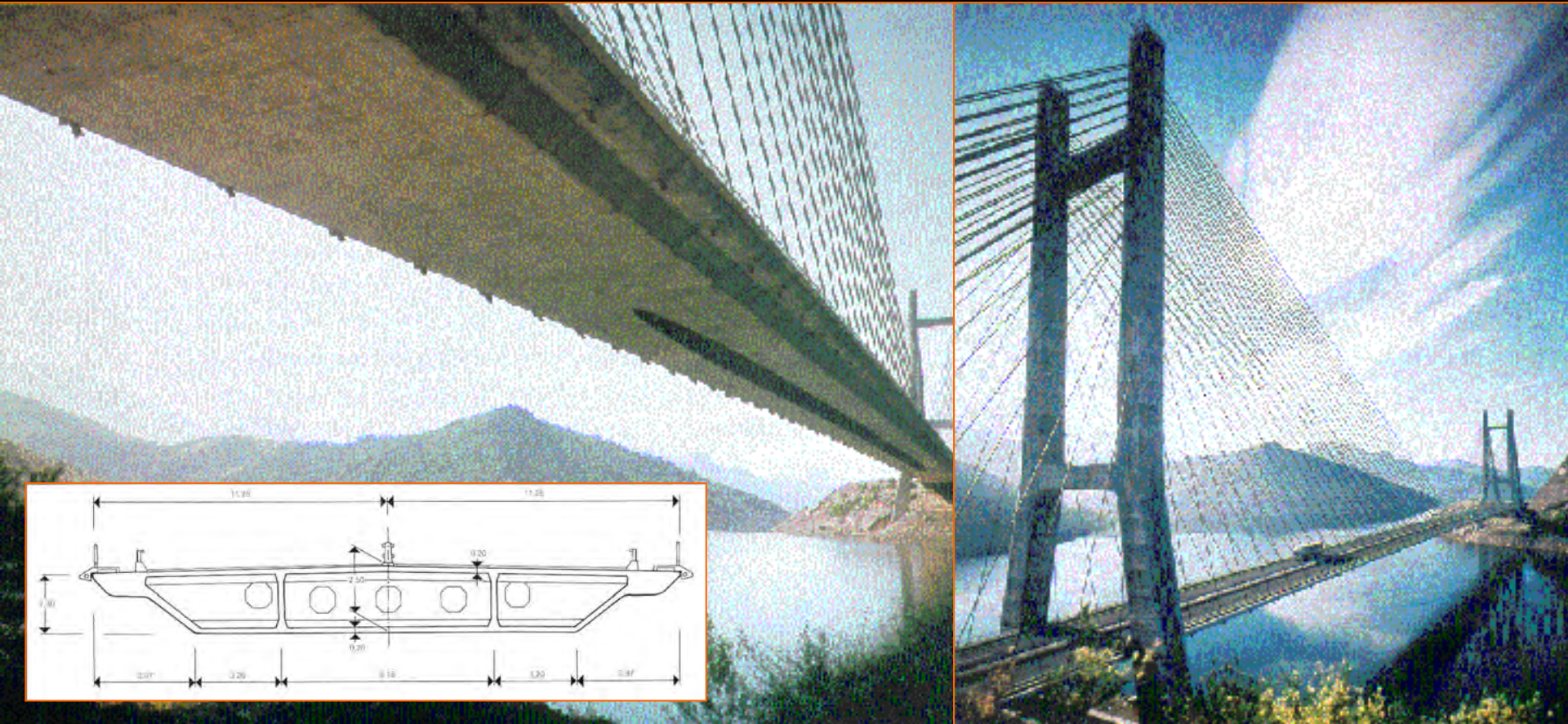


▀Obras: el *punte Sancho el Mayor*, perspectiva aérea y detalle de las semidovelas prefabricadas

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■Obras: el *punte Ingeniero Carlos Fernández Casado* sobre el embalse de Barrios de Luna (1983, 440 m de luz, C.F.C.S.L.)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪El puente en construcción, con los voladizos avanzando hacia la sección de centro de vano en la que existe una **junta de dilatación permanente**

▪Vista lateral del puente en la que se puede apreciar la gran esbeltez del tablero ($h/L=1/190$) y la configuración del atirantamiento, de tipo híbrido con un claro **haz de tirantes de retenida**

▪Obras: el *puente Ingeniero Carlos Fernández Casado* sobre el embalse de Barrios de Luna (1983, 440 m de luz, C.F.C.S.L.)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *ponte sobre el Lérez* (Pontevedra, 1995, vano atirantado de 125 m, C.F.C.S.L.)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *ponte sobre el río Papalaopan* (México, 1995, vano central de 203 m, C.F.C.S.L.)

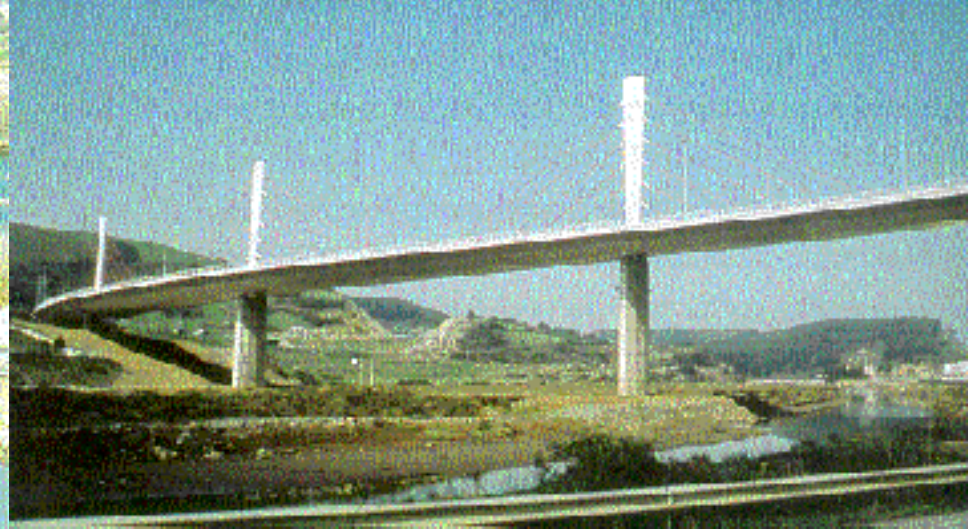
<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ **Puente sobre la ría de Colindres**, vanos de $50+2\times 125+50$ m (1993, Proes)



▪ **Viaducto de la arena**, cerca de Bilbao, vanos de $70+5\times 105+70$ m con tablero mixto curvo en planta (Apia XXI)

▪ Puentes atirantados de vanos múltiples en España

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



■Obras: el *punte de Gantner* (carretera de Simplón, 1982, vano máximo de 174 m, Christian Menn)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *puente de Sunniberg* (Klosters, 1997, Christian Menn)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Obras: el *puente de Sunniberg*, detalles del atirantamiento

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

Grandes puentes atirantados con tablero de hormigón pretensado (*Top Ten*)

<i>Skarnsundet</i> (Noruega, 1991)	530 m	Hovland, Isaksen y Hansvold
<i>Barrios de Luna</i> (España, 1983)	440 m	C.F.C.S.L.
<i>Helgeland</i> (Noruega, 1991)	425 m	Leonhardt & Ändra y A. Jakobsen
<i>Wadi Leban</i> (Arabia Saudí, 1999)	405 m	S. Srinivisan y Shair & Partners
<i>Pont sur l'Elorn</i> (Francia, 1990)	400 m	Sogelerg-Alain Chauvin
<i>Dame Point</i> (USA, 1989)	396 m	Howard, Needles, Tammen y Bergendorff
<i>Sunshine Skyway</i> (USA, 1987)	366 m	Jean Muller International
<i>Batam-Tonton</i> (Indonesia, 1998)	350 m	LAPI-ITB (Indonesia) y MBK (Australia)
<i>Posadas-Encarnación</i> (Argentina, 1987)	330 m	Heckausen y Cabjolsky, Leonhardt & Ändra
<i>Brotonne</i> (Francia, 1977)	320m	J. Muller y J. Mathivat

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ **Nº10:** el *punte de Brotonne* sobre el Sena (1977, 320 m de luz, J. Muller y J. Mathivat. **Campenon-Bernard**)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪Nº9: el *punte de Posadas-Encarnación*, sobre el río Paraná (Argentina, 1987, 330 m de luz)

▪Nº8: el *punte Batam-Tonton*, sobre el mar del sur de China (Indonesia, 1998, 350 m de luz. LAPI-ITB y MBK)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ **Nº7:** el *punte Sunshine Skyway* sobre la Bahía de Tampa (1987, 366 m de luz, J. Muller Int.)

<5.3.7 Puentes atirantados>

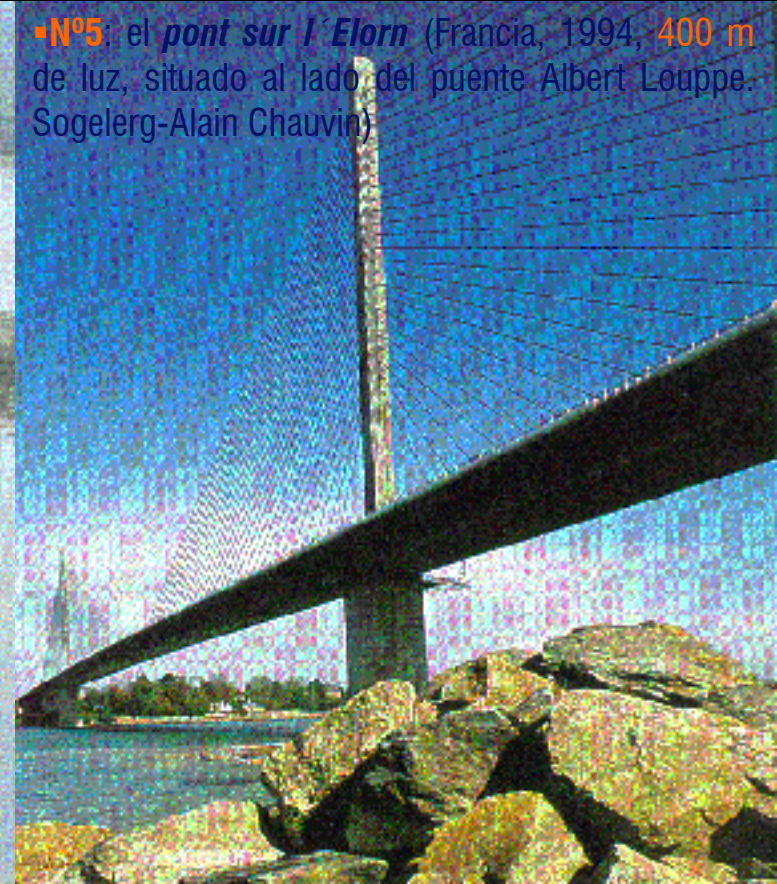
<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

•Nº6: el *punte Dame Point* sobre el río St. John (Estados Unidos, 1989, 396 m de luz, Howard, Needles, Tammen y Bergendoff)



•Nº5: el *pont sur l'Elorn* (Francia, 1994, 400 m de luz, situado al lado del puente Albert Louppe. Sogelerg-Alain Chauvin)



<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ **Nº4:** el *punte de Wadi Leban* en Riyadh (Arabia Saudí, 1999, 405 m de luz. S. Srinivisan, Shair & Partners. Tanmia-Saudi Archirodon J.V.)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE Puentes DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado

•Nº4: el *puente de Wadi Leban* en Riyadh (Arabia Saudí, 1999, 405 m de luz. S. Srinivisan)



•Nº3: el *puente Helgeland* sobre el fiordo de Leif (Noruega, 1991, 425 m de luz. Leonhardt & Ändra y A. Jakobsen)



•Nº2: El *puente Ingeniero Carlos Fernández Casado* sobre el embalse de Barrios de Luna (1983, 440 m de luz, C.F.C.S.L.)



<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte>

05 Puentes de hormigón pretensado



▪ **Nº1**: el *punte de Skarnsundet* (Noruega, 1991, vano principal de **530 m**, Hovland, Isaksen & Hansvold)

<5.3.7 Puentes atirantados>

<5.3 **PANORÁMICA GENERAL DE PUENTES DE HP: estado del arte**>

Procedencia de las ilustraciones

▪Leonardo Fernández Troyano, *“Tierra sobre el agua”*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (1999):

[01] 10, 11, 12

[02] 17, 21, 29, 30, 31, 33, 34, 36, 37, 39, 43, 44, 45, 55, 56, 64, 68, 69, 71, 72, 73

[03] 82, 86, 87, 88, 90, 92, 93, 94, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 106, 107, 111, 112, 114, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 126, 127, 130, 131, 132, 133, 134, 136, 137, 138, 139, 140, 143, 148, 152, 154, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 167, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 180, 181, 182, 185, 186, 187, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 196, 198, 199, 200, 204, 206, 207, 208, 209, 210, 212, 213, 214, 217, 225, 228, 229, 243, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 263, 265, 266, 267, 268, 269, 271, 272

[04] 288, 293, 297, 298, 299, 301, 308, 315, 317, 318, 321, 325, 327, 329, 331, 332, 335, 336, 346, 347, 351, 352, 358, 360, 361, 363, 364, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 377

[05] 390, 393, 397, 400, 401, 405, 409, 410, 414, 416, 418, 423, 424, 426, 431, 433, 435, 438, 440, 441, 443, 444, 446, 447, 448, 449, 460, 475, 481, 483, 485, 488, 489, 490, 494, 495, 496, 497, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 512, 514, 515, 516, 520, 521, 522, 523, 524, 526, 527, 529, 530, 531, 532, 534, 535, 538, 544, 545, 546

▪Fritz Leonhardt, *“Brücken/Bridges”*, The Architectural Press (1982):

[02] 19, 28, 38, 40, 53, 57, 70

[03] 98, 183, 184, 200, 201, 202, 211, 215, 218, 220, 222, 230, 231, 258, 259, 260, 261, 262, 264

[04] 330, 338, 349, 350, 353, 365, 366, 378

[05] 407, 419, 429, 432, 472, 484, 486, 498, 502, 517, 518, 519, 525, 528, 543

<CAP. 1, 2 y 3:

PUENTES DE FÁBRICA DE PIEDRA Y PUENTES METÁLICOS>

Procedencia de las ilustraciones

▪Colin O'Connor, "*Design of bridge superstructures*", John Wiley (1971):

[03] 216, 219, 221, 223, 245, 246, 247, 248

[05] 403, 404

▪Ana Vázquez de la Cueva, "*La ingeniería civil en la pintura*", Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2000):

[02] 16, 29, 39, 42, 46, 47, 50, 51, 54, 62

[03] 79, 80, 93, 108, 156, 195

▪Graeme Outerbridge, "*Bridges*", Harry N. Abrams (1989):

[02] 48, 49

[03] 138, 230, 231

▪Judith Dupré, "*Bridges, a history of the world's most famous and important spans*", Könemann (1998):

[03] 91, 103, 116, 136, 154, 157, 163, 169, 188, 189, 190, 197, 205

▪Charlotte Jurecka, "*Brücken*", Verlag Anton Schroll & Co. (1979):

[02] 17, 18, 75

▪Presses de l'E.N.P.C., "*Ponts de France*" (1982):

[02] 22, 58, 60, 65, 66, 74

[03] 100, 121, 123, 128

<CAP. 1, 2 y 3:

PUENTES DE FÁBRICA DE PIEDRA Y PUENTES METÁLICOS>

Procedencia de las ilustraciones

- Presses de l'E.N.P.C., "*Construire des ponts au XVIII^e siècle. L'œuvre de J.R. Perronet*" (1987):
[02] 58, 61, 63
- Eric De Lony, "*Landmark American bridges*", A.S.C.E. (1993):
[03] 81, 104, 105, 161, 169, 197
- Juan José Arenas de Pablo, "*Líneas de verdad*", Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2002):
[03] 229
- Edmund C. Hambly, "*Bridge deck behaviour*", Chapman and Hall (1976):
[03] 113
- A.R. Cusens y R.P. Pama, "*Bridge deck analysis*", John Wiley (1975):
[03] 124, 129
- René Walther, "*Ponts haubanés*", Presses polytechniques romandes (1985):
[03] 144, 145
- M.S. Troitsky, "*Cable-stayed bridges*", Crosby Lockwood Staples (1977):
[03] 256

<CAP. 1, 2 y 3:

PUENTES DE FÁBRICA DE PIEDRA Y PUENTES METÁLICOS>

Procedencia de las ilustraciones

▪Walter Podolny Jr. y John B. Scalzy, *“Construction and design of cable-stayed bridges”*, John Wiley (1976):

[03] 263

▪Bridge, design and engineering:

[03] 78, 116, 141, 149, 239, 240, 270, 273, 274, 278, 279

▪I.A.B.S.E., *“Structural Engineering International”*:

[03] 237

▪Walter Podolny Jr. y Jean M. Muller, *“Construction and design of prestressed concrete segmental bridges”*, John Wiley (1982):

[04] 339, 348, 359, 366, 379, 380, 381

[05] 388, 389, 398, 402, 403, 404, 406, 418, 419, 434, 450, 457, 473, 476, 477, 482, 483, 484, 486, 487, 493, 502, 503, 510, 511, 513, 515

▪Carlos Fernández Casado, *“Puentes de hormigón armado pretensado”*, Dossat (1965):

[05] 392, 393, 394, 395, 408, 411, 412, 413, 415, 417, 421, 425

▪David P. Billington, *“Robert Maillart and the art of reinforced concrete”*, Architectural History Foundation & Massachusetts Institute of Technology (1990):

[04] 305, 306, 307, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 319, 320, 322, 323, 324, 326, 328

<CAP. 4 y 5:

**PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO Y PUENTES DE
HORMIGÓN PRETENSADO>**

Procedencia de las ilustraciones

- José A. Fernández Ordóñez, “*Eugène Freyssinet*”, 2c Ediciones (1978):
 - [04] 333, 337, 340, 341, 342, 343, 344, 345
 - [05] 385, 386, 387, 389, 390, 400

- Hans Wittfoht, “*Puentes. Ejemplos internacionales*”, Gustavo Gili (1975):
 - [04] 373
 - [05] 419, 420, 428, 474

- René Walther, “*Ponts haubanés*”, Presses polytechniques romandes (1985):
 - [05] 525, 528, 530, 533, 534

- Christian Menn, “*Prestressed concrete bridges*”, Birkhäuser (1990):
 - [05] 391, 442

- Presses de l’E.N.P.C., “*Ponts de France*” (1982):
 - [04] 284, 299, 302, 303, 353

- Eric De Lony, “*Landmark American bridges*”, A.S.C.E. (1993):
 - [04] 354, 355, 356

<CAP. 4 y 5:

**PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO Y PUENTES DE
HORMIGÓN PRETENSADO>**

Procedencia de las ilustraciones

▪ Jacques Mathivat, *“Construcción de puentes de hormigón pretensado por voladizos sucesivos”*, editores técnicos asociados (1980):

[05] 458, 476, 492

▪ Colin O’Connor, *“Design of bridge superstructures”*, John Wiley (1971):

▪ E. Beyer y H. Tul, *“Carreteras elevadas”*, Editorial Blume (1969):

[05] 314

▪ Transportation Research Board, *“Bridge aesthetics around the world”* (1991):

[04] 347

[05] 503

▪ Graeme Outerbridge, *“Bridges”*, Harry N. Abrams (1989):

[05] 513

▪ Judith Dupré, *“Bridges, a history of the world’s most famous and important spans”*, Könemann (1998):

[04] 354

▪ Eduardo Torroja Miret, *“Razón y ser de los tipos estructurales”*, C.S.I.C. (1991):

[04] 375

<CAP. 4 y 5:

PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO Y PUENTES DE HORMIGÓN PRETENSADO>

Procedencia de las ilustraciones

▪ietcc, *“Informes de la construcción”*:

[05] 516

▪Colegio de I.C.C.P., *“J. Eugenio Ribera, Ingeniero de Caminos, 1864-1936. Catálogo de la exposición”*:

[04] 295

▪Freyssinet magazine:

[05] 439, 447, 448, 469, 452, 453, 454, 455, 456, 458, 459, 460, 478, 546

▪Bridge, design and engineering:

[04] 329

[05] 436, 437, 482, 540, 541, 547, 548, 549

▪Manual PERI:

[05] 447, 448, 451

▪Carlos Fernández Casado S.L.:

[05] 427, 517, 536, 537

<CAP. 4 y 5:

**PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO Y PUENTES DE
HORMIGÓN PRETENSADO>**