

PUENTES Y PUENTES COLGANTES

Alfredo Cilento Sarli

RESUMEN

Carreteras y puentes, así como represas y acueductos, ocuparon un lugar preponderante en la actividad de los ingenieros desde la antigüedad. En los siglos XIX y XX, la creación de redes de circulación a escala territorial, así como el avance del ferrocarril a partir de 1840, crearon una gigantesca demanda de puentes y viaductos de todo tipo. A medida que las carreteras y las vías férreas avanzaban, cada vez se requería enfrentar más obstáculos físicos: ríos, desfiladeros, canales, pantanos y los cruces de las mismas carreteras y vías de ferrocarril. La construcción de puentes se convirtió en una imperiosa necesidad que debió ser satisfecha para la conquista del territorio, y ello implicó enfrentar otro tipo de obstáculos tecnológicos y económicos. Este trabajo, al igual que el presentado en las Jornadas del IDEC de 1998, "Edificios (muy) altos: los rascacielos",¹ forma parte de una investigación titulada "Innovación y Cambio Técnico en la Construcción" que pretende identificar los antecedentes y el proceso de desarrollo tecnológico en los principales productos de la construcción. El análisis de los puentes y viaductos es un magnífico caso de estudio para revisar la relación entre la construcción y su entorno, además de su evidente interés como proceso de cambio técnico.

ABSTRACT

Highways and bridges, as well as dams and aqueducts, occupied a preponderant place in the activity of the engineers from the early times. In the XIX and XX centuries, the creation of circulation nets to territorial scale, as well as the advance of the railroad starting from 1840, created a gigantic demand of bridges and viaducts of all type. As highways and railroads goes on, was required to face more physical obstacles: rivers, narrow passes, channels, swamps and the crossings of the same highways and railroads. The construction of bridges became an imperious necessity that should be satisfied for the conquest of the territory, and it implied it to face another type of technological and economic obstacles.

This work, the same as the one presented in the 1998 IDEC Meeting, "(Very) Tall buildings: skyscrapers",¹ it forms part of an investigation titled "Innovation and Technical Change in the Construction" that seeks to identify the antecedents and the process of technological development in the main products of the construction. The analysis of bridges and viaducts are a magnificent case of study to revise the relationship between the construction and their environment, besides their evident interest like construction work and process of technical change.

INTRODUCCIÓN

Los puentes son artefactos constructivos destinados a vencer obstáculos naturales como ríos, lagos, estrechos, desfiladeros, etc.; o para salvar las propias hechuras de los humanos como pasos de vías, ferrocarriles o zonas construidas en las ciudades. Son obras de construcción que deben responder a las características del sitio de implantación, es decir, sus dimensiones están en función del obstáculo a vencer y de la técnica empleada para su construcción. Puesto que los obstáculos vinculan tierra y agua en infinitas combinaciones, los puentes terminan siendo obras de ingeniería únicas y no repetibles. Esta característica los diferencia claramente de las otras obras de construcción, a excepción de los túneles, que también responden a la situación y complejidades físicas del obstáculo. Desde el punto de vista constructivo, el puente es el "antónimo técnico" de túnel. El puente supera el obstáculo por arriba, es decir, lo salta, mientras que un túnel vence el espacio por debajo, lo penetra: los puentes saltan espacios cóncavos mientras que los túneles atraviesan espacios convexos.

La audacia de la mayoría de los puentes que revisamos en este trabajo, que por algo son llamados "obras de arte",² refleja con enorme claridad, cómo el desarrollo de la técnica moderna ha logrado estructuras cada vez más atrevidas, ligeras y bellas, lo que ha permitido que la innovación tecnológica se refleje con singular claridad en su construcción. El diseño y construcción de puentes han sido dominio casi exclusivo de los ingenieros, sin embargo han sido también una prueba de que las formas estructurales y constructivas, provenientes de técnicas usadas con ingenio, precisión y sin extravagancias, pueden alcanzar gran belleza, sin necesidad de estridentes artificios y adornos inútiles.

Los grandes puentes y viaductos son, entre todas las obras construidas por los humanos, quizás, la mejor expresión del dominio de la naturaleza por la técnica. Por ello despiertan una especie de temerosa reverencia, mezcla de admiración e incredulidad, magnificada en la segunda mitad del siglo

¹ "Edificios (muy) altos: los rascacielos". *Tecnología y Construcción* N° 15 II, 1999:7-34.

² Cuando se habla de vialidad se discrimina entre las obras de construcción de la calzada y el pavimento, y las "obras de arte" (principalmente puentes y viaductos).

DESCRIPTORES:

Puentes; Puentes colgantes;
Tecnología de la construcción;
Innovación

XX, a partir de la posguerra, cuando se produjo una verdadera revolución tecnológica en su construcción, particularmente luego de la introducción del concreto pretensado, de los concretos y aceros de muy alta resistencia, y de la evolución de la tecnología de los puentes colgantes.

LOS PUENTES DE PIEDRA

Los primeros puentes construidos formalmente fueron los llamados puentes de caballete, constituidos por postes de madera clavados en el lecho de un río, para servir de apoyo a troncos o vigas longitudinales y/o transversales que soportaban el tablero. Esta tipología de puentes todavía se usa para atravesar valles y ríos en los que no interfieren con la navegación. El uso de pilas o muros de piedra para apoyar las vigas de madera y el tablero, fue el avance inmediato. Más tarde, la utilización de flotadores, en lugar de apoyos fijos, dio origen al puente de pontones. Puentes de pontones eran utilizados en China antes de que los persas, griegos y romanos los utilizaran como obras de ingeniería militar (tal como hoy). En 493 a.C., Darío atravesó de forma espectacular el Bósforo, de 900 m de ancho, con un puente de pontones; y Herodoto describió el paso del Helosponto por Jerjes, veinte años más tarde, a través de un puente de pontones que una tormenta había destruido mientras se construía. Puentes colgantes de madera y en voladizo fueron usados en China y Tibet desde tiempos muy antiguos. Aunque los sumerios y los egipcios (3.000 a 3.500 años a.C.) utilizaban el arco de ladrillos para salvar grandes aberturas, no hay constancia de su utilización en puentes hasta los babilonios, quienes construyeron un puente sobre el Éufrates, con arco de obra de ladrillo, durante el reinado de Nimrod, unos 7 siglos a.C.³

La piedra fue el material constructivo que los humanos siempre asociaron a lo eterno por su durabilidad. El hombre había aprendido temprano a encajar las piedras, talladas en bruto, para formar arcos y bóvedas, en las que las cargas se transforman en esfuerzos de compresión hacia los arranques (estribos del puente), eliminando los esfuerzos de tracción, lo que permitió formar arcos de luces considerables. Los romanos adoptaron el arte de los arcos y bóvedas de los etruscos y lo perfeccionaron hasta niveles aun difíciles de superar; y se hicieron famosos por sus puentes de grandes arcos de piedra, que construyeron, a medida que sus legiones avanzaban, a lo largo de todos los territorios conquistados. Pero como es bien sabido, buena parte de sus más impactantes estructuras no eran puentes para el tráfico, sino para transportar el agua de sus famosos acueductos. Hasta qué punto era prestigiosa la construcción de puentes entre los romanos, se puede deducir del hecho de que llamaban *pontifex*⁴ al supremo sacerdote, y todavía hoy el Papa es el Sumo Pontífice.

El paso de la construcción de puentes de madera a la de puentes de piedra, es un buen reflejo del sentido de perdurabilidad que dominaba todas las actuaciones de los romanos, demostrado con el afán de dominar al mundo al paso de sus temibles legiones, y también con la construcción de carreteras, puentes, acueductos y edificaciones de piedra, el material eterno. Además descubrieron el cemento, con el que fabricaron morteros y hormigón. El llamado "cemento romano" se fabricaba a partir de la puzolana pulverizada, rocas y cenizas volcánicas provenientes de la zona de Pozzuoli, cerca de Nápoles, producto de las erupciones del Vesubio.

Los romanos emplearon solamente el arco de medio punto que permite transmitir los esfuerzos verticalmente, lo que implicaba que al aumentar la luz creciera también la altura del arco. La forma de los puentes romanos estaba prácticamente predeterminada por el arco de medio punto, pero la construcción envolvía problemas complejos debido a los escasos medios disponibles para elevar los pesados sillares y realizar los imprescindibles andamiages y cimbras. Sin un andamio adecuado no era posible armar el arco y colocar la clave, es decir, la dovela de piedra que "tranca" el arco o bóveda. Otro problema básico lo constituía la extracción del agua para la construcción de las fundaciones dentro de los lechos de los ríos, dado que sólo disponían de primitivas máquinas achicadoras, cuyo rendimiento disminuía al aumentar el caudal de agua con la profundidad.

El histórico **puente de Tiberio**, sobre el río Rubicón, en Rimini, de casi dos mil años de antigüedad, muestra hasta dónde los constructores de puentes respetaban la dignidad de su oficio. En este magnífico puente, terminado en el año 20 d.C., los arcos y también los sillares horizontales de relleno han sido alineados con perfección y precisión ejemplares. El **puente del Gard** (Pont du Gard) es uno de los más espectaculares puentes romanos. Con tres hileras de arcos superpuestos que se levantan a 48 m sobre el río Gard, fue construido en el siglo I a.C. para llevar agua a la ciudad de Nimes desde unos 50 km de distancia. En este puente destacan las piedras que sobresalen del paramento lateral del puente y en el intrados de los arcos, que seguramente servían como ménsulas para el apoyo de las cimbras, que permitían la colocación de las dovelas para armar los arcos.

El muy conocido **Acueducto del Diablo** en Segovia, España, de 750 m de largo y 160 arcos con luces de unos 4,5 m, es otro de los más notables ejemplos de puentes romanos de piedra. La apariencia de gran esbeltez frontal fue lograda por el uso de grandes pilares de planta rectangular. Fue construido en el siglo I d.C. y, en este caso, las enormes piedras talladas que forman los arcos fueron calzadas sin uso de mortero, lo que produce un efecto bellamente tosco, en la impresionante

³ Hans Wittfoht. *Puentes. Ejemplos internacionales*. Gustavo Gili. Barcelona, 1975:17.

⁴ *Pontifex*: fabricante de puentes.

estructura. Éste es uno de los arcaísmos constructivos que ha llevado a algunos expertos a datarlo en la Roma republicana (siglos IV a I a.C.), puesto que, en las obras posteriores, los romanos usaron el mortero de cemento y el hormigón de puzolana.

Con la caída del Imperio Romano se pierde también, progresivamente, la extensa red de carreteras que permitía el desplazamiento de sus ejércitos y la dominación territorial; y, no sólo desapareció el uso del cemento y el hormigón,⁵ sino la construcción de puentes. Solamente, cuando los príncipes y obispos consiguieron nuevo poder, en el siglo XII, aparecieron otra vez puentes de importancia, simultáneamente con la construcción de catedrales y puertas en las murallas de las ciudades. Entre ellos el puente **sobre el Danubio en Ratisbona** (1135-1146) y el **puente Carlos IV sobre el Moldava en Praga**, iniciado en 1348 y terminado 150 años después. Entre 1176 y 1209 se construyó el **primer puente sobre el Támesis**, en Londres, cuyos muchos y amplios pilares actuaban sobre el río como una presa que aceleraba la corriente y realmente afectaba la navegación; luego, en el siglo XVI se construyeron tantas casas sobre el puente que casi lo aplastaron, por lo que en 1824 tuvo que ceder su lugar al segundo, y actual, puente de Londres. Uno de los primeros puentes de arcos aplanados es el muy conocido **Ponte Vecchio** sobre el Arno, en Florencia; terminado en 1345, ha soportado encima de todo: viviendas, talleres de artesanos y un segundo nivel que comunica el **Palazzo Vecchio** con el **Palazzo Pitti**. El **Ponte Degli Scalzi** en Venecia también es una bella bóveda aplanada de gran atrevimiento, máxime si se consideran los esfuerzos que se transmiten a los estribos, apoyados en pilotes de madera anclados en la arena de la laguna, cuya inflexibilidad es lo único que garantiza el equilibrio de las fuerzas en el arco.

Hasta 1666, cuando se fundó la Academia de Ciencias en Francia, los avances de las ciencias –el progreso científico– no repercutía en la práctica de la construcción, que sólo se sustentaba en la experiencia práctica de arquitectos, maestros y operarios, y fundamentalmente en la geometría. La Academia fundada por Colbert⁶ fue la “escuela” de las ciencias que favoreció el desarrollo de proyectos originales en matemática, geometría, astronomía, química, botánica y anatomía. La creciente necesidad de construcción de carreteras y puentes impulsó la creación, en 1720, del famoso **Corps des Ingénieurs des Ponts**

et Chaussées; y, en 1747, Trudaine inaugura en París la **École des Ponts et Chaussées**, la primera gran escuela de ingeniería, muy prestigiosa desde entonces. Durante 50 años fue dirigida por J.R. Perronet (1708-1794), el más importante constructor de puentes de Francia de la época. Su último trabajo fue el **Pont de la Concorde** en París, abierto al tráfico en 1791 (ampliado hasta 35 m de ancho en 1931); tiene 148 m de largo con cinco bóvedas de entre 25 y 31 m de luz. El diseño original de este conocido puente incluía «unos pilares particularmente esbeltos entre los que se tendían unos arcos planos como nunca habían existido hasta entonces», pero intrigas y temores: «La construcción es demasiado atrevida para que pueda garantizarse la estabilidad», obligaron a Perronet a diseñar unos pilares más anchos y macizos y aumentar la altura de las flechas.⁷ «Empezado dos años antes de la Revolución, se terminó con piedra de las ruinas de la Bastilla, y tuvo entre sus primeros usuarios a las turbas que se reunieron para asistir a la ejecución de Luis XVI en la cercana Place de la Concorde».⁸ Cien años más tarde un nuevo material, el concreto armado, permitiría luces ni siquiera soñadas entonces.

LOS PUENTES DE HIERRO

A finales del siglo XVIII la familia Darby, en Coalbrookdale, en el valle del Severn en Inglaterra, era bien conocida por la producción de hierro colado. Los Darby usaban un residuo de carbón (coque),⁹ en lugar de la madera en el proceso de fundición. El hierro colado será usado por primera vez en la construcción de puentes por Abraham Darby II, en 1779, en la construcción del famoso **puente Iron Bridge sobre el Severn**. Para ese momento la escasez de madera hacía prever al hierro como una innovación importante en la construcción de puentes y, en Coalbrookdale, ya estaba sustituyendo a la mampostería. Una

Foto 1
Acueducto del diablo. Segovia, España



Foto 2
Ponte Degli Scalzi, Italia



⁵ Desde la caída del Imperio, en el siglo V, hasta mediados del siglo XVIII, el uso del cemento y el hormigón prácticamente desapareció. Reaparecerá en 1824 cuando Joseph Aspdin usó por primera vez el cemento Portland, llamado así por su parecido con la piedra Portland, muy usada en Inglaterra en la construcción.

⁶ Jean Baptiste Colbert (1619-1683), uno de los más importantes ministros de Luis XVI, fundó también el Observatorio y tuvo decisiva influencia en el desarrollo del comercio y la industria de Francia. En 1669 fue nombrado Secretario de Estado de Marina, e impulsa la construcción de una red de canales y carreteras, así como el mejoramiento de los puertos.

⁷ Wittfoht: 33,34.

⁸ T. K. Derry y I. Williams *Historia de la tecnología. Desde 1750 hasta 1900 (1)*. Siglo XXI editores. 1990: 654.

⁹ Residuo de calcinación de la hulla para producir gas.

vez terminado el puente sus ventajas resultaron obvias pues las secciones de hierro colado eran largas (de 21 m) y autoportantes, formando un arco próximo al semicírculo, lo que permitió montar el puente muy rápidamente por medio de cuñas, sin tornillos ni remaches, y con un mínimo de interrupción del tráfico fluvial. La promesa del hierro como un efectivo material para construir puentes quedó demostrada cuando ese puente fue el único, a lo largo del río Severn, en sobrevivir a la enorme creciente de 1795. El *Iron Bridge* fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la Unesco, y todavía es usado para el paso de peatones. Algunos historiadores lo han mencionado como la **primera obra de construcción high-tech**.

La construcción de puentes progresará por los avances en la construcción de las fundaciones debido especialmente a la invención del **martillo pilón o ariete hidráulico**, en 1839, por James Nasmyth, que mecanizó la hincada de pilotes; y el uso de **cajones neumáticos**, introducidos por Sir Thomas Cochrane en 1830, para construir cimientos en terrenos pantanosos o dentro del agua. Esta técnica consistía en bombear aire comprimido dentro de un cajón metálico que se iba hundiendo en el lecho del río mientras se sacaba la tierra a través de una esclusa de aire en el techo del cajón. Cuando el cajón avanzaba hacia abajo se agregaban nuevas secciones para mantener el techo y la esclusa por encima del nivel de las aguas; de esta manera los cimientos se construían de arriba hacia abajo. El trabajo en ambiente de aire comprimido, sin embargo, era altamente riesgoso pues originaba la llamada "enfermedad del cajón" o aeropatía, que afectaba también a los buzos y submarinistas, por los efectos de la rápida descompresión y la formación de burbujas de nitrógeno en los tejidos. Esta alteración fisiológica no fue aclarada y prevenida sino hasta el inicio del siglo XX.¹⁰

Foto 3
Puente Iron Bridge, Coalbrookdale



Foto 4
Viejo puente en cantiliver, Pakistán



El **puente tubular Britannia** de Robert Stephenson,¹¹ sobre el estrecho de Menai, construido entre 1846 y 1850, es notable por el uso de pares de enormes tubos rectangulares de hierro forjado (vigas de cajón), que atravesaban las vías del ferrocarril. Las vigas tubulares fueron diseñadas en asociación con Fairbairny (constructor de barcos), y con Eaton Hodgkinson (de la Royal Society) estudioso de la resistencia de los materiales. La luz de 141 m era realmente insólita para el momento y las vigas estaban formadas por planchas de hierro forjado, remachadas como en las calderas de los barcos, las cuales fueron puestas a flote sobre pontones y elevadas a su posición por gatos hidráulicos colocados cerca de lo alto de las torres de apoyo, lo que constituyó una innovación constructiva sensacional. El alto peso y costo de este tipo de solución llevó a una evolución en el diseño de puentes y a la adopción de armazones de vigas de celosías de hierro, o cerchas, mucho más livianas.

El **puente Royal Albert** (1854-1859), sobre el Tamar en Saltash (GB), de Isambard Kingdom Brunel, muestra una forma de puente de las más originales, en el que se combinan arcos tubulares formando un ovoide, con cadenas de tensión para soportar el tablero. Entre 1854 y 1859 Robert Stephenson construye el **Puente Victoria** sobre el río San Lorenzo en Montreal; se trata del puente tubular metálico más largo, con 2.740 m de longitud. Y, en 1860, Gustave Eiffel termina el puente de ferrocarril *La Passarelle*, en Burdeos, de 500 m de largo, formado por tramos de 77 metros.

LOS PRIMEROS PUENTES EN VOLADIZO

Los puentes en voladizo o *cantiliver* se asocian a las técnicas de construcción contemporáneas, pero desde tiempos remotos se construían puentes en voladizo para reducir la luz central, con troncos superpuestos, empujados por un extremo en muros de piedra. La misma técnica de construcción en voladizo, partiendo de las orillas del espacio cóncavo hacia el centro, no era aplicable a las construcciones en piedra, pero evolucionó y se desarrolló con los nuevos materiales: el acero y el concreto.

La técnica de construcción de arcos en voladizo fue usada por Eiffel en 1884 cuando completa el **viaducto de Gabarit**, con un arco sobre el río Truyere de 165 m de luz, una longitud total de 755 m y una altura de 112,5 m, para el momento el más alto del mundo; y, en 1885 con T. Seyrig, termina el llamativo **puente Don Luis** sobre el río Duoro, en Oporto, de 170 m de luz, con dos tableros, uno superior apoyado sobre el arco y otro inferior suspendido, que además trabaja como tensor del arco.

¹⁰ Derry y Williams: 660,661.

¹¹ Robert Stephenson y su padre George Stephenson fueron los constructores, en 1929, de la famosa locomotora *Rocket*, con caldera tubular de agua y transmisión directa entre el pistón y las ruedas motrices.

A fines de los años 1880, la compañía North British Railway decidió eliminar el paso de ferry, a través de los estuarios conocidos como Firth of Tay y Firth of Forth, en Escocia, mediante la construcción de dos puentes. El **puente sobre el Tay**, en Dundee, fue completado primero en 1878; era una larga y sinuosa estructura con cerchas altas que llegaban hasta unos 78 metros de luz sobre el canal principal de navegación. A finales de 1879, las cerchas se derrumbaron durante una violenta tormenta y el tren, que avanzaba en medio de la noche, se precipitó súbitamente al vacío matando 78 personas. La fuerza del viento sobre una estructura relativamente liviana y los efectos dinámicos del paso del tren, así como el hallazgo de que las columnas estaban hechas de fundiciones de menor calidad y llenas de huecos, se señalaron como causa del terrible accidente.¹²

Sir John Fowler, un reputado ingeniero, conjuntamente con su joven asistente el ingeniero Benjamin Baker, asumirá la responsabilidad de diseñar el **puente sobre el Firth of Forth**. Habida cuenta del accidente del Tay, proponen un enorme puente de tres tramos construidos en cantiliver, desde ambos extremos, para unirse en el centro. Entre 1882 y 1889 se usaron 50.000 toneladas de acero en la construcción de ese puente que, con sus dos luces principales de 521 metros, será el primer gran puente de ferrocarril construido con la técnica de construcción en voladizo. En 1889 también se inauguró, durante la exposición mundial de París, la famosa torre del Trocadero de 300 m de altura, de Gustave Eiffel. La **Tour Eiffel** fue considerada por muchos como la estructura más espectacular de la época, a pesar de las críticas bien conocidas que recibió. Sin embargo, en los dos tramos mayores del **puente Firth of Forth** se inscriben completamente cuatro torres Eiffel, lo que da una idea de la magnitud de esta estructura no tan conocida, ni reconocida, como la famosa torre de París.¹³

El éxito de la técnica de construcción en voladizo produjo muchos imitadores, y para finales del siglo XIX un puente en **cantiliver** era el ideal de ingenieros, constructores y vendedores de puentes. El segundo puente sobre el Támesis, el **London Tower Bridge**, terminado en 1894, con luz de 76 metros, no muestra la apariencia de haber sido construido en cantiliver, como lo fue la estructura superior, en tanto que sus dos rampas laterales metálicas levadizas eran operadas por bombas hidráulicas a vapor. El **puente sobre el río San Lorenzo** en Quebec, se diseñó con vigas en voladizo mayores que las del Firth of Forth; pero, en agosto de 1907, cuando la construcción del brazo sur del puente había alcanzado un volado de unos 180 metros sobre el río, colapsó repentinamente debido al pandeo de una viga de compresión, causando la muerte de 82 trabajadores. En 1916, luego de corregidas las fallas y de efectuar mejoras en la construcción, el segundo intento de montaje fracasó también al derrumbarse la viga de equilibrio central de 4.170 toneladas, en el momento en que se izaba desde un barco, cayendo al río y causando la muerte de otros 13 trabajadores. A pesar de todo, el puente se completó en el tercer intento en 1917, y su luz de 549 metros era todavía la mayor para un puente en voladizo, a fines del siglo XX.

El **puente sobre la bahía de Sydney**, emblema de la ciudad, de 495 m de luz, inaugurado en 1932, fue la más grande estructura de acero remachada jamás construida, se trata también de un puente construido en cantiliver. Sin embargo el **puente Bayonne** sobre el Kill van Kull, que une Staten Island con New Jersey, en Nueva York, iniciado cinco años más tarde y terminado cuatro meses antes, lo superó por un metro. El puente sobre el Misisipi, en Nueva Orleans, de cerchas altas (de entramado), con una luz central de 480 m, fue inaugurado en 1958,

Foto 5
Puente del ferrocarril del Firth of Forth

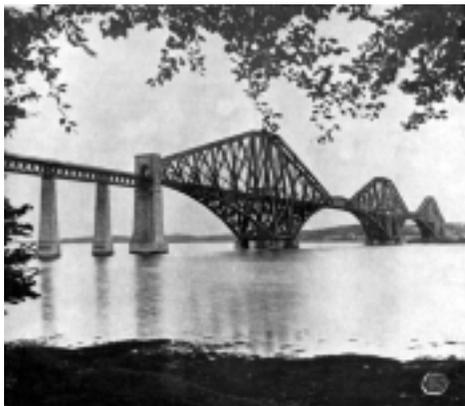


Foto 6
Puente Firth of Forth. comparación con la Torre Eiffel

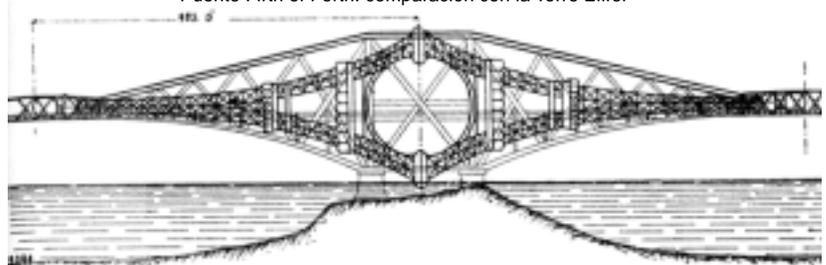


Foto 7
Puente Bayonne sobre el Kill van Kull, New York



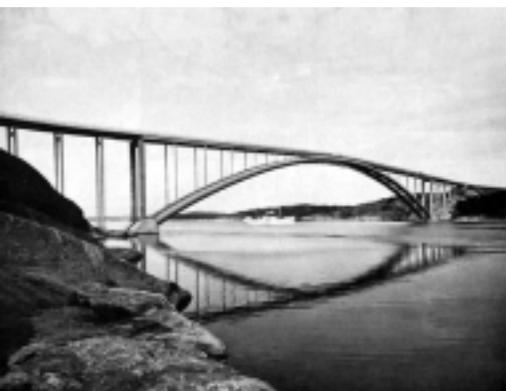
¹² L. T. C. Rolt. *Victorian Engineering*. Penguin Books, 1970: 190,191.

¹³ H. Petroski. *Invention by Design. How Engineers Get from Thought to Thing*. Harvard University Press, 1997: 170,171.

después de sólo tres años de iniciada su construcción. El tramo central incluye una viga suspendida de 210 m, de modo que el sistema queda determinado estáticamente, a fin de no originar tensiones en el entramado por eventuales asentamientos diferenciales en los apoyos. La belleza del arco con tablero superpuesto es evidente en el **punto Glen Canyon sobre el Colorado**, con luz entre arranques de 308 m y altura de 204 m, terminado en 1958, construido en cantiliver, usando tensores desde las torres laterales de apoyo del teleférico de montaje de las vigas y el tablero. El **punto sobre el fiordo Askerö**, en Suecia, terminado en 1970, es una transparente estructura de doble sección tubular como el Firth of Forth, construida también en cantiliver desde los dos lados, con los volados suspendidos transitoriamente por cables hasta cerrar el arco. El puente de arco metálico más largo del mundo es el **New River Gorge Bridge**, en West Virginia, de 518 m de largo, terminado en 1977.

Foto 8

Puente de arco tubular sobre el Askerö, Suecia



DEL REMACHE A LA SOLDADURA

El incremento progresivo de la calidad del acero condujo a su uso creciente, a pesar de los muchos fracasos menores, e incluso algunos mayores, que conllevó su utilización en los primeros años. El ensamblaje de las chapas de acero para formar perfiles y sus uniones mediante remaches, cons-

tituyeron siempre un problema, que originó muchas investigaciones para medir el efecto conjunto de la enorme cantidad de remaches usados en cada obra. Sin embargo, el acero tiene buena capacidad de deformabilidad plástica y de allí su adaptabilidad ante pequeñas variaciones dimensionales. La llegada de la soldadura¹⁴ resolvió muchos problemas pero creó otros, relacionados con los efectos de las altas temperaturas, que generaban deformaciones en las zonas próximas a los puntos de soldadura. Esto produce tensiones locales, que no siempre son compensadas por la deformabilidad del acero y se suman a las tensiones provocadas por las cargas. También podía tornarse quebradizo, al perder su "tenacidad" alrededor del punto de soldadura; posteriormente, a raíz de los accidentes ocurridos, se logró desarrollar aceros de muy alta calidad que hoy en día permiten soldadura sin mayores riesgos.

El extraordinario **derrumbe del puente Duplessis** el 31 de enero de 1951, en la vía Montreal-Quebec, se atribuye a un acero de baja calidad sensible al frío. Ocurrió a las tres de la madrugada, con una temperatura de 34°C bajo cero, cuando se derrumbaron cuatro de los ocho tramos del puente

de 420 m de largo. Ya en el invierno del año precedente se habían detectado y reparado grietas en la soldadura del cordón superior, por lo que hubo de sustituirse tramos defectuosos y reforzarse provisionalmente los puntos de unión sometidos a tracción, mediante chapas remachadas. Apenas dos semanas antes del accidente se había inspeccionado cuidadosamente el puente sin descubrirse nada sospechoso. «La rotura espontánea, sin previo aviso, es un privilegio de los materiales frágiles, o que se han vuelto frágiles, ¡una pesadilla del ingeniero! Después de terminar un puente con éxito, su destrucción la provocan principalmente cargas imprevistas o incalculables cataclismos».¹⁵

Además de las crecientes de los ríos, el viento ha sido también un gran enemigo de los puentes. Es histórico el dramático derrumbe (que he mencionado antes) del gran puente de ferrocarril sobre el Firth of Tay, en Dundee (Escocia), en 1879, cuando un tren que avanzaba de noche, en medio de una tormenta, se precipitó al vacío con todos sus pasajeros, pues el puente ya no estaba en su sitio. Y más adelante veremos cómo la carga dinámica de los vientos afecta de manera determinante el diseño y construcción de los puentes colgantes.

PUNTES DE HORMIGÓN Y DE HORMIGÓN ARMADO

Como se anotó antes, junto con el derrumbe del Imperio Romano desapareció el uso del cemento por catorce siglos, hasta que, en 1824, Joseph Apsdin inventó el cemento Portland. El cemento se obtendrá ahora calcinando una mezcla de yeso y arcilla a muy alta temperatura, para aglutinar las partículas sin que lleguen a fundirse; y permitirá un hormigón (o concreto) mucho más resistente que el preparado con cal, y que el usado por los romanos a partir de la puzolana. Aunque el uso del concreto armado es posterior, en el siglo XVIII ya se usaba el hierro forjado como refuerzo en la mampostería, tal es el caso del Panteón, en París, en el que Soufflot reforzó la mampostería con barras de hierro para evitar agrietamientos por la presión de la cúpula. Pero, al perfeccionarse el horno giratorio para la producción de cemento y aparecer la hormigonera (mezcladora) de vapor, este concreto, que fragua más rápido que los producidos con cal, se impuso definitivamente. Monier, que descubrió el concreto armado fabricando, en 1849, potes para plantas de naranjas, posteriormente obtuvo varias patentes, incluso una para vigas de concreto armado. El concreto y luego el concreto armado siguieron al acero medio siglo después. Sin embargo, la construcción de puentes de concreto encontró obstáculos al principio, debido a la calidad de los cementos y a los escasos conocimientos sobre el comportamiento y resistencia del material. De hecho, la llegada del cemento ayudó a un **revival** de los puentes de piedra en competencia con el material del momento que era el acero, pues el cemento permitió mejorar, durante un tiempo más, las técnicas de construcción de puentes de mampostería de piedra.

¹⁴ Los primeros ensayos de soldadura de arco fueron efectuados por Elisha Thompson, en Filadelfia, en 1877.

¹⁵ Wittfoht: 54-57.

Los primeros puentes de concreto armado datan de 1894 en adelante; al principio siguieron la forma de los puentes de piedra: un tablero construido sobre uno o más arcos de concreto. En los puentes de piedra se requería otro puente previo que fungiera de cimbra y encofrado; pero, el concreto permitió aumentar los esfuerzos admisibles, debido a la supresión de las juntas (entre los bloques de piedra) y, por consiguiente, se lograron luces mayores. Con la llegada del concreto armado se pudieron absorber localmente los esfuerzos de tracción y entonces fue posible reducir la sección de los arcos; de esta manera, con esta nueva tecnología, un gran número de arcos de gran luz fueron ejecutados en el período entre las dos guerras mundiales.

El primer puente de concreto armado fue construido por François Hennebique en la ruta del ferrocarril en Vigggen (Suiza), en 1894; y, en 1899 termina el **puente sobre el Viena** en la ruta a Chaterellault, con tres arcos de 50 m de luz. El **puente de ferrocarril en Langwies**, Suiza, terminado en 1914, es un notable ejemplo de los puentes de arco de concreto armado y de la obra de ingeniería del andamiaje necesario para su construcción. El **puente del Risorgimento**, sobre el Tiber en Roma (1911), construido también por Hennebique, es el primer puente de concreto armado que alcanza la luz de 100 m, donde incorpora por primera vez «una sección hueca cerrada de cajón». Se trata del nacimiento del **arco de cascarón** (o de cajón), que será un importante elemento constructivo de la siguiente época. El ingeniero Suizo Robert Maillart será el primero en conjugar, en toda su dimensión, la combinación de configuración y estructura en la construcción de puentes, en los que no utiliza vigas, nervios y entramados sino placas, láminas y cascarones.

ANDAMIAJES Y CONCRETO PRECOMPRESO

Desde los tiempos antiguos hasta la Revolución Industrial, prevaleció una larga historia de puentes de madera y piedra. Pero, los puentes de madera no sólo tienen su propia historia sino otra asociada a los puentes de piedra (y posteriormente a los primeros de concreto), pues un primer puente de madera era necesario (la cimbra o falsa obra) como estructura portante provisional, para poder erigir el puente de piedra. La cimbra llegó a ser una obra tan importante e impresionante como el propio puente, lo que equivalía en la práctica a construir dos puentes. Esta paradoja tecnológica será la impulsora de prácticamente todas las innovaciones constructivas en puentes, es decir, la búsqueda de suprimir la necesidad de construcción del primero de los dos puentes.

La construcción de puentes y viaductos de mampostería de piedra, inspirados en los puentes romanos, llega hasta el siglo XIX; pero, con

la llegada del ferrocarril y más tarde con la construcción de autopistas los puentes tienen que vencer luces cada vez mayores. Alrededor de 1850 se construyó el **puente de ferrocarril sobre el valle de Göltsh** (Sajonia), que tiene casi 600 m de longitud y unos 80 m de altura. Sus robustos pilares rectangulares se ensanchan gradualmente hacia abajo y están arriostros mediante arcos planos; la luz central es de 31 m. Más impresionante y majestuoso es el **puente de ferrocarril sobre el Inn**, en Cinuska (Engadine, Suiza), con un atrevido arco de piedra que supera el desfiladero.

Pero, si estos puentes de piedra son hermosos y audaces, pensemos en las fantásticas formas, entramados y dimensiones que debieron tener las cimbras de madera, con las que fueron soportados y alineados los sillares o dovelas con las que se armaba el arco, antes de colocar las claves de piedra que lo conformaban definitivamente. Aunque las cimbras eran en sí mismas verdaderas obras de arte, no queda ningún testimonio de ellas, pues todavía la fotografía no había sido inventada. Además, como la cimbra es otro puente que generalmente, debe salvar la misma luz del que va a ayudar a armar, una vez cumplida su tarea debe ser desmontada o derrumbada con gran cuidado, para que se efectúe la transferencia de las fuerzas, sin perjudicar la estabilidad del puente, evitando empujes laterales que pudieran ser ocasionados por el retiro no uniforme de la armazón, y en tal forma lograr el asentamiento sincronizado y definitivo de los arcos.

De tal manera que en los grandes puentes de arcos de piedra, y después en los de hormigón vaciados con andamiajes de madera, los carpinteros de cimbras fueron verdaderos artesanos, en la práctica arriesgados maromeros; y, quizás fueron los verdaderos e ignorados artífices de los grandes puentes. Mi padre, cuya profesión original era la de carpintero naval, decía que los artesanos de las cimbras de madera de los viejos puentes «lloraban a moco tendido, pero con gran emoción» el derrumbe de sus obras maestras. En verdad, las cimbras, y luego los encofrados en puentes y viaductos de concreto, eran unas verdaderas obras de arte efímeras. Un ejemplo impresionante de lo dicho, es el **puente del Salginatobel** en Chiers (Grisones), cons-

Foto 9
Puente Salginatobel en Grisones

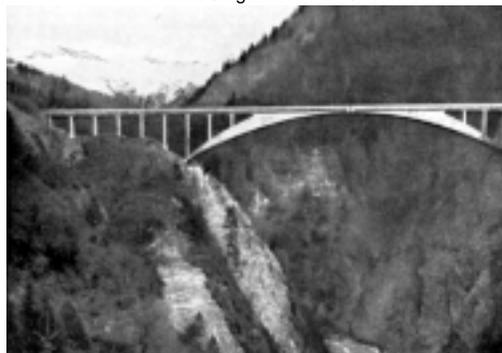
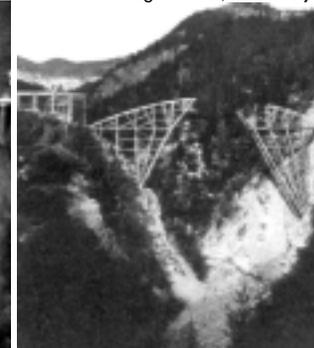


Foto 10
Puente Salginatobel, andamiaje



truido entre 1929 y 1930, de 90 m de luz, cuyo espectacular andamiaje fue obra del ingeniero Coray.¹⁶

Entre 1928 y 1930, Eugène Freyssinet pone a punto la técnica del **concreto precomprimido**, a partir del cual se desarrollará la tecnología fundamental de todos los puentes modernos con base en el hormigón. Freyssinet desarrolló el precomprimido a partir de los estudios realizados para el descimbrado de sus arcos, que como hemos dicho antes, era una operación que requería experticia y cuidados extremos. Su primera obra atrevida es el **puente de Saint-Pierre-du-Vaubrey**, sobre el Sena, terminado en 1923, formado por arcos gemelos de cajón empotrados, con tablero suspendido. El andamiaje era una verdadera obra de ingeniería en madera, formada por un arco de entramados apoyado sobre puntales colocados en abanico, con enrejados de madera. Durante el proceso de vaciado de concreto el andamiaje falló, bajo una tempestad con fuertes vientos, precipitándose al río y provocando muertos y heridos. Pero Freyssinet no se amilanó, reconstruyó y reforzó la notable cimbra y completó el puente.¹⁷

mediante un tirante que puede regularse en los extremos con prensas hidráulicas». ¹⁸ El espectacular arco de andamiaje será usado en el vaciado de los tres arcos del puente, el cual se convertirá en su *opera prima* y le valdrá reconocimientos por doquier. Los **viaductos de la autopista Caracas-La Guaira**, en Venezuela, terminados en 1952, de 150 m de luz, fueron también proyectados por Freyssinet y construidos por la empresa francesa Campenon-Bernard. El desarrollo de nuevos métodos de construcción y de organización de las obras, así como nuevos equipos de construcción, después de la terminación de la Segunda Guerra Mundial, en 1945, y por supuesto la reconstrucción, contribuyeron al enorme éxito en la construcción de puentes, viaductos y vías elevadas con base en el concreto pretensado.

NUEVAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS: MOLDES Y PUENTES DESLIZANTES

A partir de los años cincuenta las innovaciones tecnológicas en la construcción de puentes estarán guiadas por la necesidad de eliminar las cimbras y andamiajes, que implicaban la construcción previa de "un puente" para poder construir "el puente". No sólo era el costo de los materiales insumidos y mayoritariamente perdidos, particularmente grandes volúmenes de madera, sino la mano de obra costosa y subutilizada, especialmente de carpinteros, en obras que debían ser destruidas luego de cumplir su función de estructura provisional. De esta manera se regresa a las antiguas formas, de las técnicas primitivas o artesanales, de construcción en cantiliver y de puentes suspendidos y colgantes.

El primer gran avance se produce en 1950, con la construcción de autopistas en Alemania, y la construcción de puentes en voladizo, cuando se inventa la técnica de construcción de **puentes en cantiliver mediante dovelas prefabricadas**, lo que permitió eliminar las costosas cimbras y encofrados que, aunque espectacular-

Foto 11
Puente sobre el Elorn, Francia



Foto 12
Puente sobre el Elorn, Francia. Andamiaje usado en los tres arcos



Con el **puente sobre el Elorn** en Plougastel, en el norte de Francia, construido por la firma Limousin entre 1926 y 1930, Freyssinet supera todos los retos. Está formado por tres arcos idénticos de 186,4 m de luz, de cajones huecos, vaciados con un arco de encofrado autoportante, que en sí era «una obra maestra –equivalente a la estructura de la propia obra permanente y en último término base del éxito frente a los competidores. El arco de andamiaje utiliza "solamente" 200 m³ de madera. Se monta en la orilla de Plougastel y el 2 de abril de 1928 se transporta por flotación hacia la primera abertura del arco, con ayuda de dos pontones de hormigón armado y aprovechando la marea alta. Los dos arranques del arco de andamiaje están unidos

Foto 13
Puente Loira en cantiliver



Foto 14
Puente Loira, colocación de dovelas prefabricadas



¹⁶ Wittfoht: 119-121.

¹⁷ Wittfoht: 125.

¹⁸ Wittfoht: 127,128.

res, ya para esa época eran inviables económicamente. Las formas obtenidas con el uso de dovelas son paradójicamente más próximas a las de los puentes de cajón de acero soldado que a las de los puentes en concreto armado.¹⁹ Más tarde esta técnica evoluciona con el uso de *encofrados deslizantes* –la técnica de la “regla de cálculo”– en los que la “regleta” avanza para alcanzar el apoyo siguiente y luego el cuerpo principal, con el encofrado deslizante avanza para “extruir” la viga-tablero tipo cajón, mientras el concreto es bombeado desde la parte terminada del puente. El uso más frecuente de esta tecnología es una combinación en la que la técnica del encofrado deslizante se utiliza para construir en cantiliver.

Si estaba en uso la tecnología de encofrados o moldes deslizantes, en la que se mueve la planta de producción –el equipo de encofrado, y de preparación y bombeado de concreto– sobre la estructura que se está vaciando, es lógico que también se haya pensado en dejar la planta fija en el sitio y mover todo el tablero del puente. Ésta es la técnica del *puente deslizante*, en la que el tablero, generalmente en forma de viga de cajón, se construye en una de las orillas en toda su longitud, ya sea ensamblando dovelas prefabricadas o mediante vaciado de concreto con un encofrado deslizante, y luego es desplazado sobre los apoyos, previamente construidos, empujándolo mediante gatos hidráulicos. La descripción es sencilla, pero la técnica de empuje y deslizamiento es, por supuesto, más compleja. Un ejemplo cercano de esta técnica es la de la construcción del *puente sobre el Caroní*, al sur de Venezuela, de 600 m de luz, armado mediante dovelas prefabricadas en una orilla del río y luego “lanzado” sobre las pilas de apoyo. Estas técnicas, junto a las de prefabricación mediante el uso de grandes *vigas pretensadas prefabricadas de concreto*, se continúan usando, en distintas formas y combinaciones, para la construcción de grandes puentes y vías elevadas en todos los rincones del mundo.

LOS PUENTES COLGANTES

Como se ha señalado, la búsqueda de eliminación de las cimbras ha sido la energía que ha impulsado, desde tiempos inmemoriales, las innovaciones en la construcción de

puentes y el uso de puentes suspendidos o colgantes. Los primeros *puentes colgantes* no fueron construidos ni en Europa ni en América, sino en las provincias limítrofes entre China y Tíbet, donde ancestralmente, debido a la accidentada geografía, se usaban fibras vegetales, como el cáñamo, para fabricar cuerdas con las que se fabricaban puentes sobre ríos y desfiladeros. También en el interior de Asia se usaron, desde antiguo, cadenas de hierro como soportes colgantes. Relatos de exploradores, como el geógrafo Rennell, en 1783, dan cuenta de puentes colgantes de hierro con tablero de madera. En 1871, Richthofen (*Tagebücher aus China*, Berlín, 1907) cruzó durante su viaje por China seis puentes colgantes de hierro, de cadenas, de cables o de barras redondas de hierro forjado. En una de sus referencias anotó un tipo de construcción distinta. «Consta de cadenas tensadas en cuya parte inferior se han fijado armazones de hierro con la pasarela de tablas, de forma que el puente está aquí suspendido de las cadenas».

La referencia más antigua proviene del libro *China ilustrada* del cura jesuita A. Kircherius (Amsterdam, 1667) donde se indica: «El puente [en la provincia de Yunnan] fue construido con cadenas de hierro fijadas a los montes de ambos lados mediante ganchos y argollas, cubriéndolos con cadenas. Se compone de 20 cadenas, cada una de las cuales tiene una longitud de 300 palmos (aprox. 64 m). Cuando se cruzan varias personas simultáneamente, el puente oscila y se balancea».²⁰ El puente colgante tendido sobre el profundo valle del río Tatu, entre China y el Tíbet, fue terminado en 1706. Este puente es descrito por Robert Paine en su libro *Mao Tse Tung, Ruler of Red China*, al mencionar el dramático paso del ejército rojo, en mayo de 1935, para escapar de la tenaza tendida por las tropas del Koumintang, evitando su aniquilamiento. «Están fijados a la roca nueve potentes cables de hierro fundidos con fuego de leña, cada uno con más de trescientos pies de longitud; sobre los cables se han tendido tablonces de madera; las barandillas consisten en cadenas. El puente está junto a la población de Lutingchiao, que significa “ciudad con el puente de hierro”. Existe un curioso paralelismo con el puente de hierro más antiguo de Europa, del año 1779, sobre el Severn en Broseley (Inglaterra), que dio origen a la ciudad “Ironbridge”».²¹

Foto 15
Andamaje deslizante



Foto 16
Viaducto Semorile, puente deslizante



Foto 17
Puente deslizante del Caroní, Venezuela



¹⁹ *Architecture d'Ingenieurs, XIXe-XXIe siècles*. Centre Georges Pompidou, CCI n° 8. París.

²⁰ Wittfoht: 66.

²¹ El puente en referencia es el A. Darby en Coalbrookdale.

En realidad, *puentes colgantes de cadenas* de suspensión de eslabones fueron muy usados en Norteamérica durante los primeros años del siglo pasado, como el **punto de James Finley sobre Jacob's Creek**, Pensilvania (1797). Sir Samuel Brown patentó las cadenas de suspensión de hierro forjado, y fue el diseñador de dos **puentes colgantes sobre el Tweed**, en Escocia; otro fue el **punto de Berwick**, con una luz de 137 metros, que fuera destruido a los seis meses de terminado. El sistema de cadena de eslabones fue adoptado por Telford²² para construir, entre 1818 Y 1826, el famoso **punto sobre el estrecho de Menai** (Gales), de 177 metros de longitud, cuyo tablero de madera colgaba de 16 cadenas de hierro forjado; pero, resultó demasiado liviano y fue derribado por una tormenta trece años después; sin embargo, una vez reconstruido, el mismo punto, con sus cadenas de hierro originales, soportó el tráfico rodado de Anglesey hasta 1939, pues en 1940 las cadenas se sustituyeron por otras nuevas.²³

Johann Roebling, en 1841, inventa e introduce el **cable de alambres trenzados**, diseña y reconstruye en 1849 un **punto colgante sobre el río Ohio** en Wheeling, West Virginia (EE UU), de 308 metros de luz; el anterior había sido construido por Charles Ellet, de la École Polytechnique de París, y destruido por una tormenta cuatro años después de terminado. El punto de Roebling será el primer punto colgante de cables construido en el mundo, y todavía aguanta.²⁴ La técnica del punto colgante logra su máximo avance cuando, en 1841, el mismo Roebling patenta otro tipo cable, en el que los alambres en lugar de trenzados eran colocados separadamente en paralelo, y luego atados a su vez con alambre, es decir, una innovación basada en una obvia simplificación del cable trenzado.²⁵ Este tipo de cable se utilizó por primera vez, en gran escala, en 1855 en el **punto del Gran Trunk**, sobre la garganta de Niágara, el primer punto colgante del mundo para ferrocarril, con la por entonces inaudita luz (para un punto de ferrocarril) de 250 metros. Construido de alambre y madera, soportó el peso (y el paso) de trenes y locomotoras durante 42 años, hasta que fue sustituido en 1897 por

Foto 18
Punto Brooklyn, New York



Foto 19
Punto Golden Gate. San Francisco, EE UU



un punto de arco de acero. Posteriormente, en 1867, Roebling construye otro **punto colgante en Cincinnati** (EE UU), también sobre el río Ohio, con una luz de 328 m, un nuevo récord mundial.

Roebling coronó su vida profesional con el proyecto del famoso **punto colgante de Brooklyn** en Nueva York (luzes: 285+486+285 metros). Proyecta las hermosas torres de caliza y granito, con aberturas ojivales, contrafuertes retranqueados y una cornisa de coronación que oculta el paso de los cables principales y el anclaje de los atirantados.²⁶ Asimismo, se construye sobre el tablero principal un magnífico paseo superior peatonal de madera, que hoy es usado por viandantes y ciclistas, ofreciendo vistas espectaculares de la renovada zona sur de Manhattan. Pero Roebling murió de tétanos en 1869, a consecuencia de un accidente durante los trabajos preliminares del punto, y no vio su obra magna terminada. El punto fue en realidad construido por su hijo mayor Washington Roebling, quien también se enfermó gravemente y quedó paralizado como resultado de una aeropatía (la enfermedad de Caisson), que afectaba con cierta frecuencia a quienes trabajaban en el interior de los cajones de cimentación, en ambiente de aire comprimido. El punto fue inaugurado por el presidente Chester Arthur el 24 de mayo de 1883 y durante mucho tiempo se le consideró como la octava maravilla del mundo.

El mismo método de construcción fue utilizado por Othmar Altmann en el **punto George Washington** sobre el río Hudson, de 1.067 metros de luz y 65 m sobre el río, construido entre 1927 y 1931 en Nueva York. El nivel superior tiene seis canales y dos pasos peatonales, y el nivel inferior, completado en 1962, seis canales adicionales. Importantes avances en la construcción de puntos colgantes se producirán progresivamente, y puntos de muy grandes luces se construirán desde entonces, uno de los más famosos y hermosos será el **Golden Gate Bridge**, en San Francisco de California que,

²² Thomas Telford (escocés), que posteriormente adquirió gran fama como constructor de puntos, canales y puertos, era originalmente peón de albañil, y desarrolló un método de pavimentación parecido al de P. M. Trésaguet, perfeccionado luego por J.L. Mac Adam, que dará origen al *macadam*.

²³ Derry y Williams: 658.

²⁴ La siguiente anécdota dice mucho. En el mismo año de 1849 Robert Stephenson construía el punto Britannia. Tuvo conocimiento de lo que hacía Roebling en Ohio y le escribió: «Si su punto llega a ser una realidad, entonces mi obra no vale nada».

²⁵ Es evidente que el trenzado de alambres para formar los tendones con los que se armaban cables de gran diámetro, como los que se requieren para puntos colgantes de gran luz (para la época), como el de Niágara o el posterior de Brooklyn, era de una enorme complejidad, por lo que colocar los alambres en paralelo no sólo aumentó la resistencia, sino simplificó el ensamblaje de los cables en sitio.

²⁶ J. A. Fernández Ordóñez, "Tres puntos, tres ciudades". *Informes de la Construcción*, Vol. 50, N° 456,457. 1988: 57-59.

con sus 1.280 metros de luz, era el mayor del mundo en 1950. Será la primera vez que la pila de un puente (la pila sur), de unas 147.600 ton de concreto, emerge desnuda en 30,5 m de mar abierto. Ello fue posible por la defensa de concreto que es en sí una maravilla de construcción. Esta gran "funda" tiene 91 m de largo por 47 m de ancho, y se extiende 30 m por debajo y 4,5 m por arriba del agua del Pacífico; requirió unas 152.600 ton de concreto, y fue construida para facilitar la construcción de la pila y protegerla de marejadas violentas. El agua de mar penetra en el espacio entre la defensa y la pila, para contrabalancear la presión sobre la defensa.

El **puente Verrazano Narrows** con 1.298 metros de luz (370+1.298+370), que une a Brooklin con Staten Island en Nueva York, fue completado en 1964 y para ese momento era el más largo del mundo, con dos torres de 70 pisos de altura (220 m sobre el nivel medio del agua). En este puente se emplearon cuatro cables, dos de cada lado, formados con alambres de acero de alta resistencia, paralelos, estirados en frío, de 5 mm de diámetro. Cada cable tiene un diámetro de 91,5 cm y puede soportar tensiones de hasta 100.000 toneladas métricas. El puente George Washington está soportado por cuatro cables de este tipo, mientras que el Golden Gate está colgado de sólo dos cables de 92,5 cm de diámetro cada uno.

El tendido de los cables de suspensión de un puente colgante es una laboriosa y acrobática tarea que se debe realizar a la perfección, pues se trata de una operación también colgante. Primeramente se construyen las pasarelas o andenes de trabajo aéreo (*catwalk*), sobre los cuales se realizará el tendido y amarrado de los cordones de alambres que formarán cada cable.²⁷ La tarea de construir el andén es la primera tarea compleja y se realiza pasando de una torre a otra cables cada vez más resistentes hasta poder construir sobre ellos el tablero de cada andén. Una vez construido este dispositivo se arman los cordones, alambre por alambre, y son fijados uno por uno en los artefactos metálicos empotrados en los bloques de anclaje en cada extremo del puente, luego se amarran para formar cada cable, y se procede al tensado. Otro tiempo importante es insumido en la colocación y ajuste de las abrazaderas y cables de suspensión.

En el puente de Verrazano Narrows, de dos niveles, la confección de los cuatro cables principales tardó 15 meses, luego se inició el montaje del tablero en los vanos laterales, avanzando desde los anclajes hacia el centro. Tras el montaje de los primeros tramos en los vanos laterales, se montó la viga de

rigidez (estructura tipo cajón de cerchas metálicas) en la abertura central, partiendo del centro hacia ambos pilones. Cada unidad de montaje estaba formada por dos tramos de celosías, transportados en gabarras y elevados mediante cuatro carros grúas que se movían a lo largo de los cables. El tiempo de montaje del tablero fue de casi siete meses.²⁸

LOS PUENTES COLGANTES TAMBIÉN SE CAEN

En el siglo XIX se construyeron muchos grandes puentes colgantes, pero en el siglo XX se introdujeron mejoras fundamentales en el diseño y construcción, para alargar los tramos y evitar el reconocido problema de oscilaciones y "resonancia", que se produce bajo el efecto de ciertas condiciones de viento y tráfico. Especialmente después del desastre, muy publicitado, de la destrucción en 1940, del **puente colgante sobre estrecho de Tacoma** (EE UU), desastre que fuera filmado y visto por el mundo entero mientras el puente se retorció y desmoronaba totalmente, debido al efecto de grandes oscilaciones provocadas por una tormenta moderada con vientos de intensidad 7. El puente de Tacoma era un ejemplo de extremo, en la tendencia hacia la construcción de puentes colgantes esbeltos y flexibles; sus vigas de rigidez tenían solamente 2 m de altura, con una luz principal de 854 m. Estaba calculado para soportar su peso propio y las cargas del tráfico, también se habían considerado los cambios de temperatura y la carga estática del viento, pero no sus efectos aerodinámicos. La construcción no era suficientemente rígida y su diseño facilitaba las oscilaciones verticales que se acumulaban (efecto de resonancia). Este puente, al momento de su colapso, era el tercero más largo en el mundo.

Foto 20
Puente Mackinac. Tendido de los cables



Foto 21
Puente Tacoma. Derrumbe



²⁷ Los alambres de alta resistencia se amarran para formar cordones o "tendones", que luego se amarran entre sí, con flejes de acero, para formar cada cable de suspensión.

²⁸ Wittfoht: 74,75.

De la misma manera que el colapso del puente del Tay había señalado, en el siglo pasado, la importancia del efecto del viento, el derrumbamiento del puente de Tacoma hizo prestar atención al efecto dinámico del viento sobre puentes colgantes de gran longitud. Posteriormente se comprobó que una serie de puentes importantes tenían que ser reforzados de inmediato a consecuencia de esta señal de alarma, incluyendo al Golden Gate, que sólo resistía un viento crítico de intensidad 8, y hubo de ser reforzado en el cordón inferior de las vigas de rigidez. Un nuevo puente sobre el estrecho de Tacoma, con una luz de 853 m, el **New Tacoma Bridge**, fue concluido en 1950 y fue diseñado para soportar vientos de hasta 200 Km por hora.

Otro derrumbe, el del puente sobre el río Silver en Ohio, que dejó más de 40 muertos, fue provocado por agrietamientos en barras del tipo Y, que soportan los cables de los que cuelga el tablero desde los cables maestro o principales. Los puentes colgantes requieren una inspección continua todo el año, un trabajo que implica, permanentemente, pintar y observar. El mantenimiento de un puente colgante es una tarea compleja y arriesgada: búsqueda de corrosión, remaches agrietados, combaduras en el acero; cada puente tiene su propio sistema y equipo de trabajo que convive permanentemente con la obra. Otro accidente, ocurrido en octubre de 1957, cuando una gran multitud fue testigo del derrumbe parcial del **puente colgante sobre el río Peace**, en British Columbia, Canadá, comprobó que la firmeza de un puente no está asegurada solamente por su estabili-

dad frente al viento. En este caso el bloque norte de anclajes cedió por razones todavía no explicadas. El puente había sido construido en 1942, y los primeros síntomas de que el bloque de anclaje se estaba moviendo se produjeron unas doce horas antes del colapso, al romperse una tubería de agua que al ser inspeccionada permitió a los empleados notar el movimiento en el tablero del puente. La empresa que ejecutó este puente fue la de John Roebling, justamente poseedora de una gran experiencia innovadora y constructiva.²⁹

El primer gran puente colgante proyectado y calculado específicamente para absorber las cargas dinámicas del viento, además de las cargas estáticas corrientes fue el **puente Mackinac** (1.158 m de luz), en EE UU, entre los lagos Michigan y Huron, por D. B. Steinmann, terminado en 1957. Steinmann había estado estudiando por años el comportamiento aerodinámico de los puentes colgantes y descubrió que los puentes podían, simplemente, clasificarse previamente en estables o inestables aerodinámicamente, según oscilaciones verticales de torsión y conjugadas, es decir, combinadas. En una sección inestable, un

Foto 22
Puente sobre el río Peace. Derrumbe



Foto 23
Puente Mackinac



Foto 24
Puente sobre el lago de Maracaibo



Foto 25
Puente sobre el lago de Maracaibo. Derrumbamiento



viento horizontal constante produce una resultante de fuerzas de oscilación sobre la sección del puente. La acumulación es logarítmica y el menor movimiento puede aumentar miles de veces en unos pocos minutos y puede alcanzar amplitudes que produzcan la destrucción del puente.³⁰ Se trata del fenómeno conocido como "entrar en resonancia el puente". El puente Mackinac estaba en construcción cuando ocurrió el derrumbe del puente sobre el río Peace.

En abril de 1964, el **puente sobre el lago de Maracaibo**, con apenas dos años de servicio, fue embestido por un tanquero, afectando dos pilares de la rampa, provocando que las vigas saltaran de sus apoyos y se desplomaran. Justo a los seis meses, en una demostración de gran eficiencia del Ministerio de Obras Públicas, el puente volvió a entrar en servicio. El puente, diseño de Ricardo Morandi, con una longitud total de 8,7 km (una de las mayores del mundo en

²⁹ Wittfoht: 83.

³⁰ Wittfoht: 80.

1962), tiene cinco aberturas principales, dos de ellas de 235 m, en forma de puentes en T con las vigas que soportan el tablero sustentadas por cables, a 50 m de altura, sobre las aguas del lago. Fue construido por la empresa venezolana Precomprimido, C. A. en consorcio con Julius Berger y asociados (Alemania).

En mayo de 1980, el tramo metálico del **punto Sunshine Skyway**,³¹ en la boca de la bahía de Tampa, Florida, que comunica a San Petersburgo con Bradenton, fue chocado por un carguero, produciendo su colapso parcial y 35 muertos: ¡era la quinta vez que un barco chocaba con el puente! Se decidió demoler el puente, para construir otro. La demolición tardó tres años: 9.000 ton de acero fueron seccionadas con 1.100 cargas explosivas lineales, para cortar el acero en piezas de 25 ton. El arte de demoler grandes estructuras es una técnica muy especial que, al igual que su construcción, ha requerido del mismo tipo de conocimientos y grandes innovaciones. Ésta es una gran paradoja: la necesidad de innovar para construir y también la de innovar para destruir. El nuevo puente fue terminado en 1987 con una longitud de 24.500 m.

PUNTES COLGANTES EN EUROPA

Es importante notar que en la primera mitad del siglo, en Europa se construyeron muy pocos puentes importantes, y prácticamente ninguno colgante, más bien fueron destruidos muchos construidos en el siglo XIX y otros tantos históricos. Esa destrucción fue otro de los terribles efectos de las dos guerras mundiales que afectaron al territorio europeo en este siglo entre 1914 y 1945, con una pausa de veinte complicados años entre 1919 y 1939. Los grandes puentes se cuentan entre las primeras víctimas de guerra por su carácter estratégico dentro del sistema vial y de transporte. Por ello los grandes puentes modernos son mayoritariamente de la posguerra y ojalá se puedan conservar para la posteridad.

En Inglaterra el **punto sobre el Tamar**, en Sal-tash (Cornualles), con luces de 114-335-114 metros, terminado en 1962, es el primer puente colgante de Gran Bretaña que supera la luz de 214 m del famoso puente colgante Clifton de Brunel en Bristol, terminado casi 100 años antes, en 1864. En 1964 se termina el **nuevo punto sobre el Firth of Forth**, muy próximo al de Brunel, y es el primer puente que supera la luz de 1.000 m (1.006 m) en Europa. La construcción de este puente tuvo dificultades de todo tipo, la primera de ellas ocurrió al comenzar a montarse la primera torre o pilón, cuando alcanzaba 120 m de altura, las oscilaciones, con vientos normales, llegaban a 1 m en la cúspide del pilón; se fijó con cables pero en el primer intento de tensar los cables éstos se rompieron. Luego, en febrero de 1962, cuando se realizaba el trenzado de los cables, una tormenta con vientos de 160 Km/h, que también causó devastación en las costas alemanas del Mar del Norte, provocó el rompimiento de los flejes de acero de amarre de los cables ya trenzados, lo que "enredó" los alambres ya trenzados y los que no lo estaban. El desenmarañado de los cables y la reparación de los

daños causados a la pasarela auxiliar (*catwalk*) y los equipos de tensado tomó un mes completo. Un dato de interés es que en medio de la tormenta las oscilaciones de los ramales ya trenzados en el centro del puente alcanzaban más de 20 m. Lo que revela esta narración es que la construcción de un puente colgante de gran luz, siendo una "construcción en el aire", es muy compleja y riesgosa.

En 1965 se terminó el **nuevo punto sobre el Severn**, de 990 m de luz, que incorpora una innovación importante. La viga de rigidez-tablero es una sección de cajón aerodinámica de poca altura, que contrasta con el entramado de cerchas los puentes tradicionales. Esta sección había sido propuesta (y no aceptada) por Fritz Leonhardt para el punto sobre el Tajo en Lisboa, y combina una elevada rigidez con frente reducido de ataque al viento. Para aumentar la rigidez, los cables verticales de suspensión del tablero se alternaron con cables inclinados. El **punto sobre el río Tajo** (483+1.013+483 m) se completa en 1967, con fundaciones de cajón a 78 m bajo las aguas del río. El primer **punto sobre el Bósforo** en Estambul, fue concluido en 1973 con una luz de 1.074 m y, en 1988, fue terminado un segundo punto, el **Fatih Sultan Mehmet**, de 1.090 m de luz. Suecia también completó un gran punto colgante en Veda en 1997, el **punto Hoga Kusten**, de 1.210 m de luz.

LOS MÁS GRANDES PUNTES COLGANTES: el fin de la era americana

En 1981 fue terminado el **punto sobre el estuario de Humber** en el condado de Humberside, en Inglaterra, con 1.410 m de luz central, torres de concreto y luces laterales inusualmente asimétricas de 280 y 530 m, y un tablero armado con dovelas de cajón prefabricadas de concreto. El punto se mueve constantemente y, con vientos de 130 km/h, sus desplazamientos son de 3 m en el centro del tramo. Este punto no ha cumplido las expectativas de tráfico rentable, por lo que los críticos lo han llamado «el punto que va de ningún lugar a ninguna parte».

El enlace entre la isla de Lantau y tierra firme, sobre el congestionado canal que conduce al Pearl River Delta, se ha convertido en un símbolo de China. La pieza central es el **punto de doble tablero Tsin Ma**, el punto colgante más largo del mundo para tráfico vehicular y de ferrocarril; construido entre 1992 y 1996, en un insólito corto plazo, el punto debe soportar vientos de hasta 300 km por hora debido a su ubicación en la zona de tifones del sur de China. Las torres que soportan el punto, cada una de 206 metros de altura, son de concreto armado vaciado mediante encofrados deslizantes. Los dos cables de suspensión, de acero de alta resistencia, son de 1,10 m de diámetro, y de ellos cuelgan cada 10 m los cables que sostienen el tablero de 1.377 m de largo.

El doble tablero está constituido por 51 secciones de forma aerodinámica, de dos niveles, fijadas entre sí, formando un robusto híbrido de estructura de cajón y cerchas triangulares. Compañías japonesas e inglesas fabricaron estas

³¹ En este caso no se trató de un punto colgante.

secciones del tablero de acero y las embarcaron hacia China. Las secciones eran, en general, de 40 m de ancho, 36 m de largo y 7,30 m de profundidad, con un peso de 1.000 toneladas; acomodando seis canales de tráfico vehicular arriba y una vía férrea y dos canales de emergencia abajo. El concreto del tablero superior y del inferior, del centro del tramo principal, fueron vaciados sobre entramados prefabricados de acero, en la isla Lantau, y luego flotados para ser izados a su posición definitiva. En contraste, los tramos laterales y el resto del tramo central, consistieron en cuatro vigas cajón metálicas, deslizadas en pares desde las torres en cada lado, hasta su posición definitiva. Las narices de lanzamiento –la parte frontal de las vigas usada para deslizar la sección hasta su posición– fueron dejadas en sitio e incorporadas al diseño, sirviendo como elementos de transición entre las secciones centrales mixtas de acero y las laterales de concreto. El punto de unión de estos dos sistemas estructurales en cada lado, a 45 m de cada torre, refleja la profundidad del agua en el canal Kap Shui Mun, que debía ser suficiente para permitir flotar las pesadas unidades compuestas de acero y concreto.³² El puente adyacente al Tsim Ma, en el paso de Lantau, es el **punto Kap Shui Mun**, con una luz central de 430 m. El tablero del puente adoptó dos sistemas estructurales diferentes. El de la luz central es una estructura compuesta de doble cajón de acero y concreto. Pero, en 1998, en la provincia de Jiangsu, también en China, se inauguró el **punto Jiangyin**, con una luz central de 1.385 m.

El **punto Great Bælt** entre Zealand y Funen en Dinamarca, terminado en 1998, tiene una luz de 1.624 m y es el segundo más largo tramo del mundo después del **Akashi Kaikyo Bridge**, en la ruta Kobe-Naruto en Japón, terminado también en 1998, con una longitud total de 3.910 metros y un luz central de 1.911 metros. Sus torres metálicas se elevan a 238 metros sobre el agua y sus cables soportarán tensiones de hasta 120.000 toneladas métricas, muy lejos de cualquier otro puente. Los cables de suspensión de este puente, con un diámetro de 112 cm, están formados por 290 haces de 127 alambres de acero de alta resistencia (180 kg/mm²), de 5,23 mm de diámetro. Este puente soporta vientos de hasta 280 km por hora. Para las fundaciones se armaron en un astillero enormes cilindros de acero, de 80 m de diámetro y 70 m de alto, que luego fueron llevados flotando al sitio para ser rellenados de hormigón. Las torres del puente son tan altas como la torre Eiffel, y fueron armadas por piezas o módulos de gran tamaño. En los fustes de las torres se colocaron, por primera vez en un puente, amortiguadores de masa (**dampers**) con el fin de reducir las oscilaciones. Se utilizó un método innovador para colocar el cable guía con un helicóptero y un carrete colgando que arrastra el cable. Los anclajes de los cables, macizos de concreto, son los más grandes del mundo.³³

El Akashi Kaikyo forma parte de un complejo sistema de vías y puentes que unen la pequeña isla de Shikoku con la mayor Honshu. Los primeros fueron los **puntos Honshu-Shikoku**, terminados en 1988, que unen ambas islas del archipiélago japonés. Los seis tramos y viaductos totalizan más de 13 km y

es el puente más largo del mundo de doble plataforma para vehículos y trenes; los tres tramos colgantes son el **Minami Bisan-Seto**, de 1.100 m de luz, el **Kita Bisan-Seto**, de 990 m y el **Shimotsui-Seto**, de 940 m de luz. Otro puente colgante del sistema es el Ohnaruto, terminado en 1985, con una luz central de 876 m; y, en 1999, se terminaron los **puntos Kurushima-2 y Kurushima-3**, de 1.020 y 1.030 m de luz, en la ruta Onomichi-Imabari.

El terremoto que devastó la ciudad de Kobe el 17 de enero de 1995, de 7,2 de magnitud, tuvo su epicentro a sólo 4 Km del puente. Los geólogos determinaron que una nueva falla se había creado cerca del puente a 14 Km de profundidad, justo cuando los cables habían sido erigidos. Como consecuencia, las fundaciones se desplazaron, expandiendo la luz central del puente 80 cm de un lado y 30 cm del otro. Afortunadamente las torres y los cables no sufrieron daños, y éstos se ajustaron fácilmente al incremento de 1,10 m de luz. El puente había sido diseñado para soportar los efectos de un terremoto de magnitud 8,5, causado por el movimiento de la placa del Pacífico, a 150 Km de distancia; y se había simulado el efecto sobre el puente de un terremoto o un fuerte viento, de un nivel con recurrencia de 150 años; pero los diseñadores, sin embargo, no habían anticipado que pudiera ocurrir un desplazamiento de las fundaciones. El terremoto se adelantó y ocurrió más cerca de lo previsto, pero liberó las fuerzas de la tierra, haciendo menos posible un nuevo susto en el futuro cercano. El Akashi Kaikyo Bridge mantendrá el récord solamente por unos cuantos años más, pues el **punto sobre el estrecho de Messina**, que unirá a Sicilia con la península de Italia, se planifica para el 2006, y tendrá una luz central de 3,3 kilómetros. También se proyecta un puente para el estrecho de Gibraltar con una luz de unos 3.300 m y brazos en cantiliver que llegan cerca de 1.100 m; e incluso se ha planteado otro para unir a Alaska con Siberia, sobre el estrecho de Bering.³⁴

EPÍLOGO

La misma carrera por el edificio más alto del mundo también se corre ahora por el puente de mayor luz. El puente Plougastel de Freyssinet, con tres arcos de 186,4 m, fue récord hasta 1934 para puentes de concreto; el puente sobre el Paraná de arco empotrado llegará a 290 m de luz; el de Gladesville alcanzará los 305 m; el puente metálico de Quebec llegó a los 548 m. Pero el gran salto se produce con la moderna tecnología de los puentes colgantes. El primer puente en superar la luz de 1.000 m fue el puente George Washington en 1931; el puente Humber superó los 1.400 m en 1981; el puente Great Belt sobrepasó los 1.600 m en 1998, en el mismo año el Akashi Kaikyo llegó apenas a 2 m de los 2.000, y el puente de Messina los superará. Lo cierto es que entre 1988 y 1999 se han construido 9 puentes colgantes con más de 1.000 metros de luz central. Sin embargo, nuestra época ha desarrollado también una especie de adoración tecnológica por lo pequeño, por lo muy pequeño, ¿la era de la nanotecnología?: **microchips**, la genética molecular, la

³² J. Kosowatz "Building a New Gateway to China". *Scientific American*. December, 1997.

³³ S. Kashima y M. Kitagawa "The longest suspension bridge". *Scientific American*. December, 1997.

³⁴ H. Petroski "New and future bridges". *American Scientist*, Vol. 86, N° 6, 1998: 514-519.

producción de partes mecánicas a escala molecular, lo que a veces lleva al olvido de las grandes obras de ingeniería del pasado. La gracia y magnificencia de los rascacielos, de puentes que vuelan sobre anchurosas aguas, y el impacto de otras creaciones ingenieriles masivas como largos túneles y gigantescas represas, han sido «monumentos a la inventiva humana». «Sus dimensio-

nes récord han retado, en su momento, los límites de la tecnología de la construcción, la ciencia de los materiales, los ensayos sobre modelos en escala y túnel de vientos, la simulación por computadoras... pero no los límites de la imaginación».

CRONOLOGÍA

La siguiente cronología abarca una selección de puentes importantes desde el punto de vista tecnológico, a partir de la bibliografía referenciada en el texto, y de información proveniente de búsqueda en Internet.

La era del hierro fundido

- 1779 Puente de Calbrookdale sobre el Severn (G.B.) por Abraham Darby II; primer puente enteramente realizado en hierro fundido.
- 1796 Puente de Sutherland sobre el Wear (G.B.) por Rowland Burdon.
- 1803 Pont des Arts en París, por Cessart et Dillon; primer puente en hierro fundido ejecutado en Francia.
- 1834 Pont du Carrousel en París, por Polonceau; primer puente en hierro fundido, con grandes arcos en Francia; luces entre estribos: 151 m.

La era del hierro forjado y el acero

- 1850 Puente Tubular Britannia sobre el estrecho de Menai en Gales, por Robert Stephenson; primer puente en utilizar el hierro para ensamblar una estructura.
- 1857 Viaducto de Crumlin (G.B.) por Liddel y Kennard; primera utilización de pilas metálicas.
- 1858 Puente Royal Albert sobre el Tamar en Saltash (G.B.) por Isambard Kingdom Brunel; una de las formas de puentes más originales, uniendo los arcos tubulares y las cadenas de tensión.
- 1859 Puente Victoria sobre el San Lorenzo, en Montreal, por Robert Stephenson y Ross; el mayor puente tubular: 2.740 m.
- 1859 Puente de ferrocarril en Burdeos, llamado La Passerelle, por Gustave Eiffel de 500 metros de largo y tramos de 77 m.
- 1877 Puente sobre el Douro en Oporto por G. Eiffel y T. Seyrig, luz: 160 m, altura: 61 m. Construido en cantiliver.
- 1877 Old Tay Bridge, cerca de Dundee (G. B.) por Sir Thomas Bouch.
- 1884 Viaducto Garabit (de ferrocarril) sobre el río Truyère por G. Eiffel; luz del arco: 165 m, altura 112,5 m. Cuando se inauguró era el puente de arco más alto del mundo.
- 1885 Puente en cantiliver de Niágara por C. Schneider y E. Hayes.
- 1885 Puente Don Luis, sobre el Duoro en Oporto, de Eiffel y Seyrig, luz del arco: 170 m. Doble tablero, el inferior es tensor del arco. Construido en cantiliver.
- 1885 Viaducto de la Tardes por G. Eiffel.
- 1890 Puente en cantiliver sobre el First of Forth en Edinburg (Escocia), por B. Baker y J. Fowler; el primer gran puente en acero. 2 tramos principales de 521 m de luz y altura de 105 m.
- 1890 Puente Alejandro III en París por Resal y Alby, en acero moldeado.
- 1902 Viaducto de Viaur (Fr.), arco central en cantiliver y tímpanos rígidos, por Bodin; luz: 220 m, altura: 110 m.
- 1908 Queensboro Bridge sobre el East River en Nueva York, por Gustave Lidenthal.
- 1908 Viaducto de Fades sobre la Sioule (Fr.) con las más altas pilas de mampostería de la época (93,33 m) y largo de 376 m.
- 1917 Puente en cantiliver de Quebec sobre el San Lorenzo por Hoare y Cooper; récord mundial de luz: 548 m.
- 1931 Bayonne Bridge, sobre el Kill van Kull (entre New Jersey y Staten Island, Nueva York) por O. Amman, A. Dana y

- 1932 Cass Gilbert; arco de dos articulaciones de 496 m de luz. Puente de Sydney por F. Freeman; arco de dos articulaciones y 495 m de luz.
- 1935 Puente en la ruta de Birchenough (Rodesia del Sur); arco metálico de 329 m de luz.
- 1942 Puente de Neuilly-sur-Seine en Rouen (Fr.), uno de los primeros puentes en acero soldado.
- 1958 Puente Glen Canyon sobre el Colorado (EE UU), 308 m de luz y 204 m de altura.
- 1970 Puente sobre el Askerö en Suecia.
- 1972 Viaducto Sfalassa en la autopista Salerno-Reggio de Calabria (Italia), luz: 376 m.
- 1977 New River Gorge Bridge, West Virginia (EE UU); arco metálico de 518 m, el más largo del mundo.

Avances en mampostería

- 1751 Pont d'Orleans por Perronet; puente de mampostería con 9 arcos de 32,50 m.
- 1771 Puente de Neuilly en París, por Perronet, en mampostería con un arco de 39 m.
- 1791 Puente Concorde en París, por Perronet (el último).
- 1855 Viaducto de Nogent-sur-Marne; puente en mampostería con 4 arcos de 50 m y 30 arcos de 15 m.
- 1882 Puente de Lavaur sobre el Agout, en mampostería; luz: 61,50 m.
- 1902 Puente Syra en Plauen (Al.), arco de piedra de 90 m, el mayor del mundo.

Llega el concreto armado

- 1894 Puente de ferrocarril en Viggen (Suiza) por François Hennebique; primer puente en concreto armado.
- 1899 Puente en la ruta a Chaterellault sobre el Viena, por Hennebique, con tres arcos de 50 m de luz; el primer gran puente de concreto armado.
- 1904 Puente en concreto armado sobre el Rin en Pymont por M. Schoendorffer; largo total: 200 m con tres arcos de 54 m. Sistema Hennebique.
- 1905 Puente cerca de Travasana (Suiza) por Robert Maillart; luz: 51 m, primer puente de tres articulaciones con abertura de timpano (destruido en 1927). Witt. 118
- 1908 Pont du Veudre sobre el Allier por Eugène Freyssinet; luz 73 m, largo 225 m (destruido en 1940).
- 1911 Puente del Risorgimento en Roma, de tabiques empotrados, por Hennebique de 100 m de abertura, récord hasta 1921. Witt. 118
- 1914 Puente ferroviario en Langwies (Suiza), arco de 100 m de luz. Witt. 117
- 1916 Viaducto ferroviario de Tunkhannock (Penn., EE UU) con 724 m, 10 arcos de 55 m y 2 de 30 m.
- 1922 Puente de Sait Pierre du Vouvray por E. Freyssinet; dos arcos empotrados con tablero suspendido de 132 m de luz.
- 1928 Pont de la Caille sobre desfiladero de Usse en la Alta Savoia, récord mundial de puentes de concreto sin armadura longitudinal: 137,50 m.
- 1928 Puente sobre el Tweed, Berwick; arcos de hasta 110 m.
- 1929 Puente de concreto armado sobre el Oise en Conflans-Fin d'Oise (Fr.), de 126 m de luz, con tablero suspendido.
- 1929 Puente sobre el Ammer, Echelsbach: 130 m de luz. Witt. 137 andamiaje.
- 1930 Puente Albert Louppe sobre el Elorn en Plougastel por E. Freyssinet, formado por tres arcos de 186,4 m de luz;

- récord mundial hasta 1934 (reconstruido en 1945). Famoso además por su andamiaje de una sola pieza. Witt 126-129.
- 1933 Puente sobre el Lot, Castlemorn: 120 m de luz. Arco con tablero suspendido.
- 1933 Pont de la Roche-Guyon (Seine-et-Oise, Fr.) por N. Esquillan y S. Boussiron: arco de 161,40 m de tablero suspendido, récord mundial en su tipo (destruido en 1940).
- 1938 Puente sobre el valle de Rorbach, Stuttgart. Arcos gemelos de hasta 44,5 m de luz y hasta 31 m de altura.
- 1942 Puente Francisco Martín Gil (La Coruña, Es.) por Eduardo Torroja, luz: 192,40 m.
- 1942 Pont de la Coudette sobre el Gave de Pau (Fr.) por Esquillan; récord mundial de puentes de carretera de arco con tensores (*bowstring*), en concreto armado.
- 1940 Puente sobre el Esla (Es.) con tramo central en arco de 197 m.
- 1942 Puente Waterloo en Londres, por Palmer, Triton y Scott.
- 1943 Viaducto de Longeray sobre el Ródano; empresa Li-mousin.
- 1943 Puente de Sandö (Suecia); arco empotrado de 269 m de luz; récord por 20 años para un puente de arco en concreto armado.
- 1962 Puente sobre el Paraná (Brasil-Paraguay), de arco empotrado, de 290 m de luz.

Una revolución: el concreto precomprimido

- 1950 Puentes de Esbly sobre el Marne, de Annet, Tribardou, Ussy y Changis-sur-Marne, por Freyssinet y la empresa Campenon-Bernard; luz 74 m; dovelas prefabricadas y ensambladas con precomprimido.
- 1952 Viaductos autopista Caracas-La Guaira por Freyssinet (Campenon-Bernard): 150 m de luz.
- 1955 Viaducto de la Voulte sobre el Ródano por Esquillan; primer gran puente francés de ferrocarril en concreto precomprimido, constituido por pórticos con puntales inclinados de 56 m de luz.
- 1955 Puente-carretera sobre el lago Pontchartrain N° 1 (Luisiana, EE UU): 38,35 km de largo. Vigas prefabricadas de 17 m de luz.
- 1961 Puente Champlin en Montreal; vigas de concreto precomprimido de 54 m, largo total: 2.600 m.
- 1962 Puente sobre el lago de Maracaibo, por Ricardo Morandi; largo total 8,9 km; tirantes de concreto precomprimido; luces principales: 235 m.
- 1965 Pont Choisy-le-Roi sobre el Sena; primera obra construida en voladizo, con dovelas prefabricadas, ensambladas mediante precomprimido; luz: 55 m.
- 1964 Puente sobre el Caroní. Puente deslizante de 600 m de luz, de dovelas prefabricadas.
- 1964 Puente de Gladesville en Sydney, formado por un arco de concreto precomprimido, ensamblado mediante nervios yuxtapuestos de cajones prefabricados, con luz de 305 m; récord en puentes de arco de concreto armado.
- 1964 Puente-carretera de la bahía de Chesapeake (Virginia, EE UU), 28 Km en pleno mar, cortada por dos túneles.
- 1966 Viaducto de Oleron (Fr.) de 2.862 m de largo con una luz máxima de 79 m; tablero de dovelas prefabricadas precomprimidas. Witt 276.
- 1965 Puente de Bendorf sobre el Rhin; viga de concreto precomprimido de 208 m.
- 1969 Puente-carretera sobre el lago Pontchartrain N° 2 (Luisiana, EE UU): 38,42 km.
- 1974 Puente de Bonhomme sobre el Blavet; con puntales de concreto precomprimido, de 186 m entre articulaciones; el mayor en su categoría.
- 1974 Viaducto de Calix (Calvados, Fr.); con luz de 156 m, longitud total de 1.183 m; récord de puentes en voladizo, construidos con dovelas prefabricadas.
- 1976 Puente de Gennevilliers (Fr.); dos tramos de 172 m de luz, tablero continuo curvo de 630 m construido en voladizo, con dovelas vaciadas en sitio.
- 1986 Carretera elevada Rey Fahd, Bahrein-Arabia Saudita, 24.500 m de largo.
- 1987 Sunshine Skyway, Bahía de Tampa, Florida (EE UU), 24.500 m de largo.

PUNTES COLGANTES

La primera edad

- 1617 Modelo de puente colgante por Faustus Verantius, precursor de este tipo de puentes.
- 1797 Primer puente colgante construido en EE UU por James Finley, en Jacob's Creek.
- 1826 Puente sobre el Menai (G.B.) construido por Thomas Telford: 176 m de luz y suspensión de cadenas.
- 1824 Puente de Conway (G.B.) por Telford.
- 1864 Puente de Clifton sobre el Avon (G.B.) por Brunel, de 214 m de luz.
- 1834 Puente de Fribourg de 271 m, récord para la época.

La época americana

- 1855 Puente sobre el Niágara de Roebling, de 250 m de luz. Primer gran puente colgante de ferrocarril.
- 1883 Puente de Brooklin en Nueva York por Roebling con 520 m de luz.
- 1877 Puente sobre la Monongahela en Pittsburg, por Hemberle; luz: 244 m.
- 1889 Puente transbordador de Portugaete, cerca de Bilbao por F. Arnodin y A. de Palacio: primer puente transbordador.
- 1897 Puente transbordador de Ruen por F. Arnodin, con luz de 149 m.
- 1903 Puente transbordador de Nantes por Arnodin, 147 m.
- 1903 Puente transbordador de Runcorn sobre la Mersey por Wester y Wood; luz 304 m.
- 1904 Puente de Williamsburg en Nueva York; luz: 448 m.
- 1926 Puente sobre el Delaware en Filadelfia; luz: 533 m.

Los grandes puentes modernos

- 1932 Puente George Washington sobre el río Hudson, Nueva York; luz: 1.067, 50 m.
- 1937 Puente Golden Gate en San Francisco de California, por Strauss, Amman, Moissieff y Derleth; luz: 1.280 m.
- 1950 Proyecto de puente colgante sobre el estrecho de Messina, por Steinmann; luz: 1.524 m.
- 1956 Puente Mackinac sobre Mackenzie Straits (Michigan), por Steinmann; luz: 1.158 m.
- 1967 Puente Angostura sobre el Orinoco; luz: 712 m. Longitud total: 1.272 m.
- 1964 Puente Verrenzano Narrows, Nueva York; luz: 1.298,45 m.
- 1964 Puente Firth of Forth (G. B.); luz: 1.006 m.
- 1965 Puente del Severn (G. B.); luz: 990 m.
- 1967 Puente 25 de Abril sobre el Tajo, en Lisboa, de 1.013 m de luz.
- 1973 Puente sobre el Bosforo-1, en Estambul (Tu.) con 1.074 m de luz.
- 1976 Puente de tirantes de St. Nazaire-St. Brévine.
- 1977 Pont des Meules por M. de Brottone: puente de tirantes; luz central de 320 m.
- 1981 Puente colgante sobre el estuario del Humber (G.B.); luz: 1.410 m.
- 1988 Puente Minami Bisan-Seto (Japón), luz: 1.100 m.
- 1988 Puente Kita Bisan-Seto (Japón), luz: 990 m.
- 1988 Puente Shimotsui-Seto (Japón), luz: 940 m.
- 1988 Puente Fatih Sultán Mehmet, sobre el Bósforo, en Estambul, con luz de 1.090 m.
- 1995 Puente Normandie, Le Havre-Honfleur (Fr.), de 2.200 m de largo y tramo central de 860 m.
- 1996 Puente Tsin Ma en China: 1.377 m de luz.
- 1997 Puente Hoga Kusten en Veda (Suecia): 1.210 m de luz.
- 1998 Puente Jiangyin en China, 1.385 m de luz.
- 1998 Puente Store Bælt sobre el Gran Belt, Zealand-Funen (Dinamarca) 1.624 m.
- 1998 Puente Akashi-Kaikyo, en la ruta Kobe-Naruto (Japón). Luz central: 1.911 m y 3.911 m entre anclajes. El tramo colgante más largo del mundo.
- 1999 Puente Kurushima-2 (Japón): 1.020 m de luz.
- 1999 Puente Kurushima-3 (Japón): 1.030 m de luz.