

Función y diseño en las torres de los puentes colgantes^(*)

Por MIGUEL AGUILÓ ALONSO

Doctor Ingeniero de Caminos

Uno de los elementos más característicos de los puentes colgantes son las torres de sustentación, cuya contribución a la indudable estética y funcionalidad de este tipo de estructuras es muy importante. Sobre la evolución histórica de los puentes colgantes y de sus torres, tanto en la teoría como en la práctica de sus ejemplos más significativos, trata el artículo que se presenta a continuación.

Con este artículo intento cumplir una vieja promesa hecha a Fernández Casado durante uno de sus cursos sobre historia y morfología de puentes. Se que don Carlos mantiene sobre esta cuestión una postura teórica distinta y, seguramente, más fundada que la aquí expuesta, pero le echo a pelear mi cariño por este tipo de puentes y le ofrezco mis reflexiones sobre ellos como testimonio de admiración por su ingente labor.

LA FASCINACION DE LOS PUENTES COLGANTES

Cuando Hooke presentó al mundo su enrevesado postulado con el descubrimiento del comportamiento estructural del arco, descifró algo que el hombre llevaba miles de años empleando, sin conseguir explicárselo (1). Definió el arco como inverso de la forma estructural natural —y por lo tanto, comprendida y asimilada— del cable colgando. No es por ello casual que el observador no entendido en cuestiones estruc-

(1) En aquella época, los descubrimientos científicos se comunicaban en latín a las sociedades científicas con el fin de que tuvieran mayor difusión. Las pésimas relaciones de Hooke con el secretario de la Royal Society inglesa Oldenburg, le obligaron a establecer sus proposiciones en forma de acertijos para que el funcionamiento interno de la sociedad no se apropiase de sus conocimientos. Así, en un *postscriptum* a su «Descripción of Helioscopes», escrita en 1675 y publicada al año siguiente, establece su «ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum», en la forma «abcccddeeeefggiiiiiiiillmmmmnnnnnooprssstttttuuuuuuuux». (Hopkins, 1970).

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de noviembre de 1983.

turales identifique inmediatamente los puentes colgantes, diferenciándolos sin esfuerzo de todos los otros tipos estructurales. La catalogación es directa y los factores de forma no suelen entorpecer la adscripción.

Además de esta posibilidad de reconocimiento inmediato, los puentes colgantes suelen tener una gran luz, y la acumulación de ambas cualidades los convierte en formas estructurales muy populares. Como dice Condit: «El puente colgante se mantiene como el tipo de puente más impresionante, no sólo a causa de su gran tamaño, sino también, por la poderosa atracción visual del fino cable parabólico tendido entre dos flexibles torres. El trabajo de los principales elementos estructurales —cables y torres— puede ser captado inmediatamente sin conocimientos técnicos constructivos. Estos factores se combinan para hacer del puente colgante el más popular de los tipos estructurales; de hecho lo convierten en lo más próximo a monumento público que ha producido la civilización contemporánea». (Condit, 1961).

Otra componente estética unánimemente apreciada es la ligereza. La tautología de Elisabeth Mock: «Si los puentes colgantes parecen más ligeros que otros tipos de puentes es porque son los más ligeros» (Mock, 1949), está repetida hasta la saciedad en todos los libros de puentes, seguida de alguna consideración acerca de las ventajas que se obtienen al emplear el acero a tracción. El puente colgante se ha convertido —por sus dimensiones, por la claridad de su comportamiento estructural y por su ligereza— en el arquetipo de los puentes. Es el

FUNCION Y DISEÑO DE LAS TORRES DE LOS PUENTES COLGANTES

«logro culminante en la construcción de puentes» (Inglis, 1944). «Por su extrema economía de material, y por lo tanto de peso, es el sinequanon de tan tremendos vanos» (Mock, 1949). A pesar de su probada utilidad en luces más pequeñas se insiste en la adecuación para las grandes luces: «Es sólo en los vanos por encima de los 600 m. cuando el puente colgante alcanza su forma más sublime de perfección estética» (Inglis, 1944). «El puente colgante representa la forma de construcción ideal para grandes luces», (Rioseco, 1972).

La enorme escala de los puentes colgantes lleva consigo el germen de lo heroico. Induce sugerencias magnificadoras de los hechos constructivos, transformándolos en gestas de la humanidad. Junto a ello, la pureza geométrica del trazado de los cables provoca asociaciones míticas. Es el hombre luchando contra la Naturaleza, y por supuesto, vencéndola. Es la fascinación del progreso potenciada por la aparente simplicidad de la forma. Se establece esa fácil y atractiva relación, tan tranquilizante como falsa,

entre la dificultad de lo conseguido y la simplicidad de lo empleado, pues se logran hacer estructuras de 1.800 m. de luz, lo que, en principio, parece una empresa cuajada de dificultades, tomando directamente de la Naturaleza la forma más simple: la liana que cuelga de los árboles. Todo es claro y simple. Uno se siente pequeño e insignificante ante algo tan grande y tan sencillo.

Todo ello produce un desvanecimiento del criticismo. Se huye hacia lo primario, hacia el refugio del mito y se contemplan estos puentes desde la fascinación. «Los grandes puentes colgantes obtienen una medida de valor estético con base simplemente cuantitativa, pues poseen en sí mismos suficiente ligereza, longitud y altura para provocar emoción», (Mock, 1949). Hablando del Golden Gate, señala Inglis: «En relación a un puente de esta inmensidad conmovedora, el juicio artístico debe ser humilde: no se puede dictar. Es como contemplar un gran fenómeno natural... Los sentimientos no se pueden expresar con palabras... El juicio se

TABLA I

LOS PUENTES COLGANTES DE MAYOR LUZ EN EL MUNDO DESDE 1800.
INCREMENTOS DE LUZ Y PERMANENCIA EN EL TIEMPO

	Año Luz (m)		Valores dimensionales o absolutos					Valores adimensionales o relativos				
			Aumento de luz Δl		Permanencia Δt		Total	Aumento de luz l_i/l_{i-1}	Permanencia $\frac{t_{i+1}-1800}{t_i-1800}$	Importancia-perm. $\frac{l_i(t_{i+1}-1800)}{l_{i-1}(t_i-1800)}$		
			Valor (m)	Orden	Valor (años)	Orden	Orden			Valor	Orden	
Newburyport	1810	74	—	—	6	9	—	—	2	—	—	—
Unión.....	1820	133	9	14	6	10	11	1,80	1,30	1,39	7	
Menai Straits	1826	177	44		8	8	6	1,33	1,31	1,74	4	
Friburgo.....	1834	265	88	5	15	5	4	1,50	1,44	2,16	1	
Wheeling.....	1849	308	43	9	2	15	12	1,16	1,04	1,21	9	
Lewiston.....	1851	318	10	13	16	4	7	1,03	1,31	1,35	8	
Cincinnati (Ohio).....	1867	322	4	16	2	16	16	1,01	1,03	1,04	14	
Niagara (Clifton).....	1869	387	65	6	14	6	4	1,20	1,20	1,45	5	
Brooklyn.....	1883	486	99	4	20	3	2	1,26	1,24	1,56	4	
Williamsburg.....	1903	488	2	17	21	2	9	1,00	1,20	1,20	10	
Bear Mountain.....	1924	497	9	15	2	14	15	1,02	1,02	1,03	15	
Philadelphia-Camden.....	1926	533	36	10	3	13	13	1,07	1,02	1,09	12	
Ambassador (Detroit).....	1929	564	31	11	2	17	14	1,06	1,02	1,08	13	
George Washington.....	1931	1067	503	1	6	11	5	1,89	1,05	1,98	2	
Golden Gate.....	1937	1280	213	2	27	1	1	1,20	1,20	1,44	6	
Verrazano.....	1964	1298	18	12	14	7	10	1,01	1,09	1,10	11	
Humber.....	1978	1410	112	3	—	—	—	1,09	—	—	—	—

Columna número 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

FUNCION Y DISEÑO DE LAS TORRES DE LOS PUENTES COLGANTES

vuelve mudo con pasmada maravilla y admiración», (Inglis, 1944). «Un puente colgante haría devanarse los sesos al más listo chapucero para hacerlo poco agradable. La curva dictada por la naturaleza es demasiado bella para malograrse», (Sir George G. Scott, 1858). «Es bastante difícil construir un puente colgante feo» (Stephens, 1976). Esta fascinación por la escala y la pureza de líneas, propicia que toleremos cualquier deficiencia de diseño. Es más, incluso los detalles mal resueltos contribuyen a la «grandeur» de la obra.

La fascinación es, pues, una de las claves de contemplación estética de los grandes puentes colgantes, y para proceder a su análisis morfológico es imprescindible tenerla en cuenta.

LA ATRACCION DE LOS NUMEROS

Los puentes colgantes también ejercen otro tipo de fascinación. Como suelen ser de gran luz, muchos de ellos han conseguido el record mundial y al estudiarlos parece inevitable dejarse arrastrar hacia ese mágico mundo de los records y de los números. Independientemente de la mayor o menor importancia o significación que pueda tener el establecimiento de un nuevo record, resulta divertido y hasta instructivo adentrarse en ese mundo e intentar extraer alguna idea del papel que ha jugado cada puente dentro de la evolución de la luz a salvar, que ha sido, y es, sin ninguna duda, el mayor estímulo para el constructor de puentes.

En la tabla I se listan cronológicamente los puentes colgantes de mayor luz terminados después de 1800. La elección de este punto de partida se justifica dado el tema de este estudio y tiene por objeto evitar controversias más o menos arqueológicas, de escaso interés en este contexto. Por motivos similares también se han excluido los puentes colgantes construidos en países de tradición no occidental, es decir, los peruanos, indios, tibetanos, chinos, etc., en razón de la indeterminación de luces y fechas. Tampoco se incluyen las pasarelas o los puentes diseñados con sobrecargas inferiores a las normales de su época. Los datos se han tomado de varias publicaciones, (especialmente Stephens, 1976 y Gies, 1963, que contienen listas

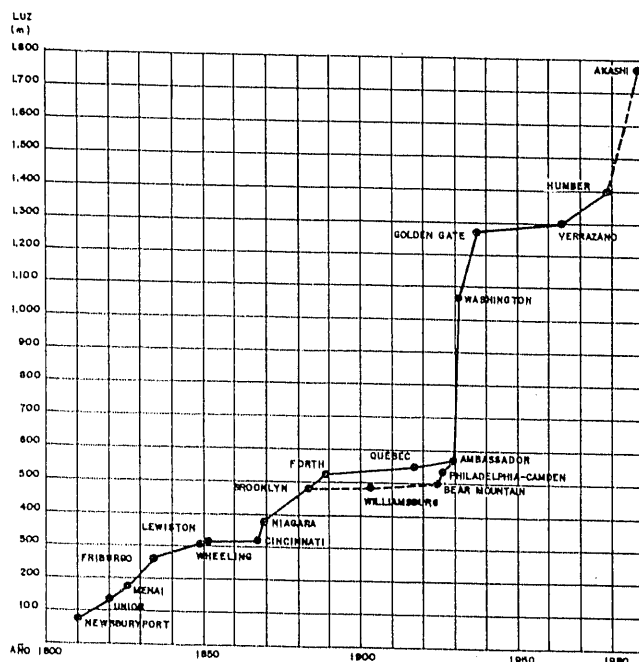


Fig. 1.—Cronología del récord mundial de luz.

específicas de records) redondeando las luces a números enteros de metros (2).

Con los datos de luces y fechas se construye el gráfico de evolución de la luz en el tiempo representado en la figura 1. En ella se aprecia que los puentes colgantes han ostentado el record absoluto de luz excepto en el período de 1889 a 1929, cuando fueron desplazados por los cantilevers del Firth of Forth (1889) y Quebec (1917), (fig. 2), y se puede observar ya la importancia de cada puente en función del salto de luz que ha conseguido y del tiempo que se ha tardado en darlo. La combinación de ambas variables —incremento de luz de cada puente y permanencia en el record del puente anterior o tiempo tardado en superarlo— visualizada en la

(2) La luz de un puente colgante se suele tomar como la distancia entre ejes de torres, dado que en muchos casos los tableros no apoyan en las torres sino que cuelgan en toda su longitud incluso al pasar bajo éstas. Por ello, la luz suele coincidir con la distancia entre los puntos más altos de los cables si el puente tiene tres o más vanos, pero no sucede así cuando el puente es de un solo vano y las torres están algo alejadas del tablero. El «Unión Bridge» figura en la tabla con una luz de 133 m. aunque la longitud del tablero es sólo de 110 m. y el puente de Lewiston con 318 m., con un tablero de 244. Se han mantenido estos valores por ser los que aparecen habitualmente en las listas de records. (Stephens, 1976; Gies, 1963).

FUNCION Y DISEÑO DE LAS TORRES DE LOS PUENTES COLGANTES

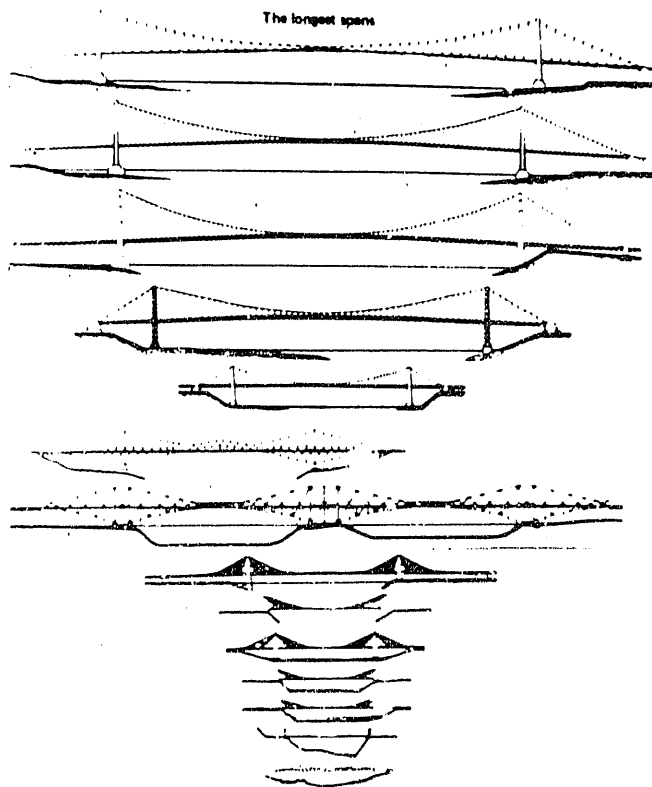


Fig. 2.—Esquemas comparativos.

pendiente de cada recta, dan idea del esfuerzo que ha costado la consecución del record y de la importancia del logro ingenieril que supone. El puente de George Washington es, según ello, el más importante, seguido de lejos por el Golden Gate, Niágara, Friburgo y Brooklyn.

El puente que más ha incrementado la luz salvada respecto a su predecesor en el record, es el puente de George Washington con un aumento de 503 m., seguido por el Golden Gate con 213. Estos valores se listan en la columna 3 de la tabla 1 y la ordenación que resulta, en la columna 4. La permanencia en el record, que siempre es un indicio de hasta dónde se han apurado las posibilidades técnicas y económicas del momento, se lista en la columna 6. En cabeza figura el Golden Gate que mantuvo su record veintisiete años, seguido del puente de Williamsburgh con veintiun años(3). Ambas ordenaciones (columna 4 y columna 6) dan lugar, por suma de puestos y ordenación de

(3) El cantilever del Forth mantuvo su record desde 1889 hasta 1917 en que se terminó el puente de Quebec, o sea veintiocho años.

menor a mayor, al orden que figura en la columna 7 que combina ambos criterios de importancia y permanencia, con el Golden Gate en primer lugar, seguido del puente de Brooklyn y del puente de Friburgo (correspondiéndose con los máximo ángulos cóncavos de las líneas del gráfico).

Y siguiendo con el juego, también se pueden ordenar los puentes según el incremento relativo de luz —cociente entre la luz de cada puente y la del anterior— con lo que en vez de manejar longitudes, manejamos valores adimensionales, dando así mayor valor a los incrementos de luz en los puentes más pequeños que son los más antiguos. De esta forma, el puente George Washington supera en un 89 % la luz anterior, el de Friburgo en un 50 %, etc. Y lo mismo se puede hacer con el tiempo —cociente entre el intervalo transcurrido desde 1800 hasta cada puente y a su siguiente— premiando igualmente la antigüedad. Así tenemos dos nuevos valores adimensionales de la importancia y la permanencia y por multiplicación se obtiene un nuevo índice combinado que intenta nivelar las crecientes posibilidades tecnológicas.

Resulta así una ordenación de importancia —permanencia que deforma suficientemente nuestra óptica para que se puedan comparar puentes muy alejados en el tiempo. Desde luego, los números se pueden siempre manipular como en cualquier tipo de cálculo, para obtener los resultados que se deseen. La única condición es, precisamente, que el resultado pareciera verosímil y se pueda defender prescindiendo de los números. En este caso, la lista así obtenida —Friburgo, George Washington, Menai Straits, Brooklyn, Niágara, Golden Gate, etcétera— no sólo se defiende, sino que se refuerza con el estudio detenido de estos puentes, que, en este orden o algún otro muy similar, constituyen sin duda el núcleo de los mayores logros en la construcción de puentes colgantes.

TECNICA Y DISEÑO

Establecida ya la fascinación tipológica de la escala y de los números, se puede prestar algo de atención a las peculiaridades de diseño que presentan los puentes colgantes. Debido a su

gran tamaño, el entorno juega un papel primordial en la apreciación de un puente colgante. Casi sin excepción, todos los grandes puentes colgantes salvan un río importante, una gran bahía o un brazo de mar, con suficiente superficie de agua para constituir por sí misma un paisaje claramente significado y universalmente aceptado. Pero el puente, con su magnitud, provee el contraste preciso sobre la neutralidad de la superficie del agua para dotarla de escala, estableciéndose una relación de influencias recíprocas entre la obra y su entorno. Y también, como dice Condit, haciendo intervenir la «gesta» constructiva: «El entorno desempeña un papel funcional en el espectáculo total: es una mediación en el drama que envuelve al diseñador y constructor por un lado, y al desafío físico por otro. Un gran puente colgante, como una presa, es lo que más claramente revela este dramático conflicto y su resolución en la que la naturaleza y el hecho técnico adquieren una nueva relación». (Condit, 1961).

En cuanto al diseño global de la superestructura, el puente colgante ofrece la posibilidad de hacer valer, como único elemento formal, el principio constructivo y apoyarse, como ya se vió, en la escala para provocar una fuerte emoción estética. «Pero esta apreciación inicial sólo se mantiene con calidad: una curva del cable agradable, una relación justa entre el vano central y laterales..., y por encima de todo con un adecuado diseño de las torres». (Mock, 1944). Sólo un cuidadoso diseño de los componentes principales del puente y de las relaciones entre ellos, permitirá una segunda lectura de la estructura que no suponga un rechazo hacia esa fascinación de la visión inicial.

De todos los elementos estructurales, las torres son, sin duda, el elemento de mayor significación formal: «Artísticamente, el carácter de un puente colgante está fuertemente determinado por el diseño de sus torres», (Steinman, 1941). Los demás elementos, forzados por la tipología y por razones económicas, sólo alcanzan importancia en relación con ellas. «Un puente colgante tiene éxito, en cierto modo, a causa del inevitable diálogo entre filamento y torre», (Sealey, 1976). Reaparece aquí otra vez, la claridad del comportamiento estructural a través de la lógica adecuación formal de cada

componente a sus respectivos trabajos de tracción y compresión, y simultáneamente surge el conflicto potencial entre los cables y la viga de rigidez, totalmente determinados por la tecnología, y la torre con amplias posibilidades de diseño. «Los puentes colgantes del XIX se prestaban a las aplicaciones estilísticas más extraordinarias. Permitían obtener un fuerte contraste entre la parte metálica (cables o cadenas) y las torres, en general muy elaboradas y realizadas en materiales pesantes» (Rioseco, 1972).

Este diálogo entre lo *técnico* y lo *diseñado* es sintomático de gran parte de las obras de ingeniería del XIX y en él se ceban muchas de las polémicas nacidas entre arquitectura e ingeniería, tan en boga desde que surgió la especialización. En las estaciones de ferrocarril, monumentos por antonomasia de la segunda mitad del XIX, surge el mismo problema. «La guerra entre los puntos de vista del arquitecto y del ingeniero salió a la luz de la misma forma que cuando las dos profesiones trabajaron conjuntamente en los puentes» (Meeks, 1956). La envoltura transparente de las cubiertas, chocaba con la masa de la sillería de las terminales. El contraste era tan fuerte que, «algunos arquitectos pensaban que siendo los dos elementos tan discordantes en carácter, la unificación era imposible y no se podía esperar ninguna relación entre ellos más sutil que la pura contigüidad» (Meeks, 1956). Y, como vía de escape, ya que no la solución, a este conflicto, surge una curiosa tendencia: «Cuanto más osados se mostraban los ingenieros en el diseño de cubiertas metálicas, más tímidos se volvían los arquitectos en los edificios terminales» (Meeks, 1956). En los puentes colgantes la tendencia es similar. Se tiende a tranquilizar al observador de tan tremendos vanos con formas familiares sacadas del repertorio clásico. J. Chaley, a pesar de construir el puente de Friburgo —record de luz mundial— con total libertad y a sus expensas, organiza sus torres como arcos triunfales, las adosa pilastras dóricas y las «reviste de piedra caliza del Jura que tuvo que traer desde 15 leguas» (Chaley, 1839), teniendo excelente piedra de construcción de cualquier tamaño en unas canteras a media legua de Friburgo. Sir Samuel Brown, autor del famoso Union Bridge, en un fantástico proyecto de puente colgante de

128 metros de luz sobre el Támesis —donde hoy está el puente de Lambeth— «introduce varias parejas de columnas clásicas en las torres, lo que denuncia aparentemente el intento de redimir la *aridez técnica* de la silueta del puente con la introducción de elementos aúlicos, típicos del vocabulario tradicional» (Rioseco, 1972). Thomas Telford, en su gran puente de Menai (1826) —considerado como el primer puente colgante moderno— se arriesga a salvar una luz de 177 metros y diseña unas torres sobrecargadas de elementos figurativos clásicos (4), donde «emerge de un modo palpable el divorcio entre la mentalidad utilitaria y la cultura arquitectónica tradicional» (Rioseco, 1972). Quizá todos ellos buscaban —al igual que el arquitecto de las estaciones para tranquilizar al viajero tímido— una compensación formal de corte tradicional a las nuevas formas tecnológicas desvinculadas de los modelos estéticos heredados. Esta tesis viene reforzada por el hecho de que en los puentes colgantes más pequeños o situados en lugares poco frecuentados, desaparece totalmente esta recurrencia a formas tradicionales y las torres se tecnifican integrándose plenamente en la estética de cables, péndolas y celosías de rigidez.

La pretendida monumentalidad de los puentes colgantes, en función de su localización cerca de las grandes ciudades, es también otra intención de diseño a tener en cuenta para entender este contraste entre las torres y el resto de la estructura. El esfuerzo técnico y financiero que conlleva la realización de estas grandes obras inducía a sus promotores y diseñadores a reflejar en ellas algo más que la simple función utilitaria de salvar un obstáculo natural. En muchos casos —quizá la isla de Manhattan es el ejemplo más claro— los puentes colgantes proveen los accesos principales a una gran ciudad y se convierten, al modo romano, en los *arcos triunfales* de entrada a las mismas o se apropian de las funciones simbólicas de las puertas de las murallas en las ciudades medievales. Y es, por supuesto, en las

(4) Hay un diseño de Telford para el puente de Menai, fechado en 1818 y, por tanto, el primero de los realizados, con unos accesos de arcos de sillería y torres principales de fundición. (Paxton, R. A., 1978). Desconozco los motivos de su abandono.

torres donde se vuelca esta carga simbólica, siempre referenciada a una tradición cultural, en contraste con el diseño claramente tecnológico del resto de la estructura.

Esta situación se mantuvo en todo el siglo XIX y principios del XX, sobre todo en los puentes próximos a los grandes núcleos, y no debe ser considerada como una mera etapa de transición o como una tendencia equivocada en el desarrollo de los grandes puentes colgantes. Como hemos visto, tiene sus razones y es coherente con los desarrollos de otras construcciones ingenieriles. Conviene detenerse algo más en su estudio y profundizar en las motivaciones y restricciones de diseño que condicionaban a los proyectistas. La mejor manera de hacerlo es estudiar unos casos concretos, elegidos entre los puentes que más polémica han suscitado.

TRES CASOS NOTABLES

Tras estas obras fascinantes y —a pesar de su sencilla apariencia— complejas, solamente hay, como siempre, hombres que aquí podemos llamar ingenieros. Resultaría inútil pretender comprender bien los puentes sin conocer a sus constructores y sus circunstancias. Aunque no sea éste lugar oportuno para entrar en detalles y dada la existencia de muchas obras sobre estos temas —quizá Steinman, 1941, en su libro *Puentes y sus constructores*, sea quien más ha insistido en ellos— no me resisto a incluir tres ejemplos muy particulares. Se trata de tres grandes puentes colgantes construidos por tres importantes ingenieros. Están escogidos por la especial relación existente en cada uno de ellos entre el ingeniero y el diseño de las torres. La ligereza en la propuesta de soluciones, el empeño en conseguir lo propuesto y la imposición ajena en contra de las propias ideas son tres casos extremos que definen el espacio en que se inscriben estas relaciones.

A) Puente de Clifton

El gran Isambard K. Brunel tenía sólo veintitrés años cuando se presentó al concurso para el puente de Clifton, un barrio residencial de Bristol. Atraído, sin duda, por la fantástica gar-

FUNCION Y DISEÑO DE LAS TORRES DE LOS PUENTES COLGANTES

ganta creada por el Avon cerca de su desembocadura, Brunel abandona toda otra actividad y presenta hasta cuatro proyectos. Su favorito era el «Giant Hole», un sólo vano de 300 m. de luz, con los cables anclados directamente en el terreno, eliminando la necesidad de torres y estribos, y facilitando los accesos por medio de túneles. En aquellos años el record mundial de luz estaba en los 176 m. del puente del estrecho de Menai de Telford y, naturalmente, a Brunel le pusieron muchas objeciones (Aguiló, 1977), sin otro efecto que acrecentar su deseo de proyectar ese puente.

Uno de los miembros del jurado era el propio Thomas Telford, quien, estimando poco válidos los veinte proyectos que habían concursado, redactó uno nuevo, con un vano central de 110 m. y dos laterales de 55 m. Telford, ya con setenta y dos años, apoyaba sus torres en el lecho del río y ofrecía dos posibilidades para estas estructuras de casi 70 metros de altura: una solución de corte clásico y otra en estilo gótico que fue la elegida y consiguió la aprobación del Parlamento. A pesar de este espaldarazo oficial, el proyecto fue mal recibido en Bristol y el jurado se vio obligado a aceptar «la libre discusión de las ventajas e inconvenientes del proyecto» (Body, 1976).

Brunel no debió ser ajeno a este rechazo popular y se apresuró a reformar sus diseños para convencer al jurado. Redujo la luz para evitar objeciones tecnológicas de un jurado bastante conservador y confeccionó varias propuestas para sus torres. Esta reducción de luz supuso un fuerte incremento de coste, pues la realización de estribos y torres en tan escarpadas laderas, no estaba, precisamente, exenta de dificultades. A pesar de este nuevo esfuerzo, el jurado no resulta convencido y elige el proyecto de Rendel. Brunel no se resigna y consigue una nueva reunión en la que, a base de elocuencia y de presentar numerosas alternativas, consigue la adjudicación del proyecto.

Para Brunel, lo único importante era ganar el concurso. El diseño, o mejor, la traducción en imágenes de sus ideas, no le vinculaba en absoluto. En el diseño de gran luz, donde el tablero «surge del "Giant Hole" hacia este esplendido paisaje, alcanza los bosques del

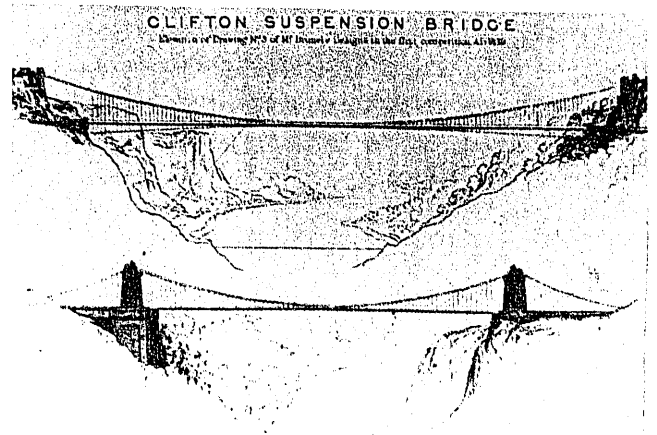


Fig. 3.—Puente de Clifton. Proyecto original (Giant Hole) y Proyecto ganador.

lado opuesto y serpentea por el valle de Nightingale hasta que corona la parte de Leigh» (Brunel, 1870), los cables se anclan en las laderas con unos pequeños castilletes, y la única concesión formal es la boca del túnel a modo de portalón de castillo (figura 3). Un segundo proyecto, también de gran luz, sin pilas propiamente dichas y situado algo más cerca de la boca del río en un lugar menos espectacular, insiste en los castilletes de anclaje.

Entre los proyectos de menos luz, Brunel intenta toda clase de estilos para sus pilas: hay una torre inspirada en el Castillo de Lancaster, otra en la portada de Christchurch College de Oxford, un par de variantes moriscas e incluso un diseño con pilas hasta el lecho del río. El estilo egipcio de otras dos variantes logra poner de acuerdo al jurado «consiguiendo unanimidad entre quince hombres que peleaban sobre cuestiones de gusto», como cuenta el propio Brunel en su diario (Brunel, 1870).

Las torres ganadoras (figura 4) tenían una fuerte cornisa y el paso se efectuaba por un portón adintelado. En la versión más diseñada había incluso una pareja de leones sobre cada torre, que debían interesar bastante a Brunel, pues existe otro dibujo donde los leones miran hacia los accesos en lugar de hacia el vano. Stephenson retomará más tarde este motivo en su puente Britannia (1849).

En la realización, comenzada en 1834, se pierden los leones, la cornisa y el paso adintelado.

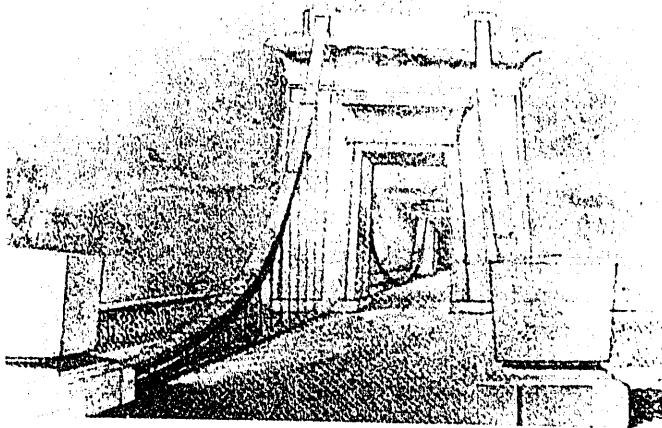
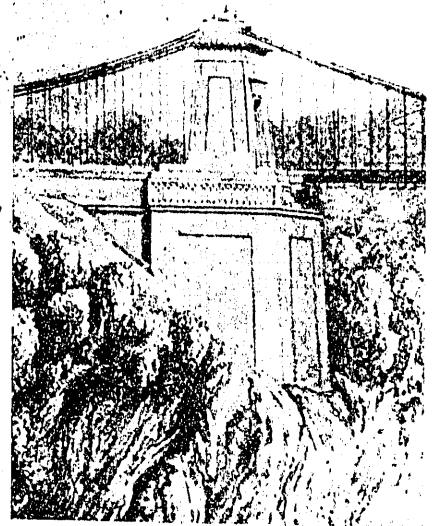
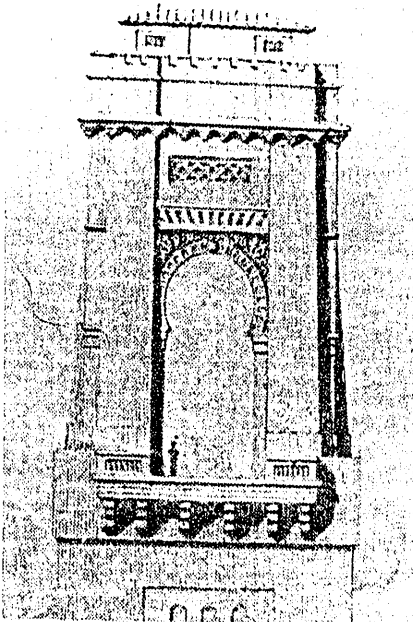
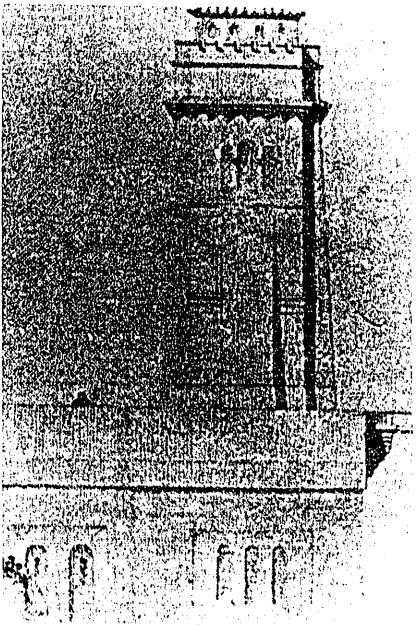
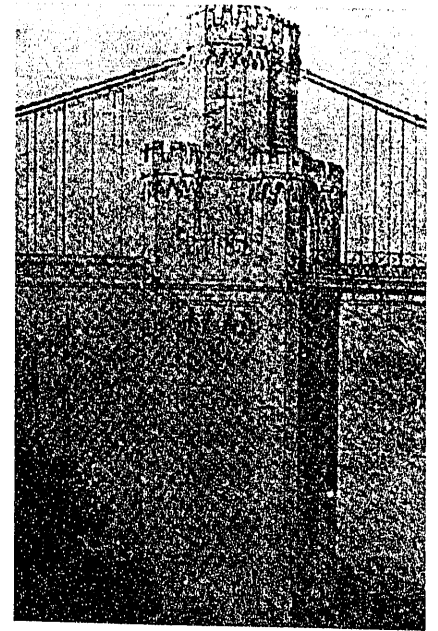
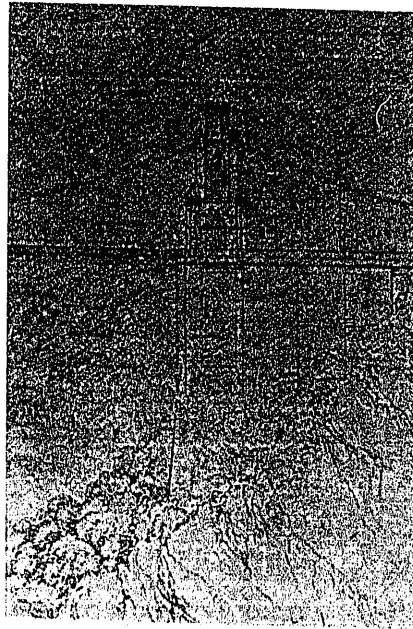
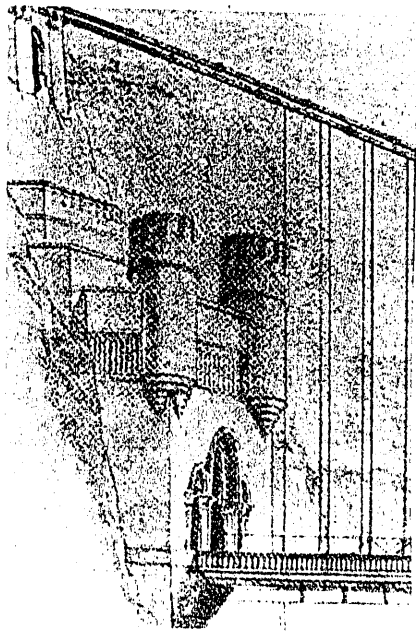


Fig. 4.—Ponte de Clifton. Diferentes diseños de Brunel para las pilas. Abajo, derecha, la pila construida.

do aunque subsiste, sin fundamento preciso, ese aire egipcio con que Brunel consiguió la aceptación del jurado. Los alzados se redondean ligeramente y los dinteles se insinúan como arriostramiento de altos arcos parabólicos que se repiten mucho más estilizados en los laterales, aunque, incomprensiblemente, sólo en una de las torres.

La terminación superior fue añadida después de la muerte de Brunel por los ingenieros Hawkshaw y Barlow, quienes, por encargo de la Institution of Civil Engineers y como homenaje a su colega I. K. Brunel, terminaron el puente en 1864 con escasas variaciones de diseño y «respetando las ideas de Brunel» (Pugsley, 1976). Tras este largo proceso, hemos heredado un bellissimo puente, enclavado en un paraje inolvidable y con un aspecto formal claro, rotundo e integrado que sólo el análisis histórico ha revelado como anecdótico.

B) Puente de Brooklyn

Ya en 1800 Jeremiah Johnson sugirió «la necesidad de construir un puente desde Brooklyn a New York a través del East River». La fuerza de la sugerencia radicaba claramente «en el hecho de que el puente sería el medio de incrementar el valor de las tierras de ambos márgenes del río» (Steinman, 1945). Así, medio siglo antes de que la mera posibilidad tecnológica de construir el puente fuese una realidad, quedó establecido el doble frente de atención que orientaría su lenta gestación: lo quimérico, en cuanto aceptación del desafío tecnológico, y lo pecuniario, como elemento de revalorización del suelo. Once años después, en 1811, la isla de Manhattan se cuadrícula «con la pura y simple intención de dividir el suelo en parcelas más vendibles» (Trachtenberg, 1965) y el puente comienza a ser imprescindible para la creación de ese gran sueño americano que sería la ciudad de New York, convirtiéndose a la vez en algo emblemático e inseparable de ella.

En la década de los cincuenta, se incorpora a este impetuoso proceso un ingeniero bastante especial. Nacido en Alemania, educado con Hegel, formado tecnológicamente en el Instituto Politécnico de Berlín, emigrante y granjero por convicción, fabricante de aceros especiales,

ensayista conocido, constructor de puentes y, en fin, su mayor gloria: diseñador del puente de Brooklyn. Fue concretamente en marzo de 1857, cuando John A. Roebling se dirige por carta a Horace Greeley «aformando la viabilidad de un puente colgante que uniera Brooklyn y Manhattan, sin perturbar la navegación por el río». Sería un puente «sin rival en el mundo», termina Roebling (McCullough, 1972).

Roebling, que ya había construido los puentes de Pittsburgh, Niágara y Cincinnatti —record mundial de luz— consigue su nombramiento como ingeniero del proyecto en mayo de 1867 y, sólo tres meses más tarde, presenta un detallado informe con el proyecto prácticamente definido. Es consciente de la magnitud del encargo y de sus implicaciones históricas. Su diseño asume el desafío, como manifiesta el propio Roebling en el párrafo final de su memoria:

«La obra, construida de acuerdo con mi proyecto, será no sólo el mayor de todos los puentes, sino la mayor obra de ingeniería de este continente y de esta época. Sus torres... proporcionarán lo que faltaba en ambas ciudades (Manhattan y Brooklyn): un emblema para unir las e identificarlas, como las murallas, los castillos o las catedrales de las viejas ciudades europeas. Ellas convertirán formalmente a New York —Manhattan y Brooklyn— en el nuevo centro del mundo» (Trachtenberg, 1965).

El propósito estaba, pues, bien claro. Las torres debían impresionar por su grandeza y solidez, hasta el punto de constituirse en monumentos por sí mismas. Desde que se incorpora a la gestación del puente, en 1857, y comunica su viabilidad, está obsesionado con ellas. «El mismo mes de marzo, en su estudio de Trenton, dibuja tres diferentes tipos de torres para el puente sobre el East River: un elaborado portallón de estilo egipcio con una fuerte cornisa superior, un notable arco de aire romano y otro arco, también de medio punto, sobre el cual, muy brevemente como un anticipo de lo porvenir, dibujó con lápiz un arco gótico» (McCullough, 1972) (figura 5).

Con los años, su diseño evolucionó hacia la doble arcada ojival con que luego se construyó el puente, pero, tanto en los primeros croquis

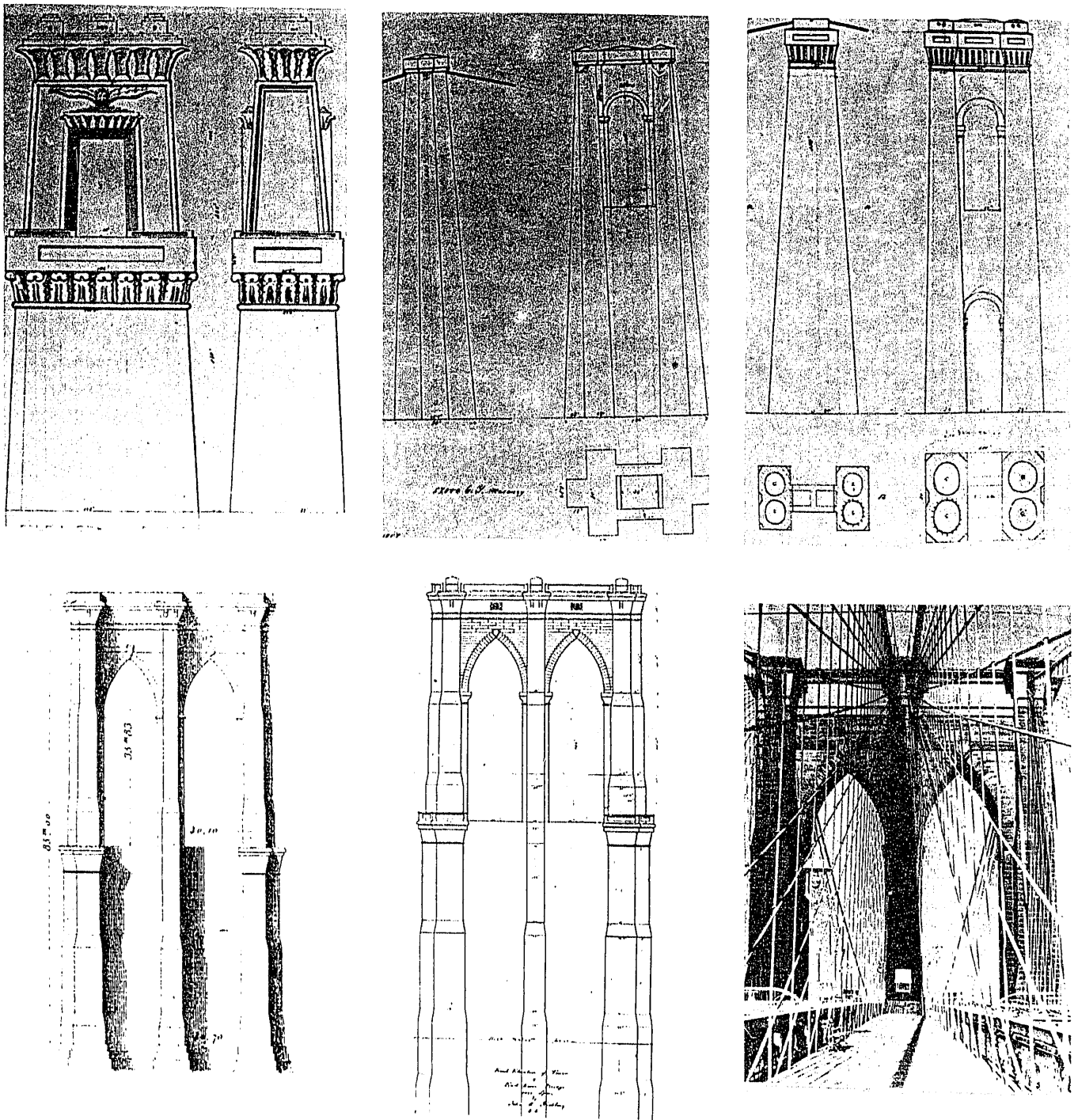


Fig. 5.—Puente de Brooklyn. Evolución del diseño y pila construida.

como en la posterior realización, el interés de Roebling se dirigió más a lo simbólico que a lo funcional. Y ello no significa que, por aquella época, los ingenieros confundieran ambos propósitos. Pocos años antes, William Hosking, en su «Theory, Practise and Architecture of Bridges» (1842), exige un estricto funcionalismo

para los puentes: «La usual *materia architecturae* está totalmente fuera de lugar y fuera de carácter en la composición de puentes... Cuando un puente está diseñado *constructivamente*... no puede dejar de ser agradable...». Roebling quería unas torres como verdaderos monumentos y, prescindiendo de cualquier reparo funcio-

nalista acudió a la piedra y la trabajó tomando como modelo lo que su cultura, de fuerte raíz clásica y europea, le ofrecía como máximo exponente de simbolismo y monumentalidad.

No cabe dudar del triunfo de su intuición. Con sus 75 metros de altura, «las torres empequeñecían la silueta de toda la ciudad» (figura 6) y destacaban sobre «la mísera y raquítica escala



Fig. 6.—Puente de Brooklyn. La pila (en construcción) como monumento. Cartel de Inauguración.

de los barrios colindantes, constituyéndose por contraste, como la consecución de las más nobles aspiraciones; majestuosas, dirigidas hacia el cielo... como grandes catedrales que dominan las chozas de las creyentes» (McCullough, 1972). Incluso antes de su inauguración, el puente se convirtió en el símbolo de ese algo imposible de definir que hace a New York diferente de cualquier otra ciudad en la Tierra. Hoy, empequeñecido por el desmesurado afán de altura de los edificios de la ciudad, no resulta fácil visualizar lo que suponían aquellas torres que llegaron a constituirse en imagen de la ciudad. Desde las calles de Nueva York, las torres se verían como algo absolutamente fuera de escala y sólo cuando eran vistas enmarcando su tremendo vano adquirirían su verdadero sentido. Las torres se independizan del puente y los arcos adquieren un total protagonismo. «Destacándose contra el cielo, los arcos, a semejanza de los ventanales góticos, se proclaman a sí mismos, no como entradas, sino como entradas monumentales. Literalmente son puertas de acceso, pero también son iconos incorporando la función de puertas. Anuncian que pasar a través de ellas es algo más que atravesar una puerta ordinaria. Añaden *grandeur* al acto de cruzar por el puente» (Trachtenberg, 1965).

El puente llegó realmente a impresionar a los americanos. «Incluso el más sofisticado y análítico observador lo sintió así. Un editorial del *Scientific American* (22-IX-1883), se titulaba: *An yet the bridge is beautiful in itself*» (McCullough, 1972). Y permaneció durante muchos años como «sujeto de fascinación sin límites para todo el que lo veía». Poco a poco, el puente se fue transformando *realmente* en símbolo. Alan Trachtenberg, en su «Brooklyn Bridge: fact an symbol» (1965), relata maravillosamente cómo los poetas, literatos y pintores van, progresivamente, restando realidad (disminuyendo la importancia de su función) en sus versos, en sus novelas y en sus cuadros, hasta que todo un pueblo, a través de ellos, se ha apropiado del puente convirtiéndolo en un mito.

Quizás, John A. Roebling, su creador, fuera el más consciente de la doble función del puente. «En su pensamiento, el puente fue, simultáneamente, un hecho y un ideal» (Trachtenberg, 1965).

C) Puente de George Washington

El gran salto cuantitativo que supuso su construcción confirió a este puente el carácter de obra pionera. Fueron necesarios más de sesenta años de discusiones y proyectos para que la isla de Manhattan quedara unida a New Jersey a través del río Hudson. En 1921 se crea la New York Port Authority, organismo que aceleró este lento proceso y tuvo una decisiva influencia en su realización. Dos años más tarde, su ingeniero jefe, Othmar Ammann, escoge el lugar idóneo para la construcción del puente, y con un equipo formado por el propio Ammann, Leon Moissieff y Alston Dana como ingenieros y Cass Gilbert como arquitecto, termina el proyecto en el verano de 1927. En septiembre de ese mismo año comienzan las obras, que concluirán en octubre de 1931, ocho meses antes del plazo y con un coste menor del previsto.

Su vano fue el primero en superar el kilómetro, pero mayor dificultad suponían su gran anchura —ocho carriles— y su doble tablero, que fueron factores más decisivos en el diseño del puente. Su peso, mucho mayor de lo usual, hizo innecesaria la celosía de rigidez hasta el año 1962 en que se colocó el segundo tablero y tuvo gran influencia en la forma de las torres. Las innovaciones estructurales aportadas por la pila flexible (Puente de Manhattan) son ignoradas aquí, y en razón del efecto estabilizador de las cargas muertas frente a las sobrecargas —en relación 5 a 1— el diseño retoma características formales de las torres anteriores e insiste en su carácter masivo, como más apropiado a las monumentales proporciones de la obra.

Los primeros planos (Plowden, 1974) disponían unas torres mixtas de acero y hormigón como las más idóneas para hacer frente a tan elevado peso. Se pensaba construir primero la parte metálica y a los pocos años, cuando se montase el segundo tablero, se añadirían dos nuevos cables y se reforzaría la torre embebiéndola en hormigón. Esta idea levantó una fuerte polémica estructural y, un año más tarde, el proyecto definitivo incorpora «un refuerzo del esqueleto metálico de forma que pueda soportar por sí mismo las cargas finales, manteniendo el recubrimiento de hormigón y el chapado de

piedra como protección atmosférica del acero y acabado arquitectónico, respectivamente, aunque también contribuyen a aumentar el margen de seguridad de la torre» (Eng. News Record, 1927).

El crack de 1929, que marcó el comienzo de la gran depresión económica, desaconseja la construcción del tablero inferior y crea un clima poco propicio al gasto. El Puerto de New York considera más barato el mantenimiento periódico anual de la estructura metálica que recubrirla de hormigón y piedra, y organiza una campaña de prensa en favor de una «nueva estética» acorde con los nuevos avances estructurales. Leon Moissieff, componente del equipo de diseño y más tarde proyectista del puente de Tacoma, disiente de la opinión de sus compañeros: «Ya pasaron los tiempos en que la gente pensaba que sólo la piedra proporciona monumentalidad» (Reier, 1977). Ammann, en un informe solicitado por el puerto, sale en defensa de la idea primitiva, compartida con Dana y el arquitecto Cass Gilbert. Sus palabras son claras y rotundas: «El abajo firmante (Ammann) no resulta afectado por la crítica, basada en ideas teóricas y utilitarias, de que el recubrimiento constituye un camuflaje que oculta la verdadera estructura y su función. La cubrición de la estructura metálica no altera ni denigra su propuesta, más de lo que los muros exteriores de un moderno rascacielos destruyen la función del oculto esqueleto metálico, excepto para los no iniciados... El camuflaje es una manifestación esencial de la civilización y no es incompatible con la sinceridad y honestidad de intención, puesto que una parte esencial del esfuerzo humano se centra en crear un entorno estético, cuyo valor no puede expresarse en términos económicos».

En contra de la opinión de Ammann y Gilbert (figura 7), las torres quedaron sin recubrir, dejando visto algo que no estaba diseñado para ello. No sólo nos privaron de lo que, a juzgar por los dibujos de Gilbert, pudo haber sido el más impresionante monumento de la ingeniería contemporánea, sino que tomó nueva fuerza la insostenible corriente funcionalista, vagamente neoplatónica, de que lo matemático y empíricamente cierto debe también ser bello. En razón de tan confuso y peculiar argumento

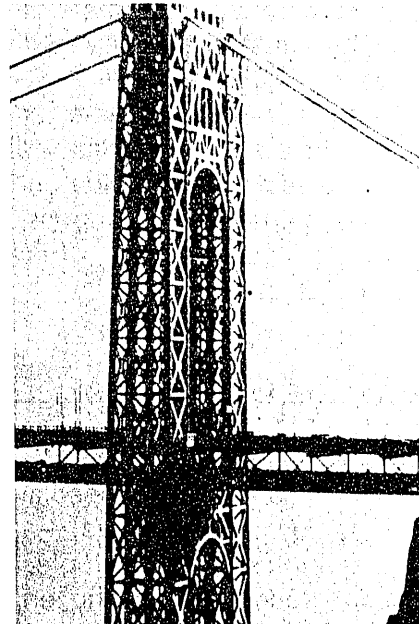
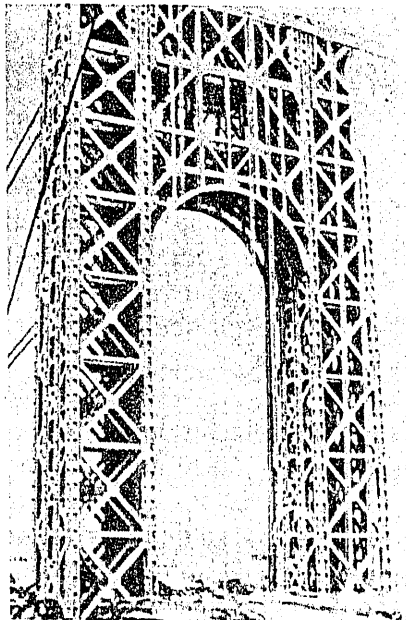
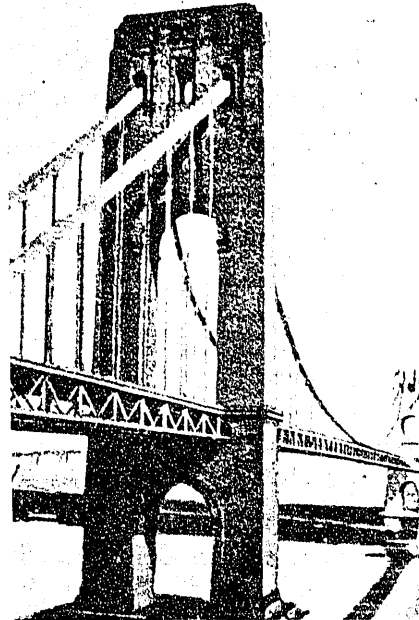
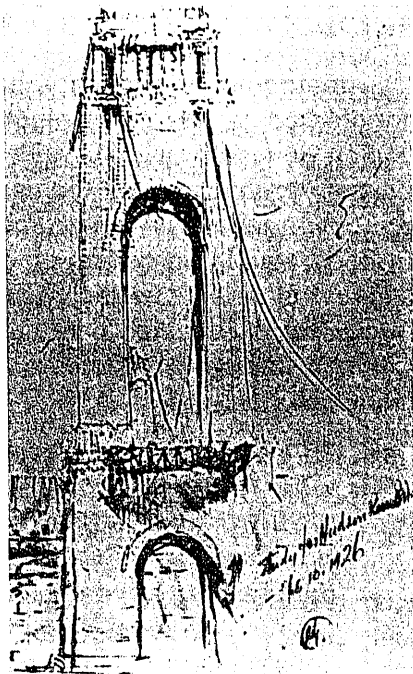


Fig. 7.—Puente de George Washington. Diseño y maqueta según Cass Gilbert.
La pila construida.

se justifica un cotidiano recorte presupuestario con un resultado formal pobre y vulgar, indigno de tan monumental estructura. El juicio de Condit (1961) es tajante: «El desnudo esqueleto metálico de las torres es poco atractivo, en sí mismo, sus proporciones carecen de gracia, no armonizan con el vano colgado y el encuentro

del arco con los elementos rectos está muy mal resuelto».

La controversia se ha mantenido viva hasta hoy, y las torres del puente colgante del Hudson siguen fomentando admiración o reserva, y son citadas en todas las polémicas sobre el funcio-

nalismo, aunque la historia no siempre es contada con excesivo rigor.

Por ejemplo, Gies, 1963, presenta los hechos de forma distinta: «El arquitecto diseñó unas torres embebidas en piedra, pero, en 1931, un buen número de críticos y amantes del arte protestaron manifestando que las torres quedarían mejor solamente de acero. Ammann decidió dejarlas y nadie ha lamentado la decisión...». Elisabeth Mock, en su famoso «The architecture of bridges» (1949), apunta: «La fachada fue omitida a causa de la protesta popular, pero los absurdos arcos permanecen como testimonio de la intención original». ¿Porqué llamó Mock absurdo a lo que constituye el *sello de identidad* del quehacer de un proyectista? ¿También son absurdos el puente del Bronx, el Candem, el Verrazano o cualquier otra obra de Ammann? Inglis, 1944, prescinde de la voluntad del diseñador y afirma tajante: «Sugerir que tan enorme carga podría ser soportada por una estructura de piedra, habría sido la perpetuación de una imperdonable, absoluta e inaudita mentira estructural». Shirley Smith (1964), en cambio, es más ecuánime: «Esta provisión (follarlas de piedra) fue, quizás, apropiadamente omitida pero las torres, con esas celosías tan cerradas, carecen de la agradable apariencia de otros recientes puentes colgantes».

EVOLUCION FORMAL DE LAS TORRES

Esbozados algunos problemas de diseño que presentan los puentes colgantes con especial referencia a sus torres y puestas de relieve —a través de estos tres ejemplos— las múltiples ramificaciones de cada proceso de diseño en particular, se puede intentar ya proceder a una cierta clasificación o tipificación formal de las torres. A la luz de lo anterior no es preciso insistir sobre la relatividad de estas clasificaciones. Desde luego, cada puente es una realidad histórica irreplicable, y las afinidades formales que aquí se señalan se deben entender —únicamente— como posibles referencias formales que la historia ha ido poniendo a disposición de los subsiguientes diseñadores.

METODOLOGIA

La metodología empleada para este estudio morfológico admite como hipótesis la universalización de las obras construidas a través de las revistas y publicaciones técnicas. Esto que parece obvio tiene gran importancia, pues implica que todo aquel que diseña un puente colgante, *conoce* todas las realizaciones anteriores. Durante la toma de datos para este estudio se ha podido validar esta hipótesis a través de dos constataciones:

- a) En las publicaciones técnicas más conocidas (Engineering News Record, Le Génie Civil, Annales des Ponts et Chaussées, Revista Obras Públicas, etc.) del pasado y del presente siglo aparecen regularmente artículos sobre el «estado actual de la construcción de...» con carácter recopilador, suficientes para garantizar una cierta teorización sobre el tema, puesta al día periódicamente.
- b) Todos los puentes importantes, aparecen referenciados o estudiados en profundidad en *todas* las revistas, a los pocos meses de su terminación. Esto garantiza la transmisión de la información a todos los niveles y se puede utilizar a su vez como índice de la importancia concedida a un puente en su época.

Esta primera hipótesis tiene una consecuencia inmediata: si el autor de un diseño, conoce —o posee todos los medios precisos para conocer— las soluciones anteriores a los problemas que a él se le plantean, la única posible vía de estudio de una tipología de puente predefinida, es la histórica. Esto, que vuelve a parecer obvio no ha sido aplicado nunca sistemáticamente. Los estudios tipológicos apuntan más hacia lo metafísico que hacia el sustrato histórico que ha posibilitado la aparición de un nuevo esquema. El propio Torroja no duda en afirmar que «el puente colgante es un arco invertido...» (Torroja, 1957), pero, aun tomando esta afirmación dentro de su contexto y en aras de la fácil comprensión de un esquema, se está ignorando que la primera explicación teórica que el hombre tuvo del arco fue precisamente la

proposición inversa, como ya vimos, y ésto altera totalmente la perspectiva del análisis ulterior(5). Sólo apoyándose en los sucesivos pasos dados por el hombre se podrá conocer el porqué de lo realizado pues, como bien dice Steinmman, «el constructor de puentes construye su obra —a sabiendas o no— a partir de las realizaciones anteriores que el hombre ha llevado a cabo» (Steinmman, 1941).

La siguiente dificultad a solventar es la elección de los puentes que se consideran importantes a efectos de la evolución de las formas. ¿Se deben valorar idénticamente las posibilidades o recursos formales que revela el Golden Gate, por ejemplo, y las de un puente de 30 m. de luz prácticamente desconocido, y construido en un rincón del Congo Francés? Aquí parece imprescindible un criterio-guía objetivo, para evitar la pretensión de validar nuestras intuiciones previas a través de una búsqueda de ejemplos defectuosa o escamoteadora. Una primera solución —tanteada en este estudio— es proceder a una búsqueda indiscriminada y, posteriormente, recortar esa muestra en función de alguna variable estadística derivada de los datos conseguidos. Esto no suele resultar posible a causa de la gran dispersión de estos datos, ya que sus fuentes —las revistas— utilizan unos criterios de inclusión de artículos que no tienen nada que ver con los objetivos de este estudio.

Más sugestivo resulta buscar un criterio de importancia en función de las luces consideradas como «grandes» en su época. Sobre todo para los puentes colgantes que siempre han sido considerados en relación a los grandes logros. «Medimos a los demás según ellos, cuantitativa y enfáticamente, y hacemos bien, pues ahí están como los más conseguidos» (Condit, 1961). Para cuantificar este calificativo de grandes y considerarlo dinámicamente, se ha seguido el siguiente proceso: con la lista de records de la tabla 1 se han formado 17 pares de valores de luces y fechas, obtenidos considerando la mitad de la luz y un retraso de veinte

años en la fecha. Con ellos se ha ajustado una curva y se ha considerado puentes grandes en cada época a los situados por encima de ella. La reducción de la luz y el retraso en el tiempo son coherentes con lo ya tratado respecto a importancia-permanencia y ambos valores —50 % y veinte años— se han fijado estimativamente. De esta forma, un puente colgante sería considerado grande actualmente si sobrepasa los 550 m. de luz, lo que parece bastante coherente. Con todo, el criterio se toma sólo a título de orientación y en el estudio se incluye algún otro puente próximo a estos límites aunque no incluido entre los grandes.

Con este criterio se separan los puentes de interés y se sitúan sus fotografías sobre una escala de tiempo. Se procede después a su agrupación por familias sin alterar su posición en el tiempo y luego se intenta recomponer el hilo vital de cada familia a lo largo del período estudiado, analizando en detalle y a veces con la ayuda de puentes no incluidos en la muestra los puntos conflictivos de cambio y nacimiento de nuevas formas.

MATERIALES Y COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS TORRES

Las torres de los puentes colgantes se han construido de madera, de hierro, de piedra y de hormigón. Aunque normalmente los estudios sobre puentes reducen estos materiales a una sucesión cronológica de sillería y acero, una primera visión de los puentes colgantes en estudio pone de manifiesto que en cualquier época coexisten puentes importantes con torres de distintos materiales. La madera, siempre olvidada en el estudio histórico de las estructuras, tiene un papel nada desdeñable. Por ejemplo, el primer puente colgante moderno de una cierta importancia, en Newburyport, tiene sus torres formadas por un entramado de madera forrado con tablazón a modo de pórtico doble y su tablero y la viga de rigidez añadida a posteriori, son asimismo de madera. Se han construido puentes con torres de madera de luz importante como el Clifton-Niágara record del mundo con 386 m. de luz, terminado en 1869 por Samuel Keefer, aunque casi todos han sido

(5) Como en cualquier otra metafísica, en la Razón y Ser se escamotea el argumento histórico y se nos explica el puente colgante, que es una forma natural, por medio del arco, que es un *invento* estructural que el hombre empleó durante cinco mil años sin comprender su comportamiento.

transformados posteriormente con materiales metálicos.

El hierro se empezó a emplear también muy pronto. Ya en 1823 se fundieron, en unos talleres de Sheffield, unas torres de hierro para dos puentes colgantes destinados a la isla de Bourbon. Estaban diseñados por Marc Brunel, padre del famoso Isambard K. Brunel, y se montaron provisionalmente en Sheffield, aunque no llegaron nunca a su destino definitivo. Tenían luces de 40,2 m. y un original sistema de cable inferior rigidizante. También en 1823 se termina el embarcadero de Brighton, con cuatro vanos colgantes de 78 m. y pilas en caballete, diseñado por Samuel Brown, y, en Francia, los puentes de Bry-sur-Marne (1832), Cubzac (1839), Seraing (1843) y Langeais (1849), todos ellos con pilas de fundición. En Estados Unidos los primeros son el puente de Pittsburg (1857), de Roebling, y el Point Bridge (1876).

El primer puente colgante con torres de acero es el puente de Lincoln sobre el río Ohio en East Liverpool, Ohio (USA), construido por Herman Laub de 1897 a 1899. A partir de él casi todos los grandes puentes se construyen con torres de acero, hasta que recientemente los constructores europeos han introducido en los grandes puentes colgantes las torres de hormigón habitualmente reservadas a puentes más modestos. [Tancarville (1960), Humber (1978).]

El comportamiento estructural de las torres sufrió a principios de siglo una transformación radical que tuvo una gran repercusión en su morfología. Antes, las torres se consideraban rígidas colocándose en su parte superior unas silleas sobre rodillos, que dan apoyo a los cables y permiten su movimiento para acoplarse a las deformaciones de las sobrecargas. Llegó un momento en que los ingenieros encontraron poco operativo este procedimiento pues al crecer la luz se hacían precisas grandes superficies de apoyo (ver la parte superior de las torres del puente de Williamsbrug), y prefirieron diseñar torres flexibles en las que el movimiento horizontal que precisa el esfuerzo no contrarrestado del cable, lo proveen las esbeltas torres. El puente de Manhattan (1909) fue el primer gran puente con torres flexibles. Posteriormente se introdujo la torre oscilante que fue menos em-

pleada y que formalmente casi no se distingue de la torre flexible.

Este avance significó, a nivel formal, una drástica reducción de los espesores de pilas en sentido longitudinal al puente, y condujo al abandono prácticamente total de la sillería para la construcción de torres, que ya empezaban a estar en desuso por motivos económicos. Con esta innovación, las torres de los puentes colgantes cambian totalmente de aspecto. Se hacen mucho más esbeltas para que su rigidez permita la necesaria deformación del cable y su altura se vuelve decisiva para el comportamiento del puente. La torre pierde así su tercera dimensión y se convierte en un elemento plano con un diseño de parámetros más implicados en el conjunto del puente.

PRINCIPALES FAMILIAS DE FORMAS

A pesar de ello las componentes arbitrarias de diseño siguen presentes en las torres de los puentes colgantes ofreciendo un vasto surtido de soluciones. Viene a demostrarse así, como lo personal prima irresistiblemente sobre lo funcional, resultando imposible determinar cual de las soluciones vigentes respeta mejor esas condiciones, pretendidamente objetivas, de funcionalidad.

Los proyectistas se muestran fieles a determinados esquemas y sus soluciones van evolucionando alrededor de éstos, configurando grupos o familias de formas. Las diversas situaciones culturales se van plasmando en cada esquema básico y enriquecen el repertorio de la familia, manteniendo vivo su principio inspirador. Se pueden detectar así, dentro de cada familia, tipo o esquema un proceso evolutivo muy dependiente de la situación cultural de cada época, sin que resulte clara una tendencia general en todas las torres.

Los primeros puentes colgantes de cierta importancia —con las salvedades ya expuestas— aparecen a principios del XIX. Desde entonces, se distinguen dos familias, de formas claramente dominantes, y una tercera, más tímida e imprecisa: las torres concebidas como arcos y las concebidas como pilastras independientes son las familias más definidas y entre

ellas aparecen los caballetes, titubeantes entre una y otra y, al final, subsumidos en ambas.

La familia más rotunda está constituida por las torres de los puentes colgantes diseñados a modo de arcos triunfales. Puertas, portalones, arcadas, castilletes bien clásicos, góticos, almenados o egipcios, se suceden a lo largo de los años formando la imagen típica de los puentes colgantes más o menos presuntuosos. Varía el remate superior, la forma del arco o sus proporciones, o bien, se añaden elementos decorativos o se simplifica al máximo el diseño, pero el esquema permanece invariable. Los cables se apoyan en las pilastras que se arriostran con un arco, pero el diseño está forzado para restar protagonismo al apoyo de los cables, primando en cambio la función de-paso-a-través-de, genuina de los arcos.

El primer puente de esta familia —el Unión Bridge con 137 m. en 1820— es casi una torre maciza horadada por un arco, con los cables apoyados en la parte superior. Una cornisa y el dibujo de las dovelas del arco son los únicos realces de diseño. Sólo siete años después, V. T. Clark termina el puente de Hammersmith, 122 m. en 1827, donde las torres se independizan de los cables, prolongándose casi la mitad más de la altura exigida por ellos. Al apoyarse estos en una altura inferior a la de la clave del arco, la torre adquiere un nuevo protagonismo asignándose un papel predominantemente monumental. En 1887, J. Bazalgette restaura este puente, de aire clásico y digno, convirtiéndolo en un templete victoriano en el que el diálogo del diseño con lo técnico ya se ha roto constituyéndose dos mundos distintos.

Esta familia de torres agrupadas en torno a la idea de arco, con todas sus connotaciones monumentales y hasta triunfales, se va multiplicando al pasar el tiempo y se empiezan a perfilar distintas subfamilias que, en algún caso, llegan al momento actual. Se identifican bien las torres de porte clásico con su arco de medio punto y su correspondiente cornisa y desarrollo superior más o menos monumental en función del emplazamiento. También las torres acastilladas con unas pilastras algo más destacadas del plano del arco y rematadas por formas almenadas o piramidales, según los casos. Los

arcos ojivales o, al menos, las torres con pretensiones o inspiración gótica tienen menor número de representantes, pero algunos son realmente importantes, como por ejemplo el puente de Brooklyn.

A principios de este siglo se empieza a perfilar un tipo de torre que dará después mucho juego. Se trata también de un arco, generalmente de medio punto, y con la suficiente altura para que, por encima de la clave y hasta la altura total de la torre se dispongan unos pequeños aligeramientos, a modo de troneras o ventanas-sobre-la-puerta, situados entre los dos apoyos del cable. Este subtipo se insinúa ya en el puente de Clifton, se formaliza en Oldendorf, se repite en Vernaison (233 m. de luz) y en Johns-Nievroz (200 m.); se copia con dudoso resultado en un sinnúmero de puentes algo más pequeños construidos entre 1900 y 1920, entre ellos el único puente colgante español con una cierta entidad en cuanto a torres en Amposta (134 m.); recibe la influencia funcional del puente de Manhattan y el empleo del acero en el puente de Lincoln (216 m. en 1899), para reaparecer en dos puentes de luz no muy grandes, Seven Street (135 m.) y Six Street (140 m.) en Pittsburg y en el algo más importante de St. Johns con sus 368 metros de luz donde todos los arcos son ojivales. Llega a su climax de la mano de Ammann, quien se lo apropia como algo personal y lo convierte en su marca de identidad con el puente de Bronx en Nueva York, —701 m. en 1939— un puente bellísimo diseño nunca debidamente apreciado por la proximidad de los puentes de Brooklyn, George Washington y Verrazano, donde reaparece el motivo que acaparan las candilejas.

La otra gran familia de torres está formada por las que se organizan como pilastras independientes para cada cable. Siempre suele haber —por razones obvias— un arriostramiento entre ambas, pero se minimiza su importancia por la vía del diseño o del empleo de otro material. El proyecto de Navier para los inválidos disponía unas pilas rematadas convenientemente por un capitel superior y arriostradas con una leve celosía metálica, casi invisible. Charles Ellet lo retoma en Fairmount (109 m., en 1842). John A. Roebling lo hace en el Niágara —para ferrocarril y carretera con 250 m. en 1855, un

logro decisivo en la evolución de puentes colgantes—, y con mayor carga decorativa y bastante menos fortuna es repetido en Chelsea (106 m. en 1858), en Cubzac, y en Pittsburg (244 m. en 1876) con pilas de fundición y finalmente en Lincoln (216 m. en 1899) con torres de *acero*.

A partir de aquí y contando con la innovación de la pila flexible, el arriostamiento entre pilas-tras adquiere una gran importancia, se convierte por derecho propio en elemento de diseño y da origen a tres grandes subfamilias: las cruces de San Andrés, los entramados rectos y el marco. Las tres subfamilias siguen hoy vigentes y han dado lugar, todas ellas, a importantes puentes.

La línea más tecnológica y, en principio, menos formalista es la constituida por torres arriostradas trasversalmente con cruces de San Andrés y en su seno cabe distinguir, todavía una tendencia más pura formada por las torres con arriostamientos exclusivamente diagonales como los puentes de Ambassador, Oakland, Lions Gate (vuelven los leones a los puentes), Chesapeake, Firth of Forth, etc., constituyendo quizá la familia de mayor coherencia de todas las apuntadas. Con un punto menos de rigor, y ejemplos no tan importantes, está la subfamilia de arriostamientos diagonales y horizontales formando sucesivos cuadros (tres o cuatro) en altura. Son los puentes de Bear Mountain, Philadelphia-Camden, Grand Mère. Con mucha mayor carga formal y rozando el *styling* se sitúan los puentes cuyos arriostamientos han sido perfilados o forzados para constituir falsos arcos eliminando el aire tecnológico de este tipo de arriostamientos. Los puentes de Mount Hope (366 m. en 1929) y Mid Hudson (457 m. en 1930) son buenos ejemplos de esta tendencia.

Otra subfamilia que parecía de menor consistencia, pero con un fuerte desarrollo en las últimas décadas, a causa del empuje de los constructores ingleses y de la utilización del hormigón, es la constituida por pilastras arriostradas por elementos horizontales rectos. Cuenta entre sus ejemplos con puentes tan importantes como el Golden Gate, el primer Tacoma, el Severn, el Bósforo y el Humber, actual record mundial de luz. Parece que el precio es ventajoso para el hormigón y cabe esperar nuevas

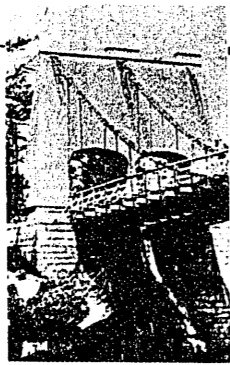
realizaciones en esta línea. Una rama de esta subfamilia con peor fortuna formal está constituida por los arriostamientos también horizontales, pero en celosía en lugar de alma llena. El puente de Triborough —casi increíble pastiche— el segundo Tacoma y el poderoso puente sobre el estrecho de Mackinack, de Steinmann, son los ejemplos más destacados de esta rama.

Los marcos, formados por dos pilastras y un travesaño horizontal superior, constituyen la tercera gran subfamilia que se caracteriza, en general, por la menor luz de sus puentes. Sólo uno rebasa la demarcación de luz y tiempo antes fijadas, el puente de Colonia-Rodenkirchen con 380 m. en 1945, y alguno más, como los de Wakato (367 m. en 1962) y Alvsborg (417 m. en 1967), se acercan a ella. Hay una evidente razón funcional para ello, pues el arriostamiento horizontal superior único puede resultar escaso en pilas altas, imprescindibles, a su vez, para puentes de mayor luz. Hay, sin embargo, multitud de puentes algo más pequeños con este tipo de torres en las que el travesaño superior adquiere una mayor importancia. Tancarville, con sus 608 m. en 1960 es el más grande y, también en Francia, se pueden señalar Rognonas, Ancenis, Burdeos, Bessières, etcétera. En ciertos casos se puede establecer un parentesco entre esta subfamilia y la de los arcos, cuando estos no son de medio punto sino rebajados, con un aspecto formal muy similar al aquí comentado. El doble puente colgante sobre el río Delaware es el mejor ejemplo de ello.

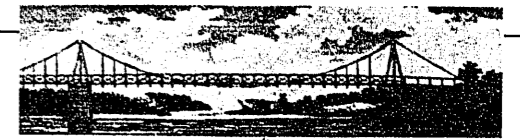
Por último un tercer tipo de escasa entidad. Se trata de los caballetes o pináculos construidos con barras rectas o celosías, en los que, las pilastras, aún constituyendo entidades diferenciadas, están muy relacionadas entre sí, bien por identidad de material con el arriostamiento o bien por la mayor importancia de este último sobre las pilastras. Los primeros puentes de madera forman parte de esta familia que tuvo su mayor utilización en puentes situados en lugares apartados sin ninguna pretensión de monumentalidad. Son ejemplos poco conocidos, aunque los hay de luces importantes como el puente de Manpini construido en 1900 con 314 metros de luz. La aparición de la pila flexible vació de contenido a este tipo de torres de puentes

1810

ESSEX-MERRIMAC - 1810, 74



UNION - 1820, 137

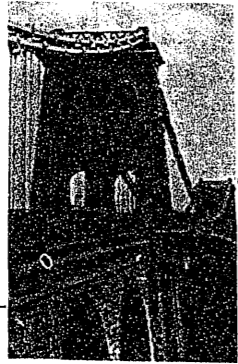
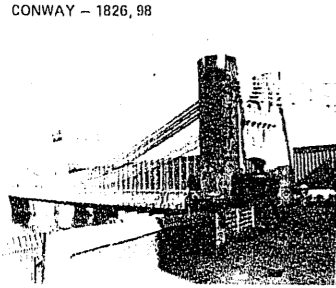


1810

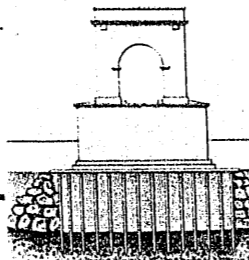
DISEÑO J. FINLEY

1820

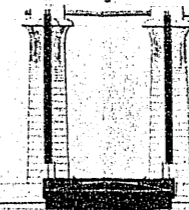
CONWAY - 1826, 98



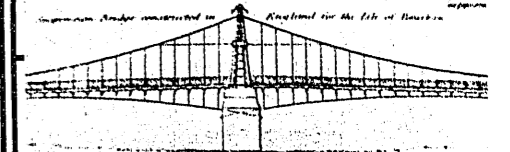
TOURNON - 1825, 85



INVALIDES (PARIS) - 1826, —



1820



BOURBON - 1823, 40

1830

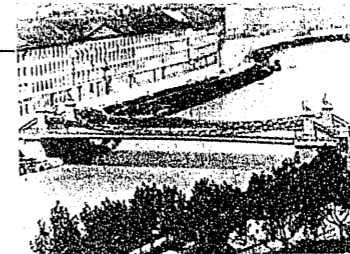
MENAI - 1826, 177



HAMMERSMITH - 1827, 122

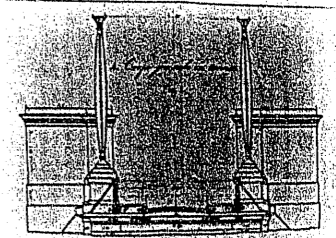


S/RHÔNE - 1825, 85



VIENNA - 1828, 95

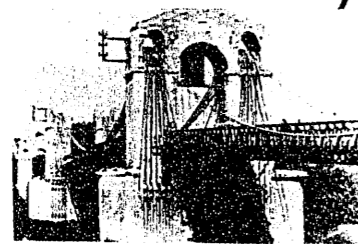
1830



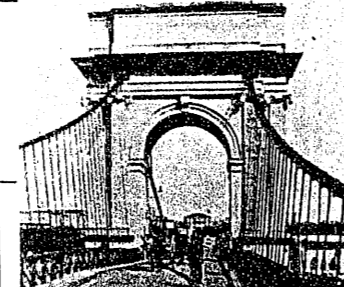
BRY-SUR-MARNE - 1832, 76

1840

LA CAILLE - 1842, 182

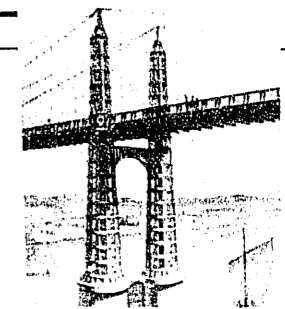


SAINT ANDEOL - 1830, 85



FRIBURGO - 1834, 273

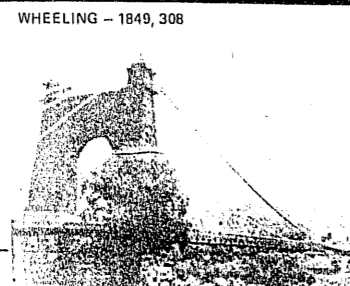
1840



CUBZAC - 1839, 109

1850

KIEW - —, —



WHEELING - 1849, 308



BUDAPEST 1845, 202

NIAGARA - 1855, 250

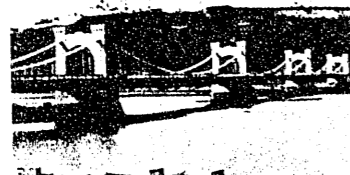


1850

PITTSBURGH - 1857, 105

1860

FREIHEITS - —, 126

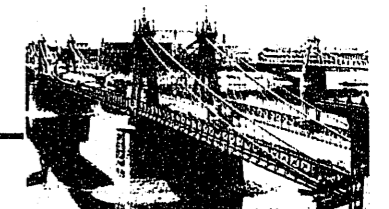


STADLEC - 1848, 95



CHELSEA - 1858, 106

1860



1870

CINCINNATI - 1867, 322

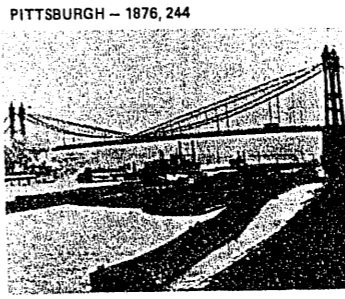


CLIFTON - 1864, 214

1870

1870

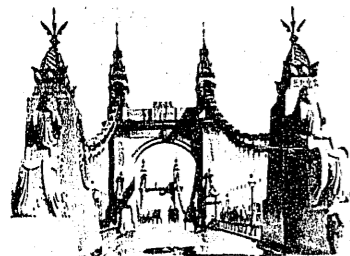
1870



PITTSBURGH - 1876, 244

1880

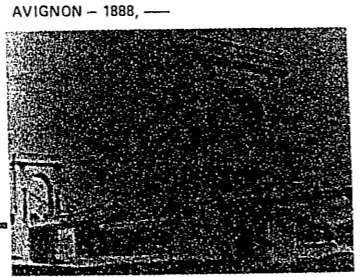
1880



HAMMERSMITH - 1887, 122



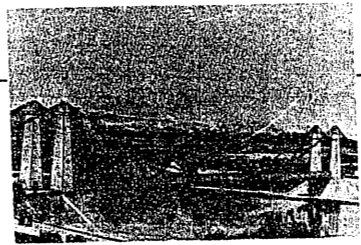
BROOKLYN - 1883, 486



AVIGNON - 1888, —

1890

1890



CANNES - 1894, 116

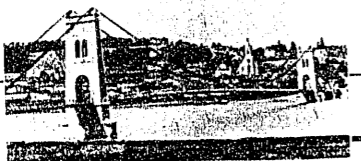


GRAND AVENUE - 1890, 122

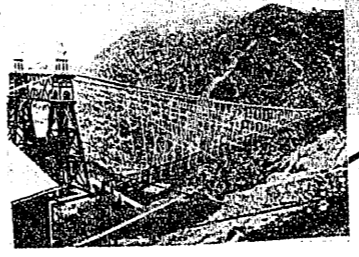
LINCOLN - 1899, 216

1900

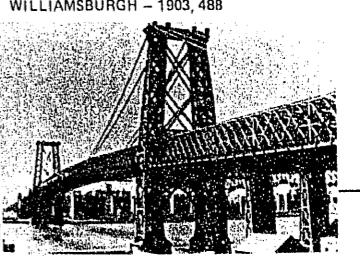
1900



VERNAISON - 1902, 233



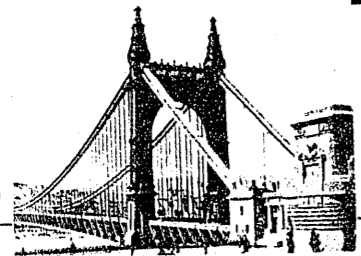
MAMPINI - 1900, 314



WILLIAMSBURGH - 1903, 488

1910

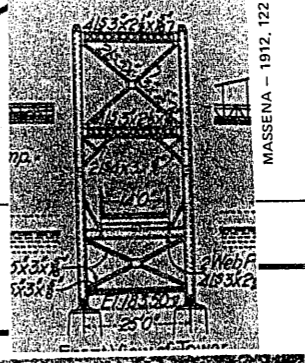
1910



BUDAPEST - 1903, 290



MANHATHAN - 1909, 448



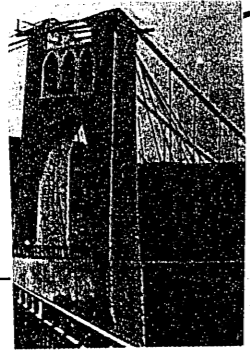
MASSENA - 1912, 122



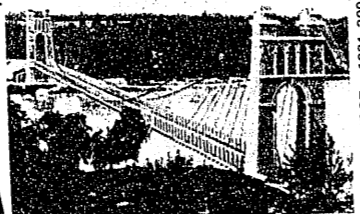
CASSAGNE - 1908, 156

1920

1920



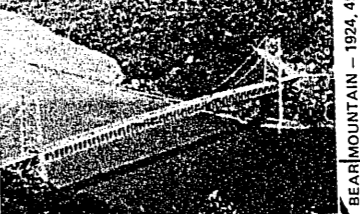
CONSTANTINE - 1911, 164



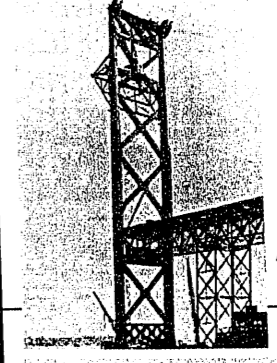
JONS-NIEVROZ - 1904, 200



BULKEY - 1914, 137



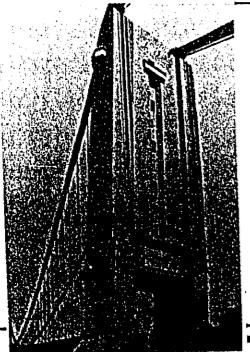
BEAR MOUNTAIN - 1924, 497



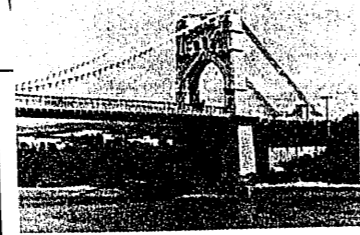
AMBASSADOR - 1929, 564

1930

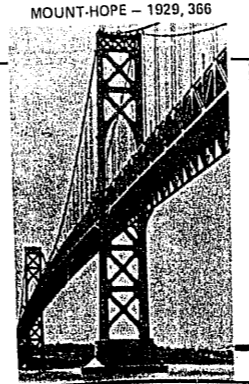
1930



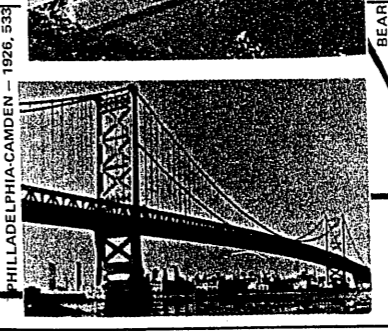
CAVAILLON - 1931, —



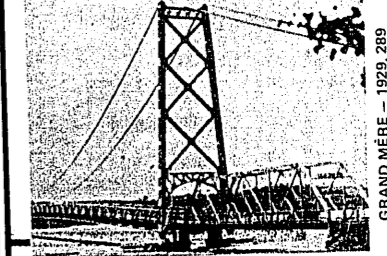
AMPOSTA - 1914, 134



MOUNT-HOPE - 1929, 366



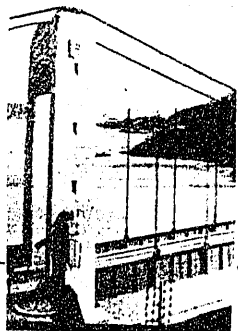
PHILADELPHIA-CAMDEN - 1926, 539



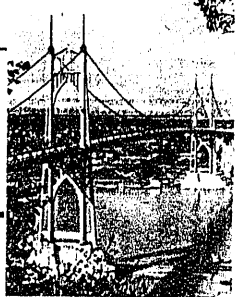
GRAND MÈRE - 1929, 289

1930

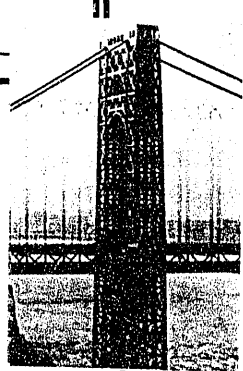
SAINT JOHNS - 1931, 368



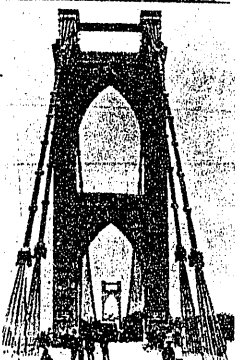
MIRABEAU - 1935, —



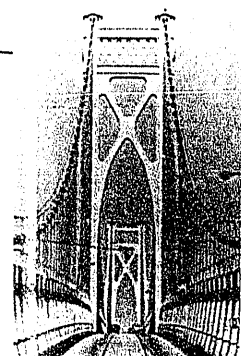
GEORGE WASHINGTON
1931, 1067



VEUREY - 1933, 209



BRONX-WHITESTONE - 1939, 701



MID HUDSON - 1930, 457



WALDO HANCOCK - 1931, 244



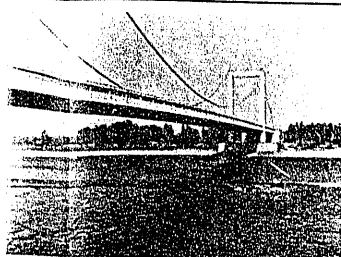
TRIDOROUGH - 1936, 421



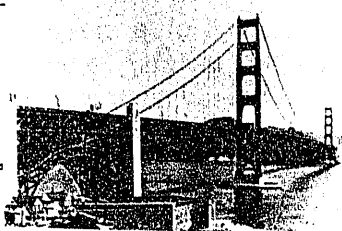
OAKLAND BAY - 1931, 678

—1930

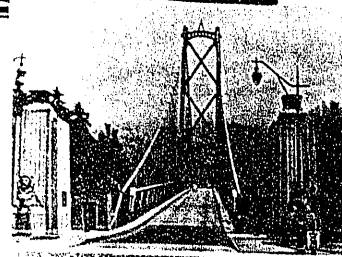
1940



COLONIA - 1945, 380 380



GOLDEN GATE - 1937, 1280



LION'S GATE
1939, 465

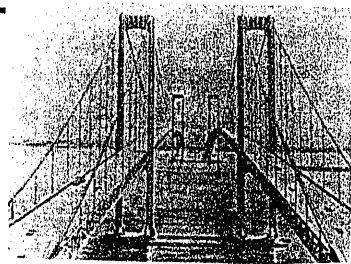
—1940

1950

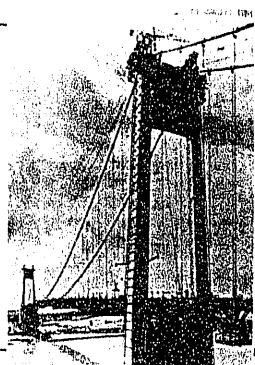
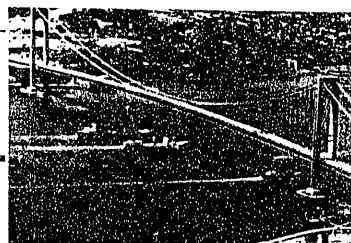
DELAWARE - 1951, 655



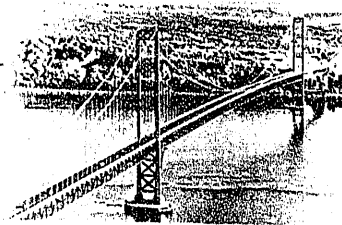
ORLEANS - 1967, 131



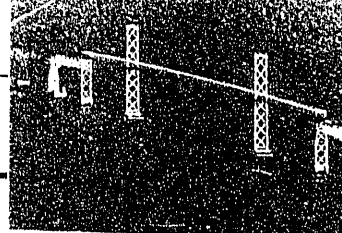
VERRAZANO - 1964, 1298



TANCARVILLE - 1960, 608



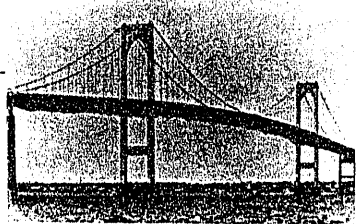
TACOMA - 1950, 853



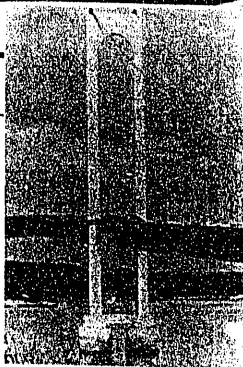
CHESAPEAKE BAY
1953, 488

—1950

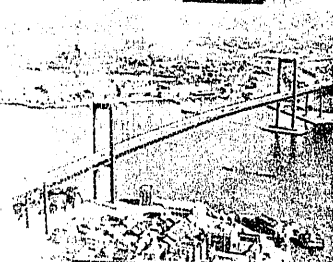
1960



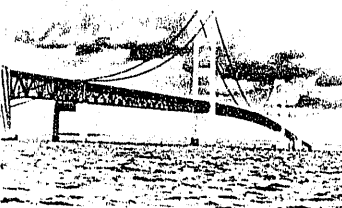
NEWPORT - 1969, 480



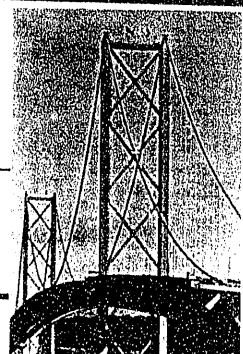
ANGOSTURA - 1967, 712



WAKATO - 1962, 367



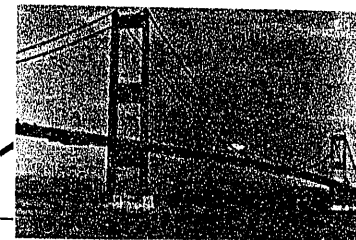
MACKINAC - 1957, 1155



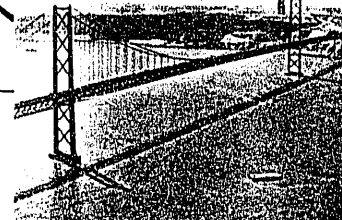
FORTH - 1964, 1006

—1960

1970



SEVERN - 1966, 987



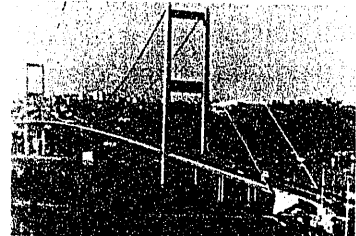
LISBOA - 1966, 1013

—1970

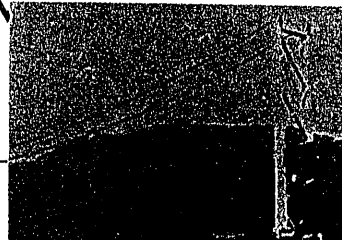
1980



BURDEOS - 1967, 394



BOS-BOSFORO - 1973, 1074



KANNON - 1972, 712

—1980



HUMBER - 198-, 1410

FUNCIÓN Y DISEÑO DE LAS TORRES DE LOS PUENTES COLGANTES

colgantes, quizás las de más tecnológico diseño, dejándose de utilizar en la década de los veinte.

CONCLUSIONES

Las torres de los puentes colgantes han demostrado tener, a lo largo de la historia, entidad suficiente para su estudio individualizado. Las intenciones volcadas en su diseño han sido complejas y muy relacionadas con razones extrafuncionales de prestigio, monumentalidad, clasicismo, etc., condicionando fuertemente su forma y apartándola de la estricta funcionalidad del sistema de cable, péndolas y tablero. Las emociones que provoca su contemplación son también, por esta y otras causas, complejas y el estudio pormenorizado de algunos ejemplos muestra cómo las soluciones nunca han sido únicas y las alternativas pueden ser consideradas como dispares.

Con estos antecedentes, no se puede afirmar la linealidad de la evolución morfológica de las torres de los puentes colgantes hacia una mayor simplicidad que sí está presente, en cambio, en otros elementos de ingeniería. El proceso evolutivo es más complejo y se muestra muy permeable a influencias estilísticas del momento. El análisis histórico morfológico de las torres revela una serie de ideas-fuerza distintas que han llegado hasta nosotros a través de varias oscilaciones estilísticas sin perder su primitiva esencia. A lo largo del estudio se confirma como los ingenieros pretenden que sus torres sean algo más que ingeniería y las convierten en los productos culturales que su época exige. No se las puede juzgar, por tanto, con criterios ingenieriles pues, en muchos casos, las torres son «verdaderos monumentos que no muestran sino la ambigüedad cultural de la época que los produjo» (Trachtenberg, 1965).

Hoy, nuestra ansia de símbolos no se dirige precisamente a los puentes y esto se marca en su diseño. Los logros tecnológicos no nos conmueven, más bien nos asustan. Quizás estamos ya hartos de tanta gesta constructiva y no somos receptivos a la épica de la realización. Podemos, sin embargo, volver a fascinarnos con su contemplación y, quizás, por la vía de nuestro

asombro, puedan estos puentes recuperar su mítico papel.

BIBLIOGRAFIA

- AGUILLO, M., 1977. «Un viaje por viejos puentes». *Hormigón y acero*, 1983.
- AMMANN, O. H., 1933. «The George Washington Bridge: Overall Conception and Development of Design». *Transactions of American Society of Civil Engineers*, vol. XCVII (97).
- BODY, G., 1976. *Clifton Suspension Bridge*. Monraeker Press. Bradford on Avon.
- BRUNEL, I., 1870. *The life of Isambard Kingdom Brunel*. Logmans Green and Co. London. Reprinted by David & Charles. Newton Abbot, 1971.
- CHALEY, J., 1839. *Pont suspendu de Fribourg (Suisse)*. París.
- CONDIT, C. W., 1960. *The american building art: The Ninetieth century*. Oxford University Press. New York.
- ENGINEERING NEWS RECORD, 1927. Design of 3500 ft. Suspension Bridge across Hudson River. *E. N. R.*, 11-8-1927, vol. 99: 6-216.
- GIES, J., 1963. *Bridges and Men*. Doubleday. New York.
- HOPKINS, H. J., 1970. *A Span of Bridges*. David & Charles, Newton Abbot.
- INGLIS, C. E., 1944. The aesthetic Aspect of Civil Engineering Design. In: *A record of six lectures on the Aspect of Civil Engineering Design*. The institution of Civil Engineers. London. Reprinted, 1955, 1970 y 1975.
- MCCULLOUGH, D., 1972. *The Great Bridge*. Simon and Schuster. New York.
- MEEKS, C. L. V., 1956. *The railroad station: an architectural History*. New Haven. 3.^a ed. Yale University Press. 1975.
- MOCK, E. B., 1949. *The architecture of bridges*. Museum of Modern Art. New York.
- MUNFORD, L., 1931. *The Brown Decades*. Dover, New York. Edición en castellano *Las décadas oscuras*. Ediciones Infinito. Buenos Aires, 1960.
- PAXTON, R. A., 1978. Menai Bridge (1818-1826) and its influence on Suspension Bridge Development. *Transactions of the Newcomen Society*, vol. 49: 87-110.
- PLOWDEN, D., 1974. *Bridges. The Spans of North America*. The Vikings Press. New York.
- PUGSLEY, Sir A., 1976. *The Works of Isambard K. Brunel*. Institution of Civil Engineers, London.
- REIER, S., 1977. *The bridges of New York*. Quadrant Press Inc. New York.