

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ACATLÁN

“FILOSOFÍA Y ESTÉTICA DE LOS PUENTES”

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

VLADIMIR ENRIQUE RODRÍGUEZ MORENO

ASESOR: ING. JOSÉ PEDRO AGUSTIN VALERA NEGRETE

NOVIEMBRE 2016

Santa Cruz, Acatlán, Edo. de México



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	7
OBJETIVO GENERAL	9
HIPÓTESIS	9
METODOLOGÍA	9
1. ANTECEDENTES.....	10
1.1 DEFINICIÓN DE PUENTE	10
1.2 HISTORIA DE LOS PUENTES.....	10
1.3 LOS PUENTES COMO SÍMBOLOS.....	21
2. TIPOS DE PUENTES	24
2.1 INTRODUCCIÓN	24
2.2 LA NATURALEZA COMO INSPIRACIÓN	25
2.3 CLASIFICACIÓN GENERAL	25
2.4 ALCANCES DE LAS FORMAS ESTRUCTURALES.....	27
2.5 PUENTES TIPO VIGA.....	28
2.5.1 Procesos Constructivos Comunes	29
2.5. PUENTES EN ARCO	31
2.5.1 Procesos Constructivos Comunes	34
2.6 PUENTES ATIRANTADOS	34
2.6.1 Procesos Constructivos Comunes	36
2.7 PUENTES COLGANTES	38
2.7.1 Procesos Constructivos Comunes	40
2.8 OTROS TIPOS DE PUENTES	40
3. ESTÉTICA DE LOS PUENTES.....	43
3.1 IDEAS FUNDAMENTALES EN EL DISEÑO DE UN PUENTE ESTÉTICO.....	43
3.1.1 Todos Los Puentes Generan Un Impacto Estético.....	43

3.1.2 La Gente Tiene Su Opinión Sobre La Belleza De Un Puente.....	44
3.1.3 Los Ingenieros Deben Ser Responsables Del Impacto Estético De Sus Puentes	44
3.1.4 Los Ingenieros Deben Considerar La Estética Equilibrada Con Resistencia, Seguridad Y Costo.....	44
3.1.5 La Habilidad Artística Puede Ser Adquirida Y Desarrollada Por Ingenieros	46
3.2 TEORÍA DEL ARTE ESTRUCTURAL	46
3.3 EL ARTE DE ROBERT MAILLART	51
4. DISEÑO CONCEPTUAL.....	55
4.1 INTRODUCCIÓN	55
4.2 INGENIERÍA CONCEPTUAL	56
4.2.1 El Contexto	58
4.2.2 Conocer El Sitio	58
4.2.3 Geometría.....	59
4.2.4 Superestructura	60
4.2.5 Subestructura	61
4.3 APROVECHAMIENTO DEL ESPACIO	64
4.3.1 El Espacio Alrededor Del Puente	64
4.3.2 El Espacio Debajo Del Puente	65
CONCLUSIONES	67
GLOSARIO.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	73
PÁGINAS WEB.....	75
FOTOGRAFÍAS.....	76

DEDICATORIA

A mis padres: Olga Yanira Moreno y Joaquín Rodríguez Guerrero. No hay palabras suficientes para agradecerles todo lo que han hecho por mí y nuestra familia. Por su apoyo y amor incondicional, su paciencia y cariño que me han mostrado a lo largo de mi vida, les estaré siempre agradecido. Sus enseñanzas han sido la base para lograr cada uno de mis objetivos. A ellos, mi amor y eterno agradecimiento.

En cualquier lugar y en cualquier momento, pero no sin ellos.

A mi hermano: Ivan Francisco Rodríguez Moreno, cuya relación nos ha hecho crecer fuertes juntos.

A mis amigos que a pesar de los años han estado siempre conmigo: Víctor Serrano, Liliana García, Diego Arenas, Manuel Díaz y Andrea Ramírez; a mi amigo de toda la carrera Christian Pita y a los compañeros que siguieron; y a Stephanie Melissa, por su amor y comprensión.

A Darío A., por su tiempo y conocimiento transmitido.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Estudios Superiores Acatlán de la Universidad Nacional Autónoma de México, orgullosamente *alma mater* de mi padre y ahora también mía, donde tuvimos el honor de formarnos como universitarios.

A mi asesor de tesina, el Ing. José Pedro Agustín Valera Negrete, por su apoyo en la realización de este trabajo. Por su tiempo e inmensa paciencia, muchas gracias.

A los integrantes del sínodo por su tiempo, atención y contribuciones como partes fundamentales en la culminación de este proyecto.

The Golden Gate Bridge

I am the thing that men denied,
The right to be, the urge to live;
And I am that which men defied,
Yet I ask naught for what I give.

My arms are flung across the deep,
Into the clouds my towers soar,
And where the waters never sleep,
I guard the California shore.

Above the fogs of scorn and doubt,
Triumphant gleams my web of steel;
Still shall I ride the wild storms out,
And still the thrill of conquest feel.

The passing world may never know
The epic of my grim travail;
It matters not, nor friend or foe –
My place to serve and none to fail.

My being cradled in despair,
Now grown so wondrous fair and strong,
And glorified beyond compare,
Rebukes the error and the wrong.

Vast shafts of steel, wave-battered pier,
And all the splendor meant to be;
Wind-swept and free, these, year on year,
Shall chant my hymn of Victory!

Joseph Baermann Strauss, 1937.

INTRODUCCIÓN

El matemático inglés Isaac Newton (1643-1727) acertadamente dijo: “El hombre se dedica a construir demasiados muros y no suficientes puentes.” Aunque esta frase puede ser interpretada de muchas maneras, de la misma se puede apreciar la función de los puentes, a diferencia de los muros –que sirven para dividir terrenos, ciudades, regiones, pueblos y hasta países- los puentes han funcionado para propiciar la unión.

Así, desde la primera casualidad, cuando un ser humano colocó una piedra en forma de laja o un tronco sobre una pequeña corriente de agua para salvar un abismo, el objetivo de los puentes ha sido unir dos puntos de tierra separados por un accidente geográfico. Sin embargo, aparte de esta función práctica, los puentes también se han manifestado como símbolos que emiten mensajes, los cuales pueden variar de acuerdo con la época. Un puente de piedra puede asociarse con una situación romántica, mientras que uno colgante puede ser referencia que identifique a una ciudad.

Frecuentemente la unión se asocia con la fuerza y lo contrario, la fragmentación, con debilidad o vulnerabilidad. Como elementos de unión, en la antigua Roma los puentes eran parte integral de su sistema carretero –que se extendía sobre gran parte de Europa, una porción de lo que hoy se conoce como medio oriente y casi todo el norte de África- y al mismo tiempo representaban, en parte, la grandeza y el poderío del imperio. Después de la caída del Imperio Romano en el año 476 d.C., en la edad media, muchos puentes de la época del imperio, a los que se consideraron puntos estratégicamente débiles, fueron demolidos para utilizar los ríos como defensas naturales de los feudos. Por otro lado, durante la misma época, los sacerdotes encargaban la construcción de puentes para hacer honor a sus deidades y en beneficio de las comunidades.

Inevitablemente, los cambios de significado y propósito, han sido acompañados por cambios de forma. El desarrollo de técnicas y métodos modernos, tanto de construcción como de análisis y diseño, han permitido

construir puentes cada vez más esbeltos y capaces de cubrir grandes claros, sin menoscabo de la estética, en lugar de los pesados y voluminosos, aunque casi siempre hermosos, puentes de mampostería y tabique de antaño.

La filosofía de los puentes modernos determina en gran medida su apariencia estética, y, consecuentemente, el impacto visual y emocional que producen al espectador y usuario. Sin embargo, muchas veces la economía y la política determinan, con resultados desafortunados, si se construyen puentes convencionales o si terminan siendo una obra completa de arte y ciencia.

Los puentes, por sí mismos, son obras de trascendencia e importancia económica, histórica y social. Sin embargo, cuando alcanzan niveles estéticos notables, resaltan y no cansa contemplar su grandeza. Este trabajo pretende principalmente integrar un conjunto de conceptos históricos, filosóficos y estéticos al diseño de puentes, que sirvan al ingeniero como una fuente de ideas que, a su vez, le permitan usar a su favor aquellos obstáculos que presente el medio físico y social para que al final, cualquier puente resulte, en lo posible, una obra de arte.

OBJETIVO GENERAL

Analizar la trascendencia histórica y social de los puentes y describir el principio estructural de los mismos, así como explicar los criterios y procesos para proyectar y diseñar puentes agradables a la vista del espectador, integrando los conceptos de la estética, filosofía e ingeniería que contribuyen a su importancia como medio de comunicación y fuente de inspiración.

HIPÓTESIS

En este trabajo se intentará integrar los conceptos de ingeniería estructural, filosofía, historia y estética dentro de un objetivo integral: los puentes. Además, se intentará responder las siguientes preguntas: ¿cuál es la importancia de un puente?, ¿por qué es importante diseñar puentes estéticos?, ¿qué criterios se deben tener en cuenta al proyectar un puente estético?

METODOLOGÍA

El enfoque de este trabajo se centra en una extensa recopilación de información e ideas que integran los conceptos de historia, filosofía y estética en relación al área de la ingeniería de puentes. La metodología se concentrará principalmente en la revisión de la bibliografía que se tiene disponible.

Se realizará un análisis exhaustivo de la información obtenida así como una interpretación de las distintas teorías que presentan los autores sobre la estética e ingeniería de puentes con el fin de enriquecer sus ideas y complementarlas con algunas propias.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

“Un ave que vuela sobre el Rin no conoce fronteras. El desafío es lograr esto sobre la tierra.”

- Joachim Beck. Director del Euro Instituto en Alemania

OBJETIVO. Proporcionar un contexto histórico de la evolución de los puentes, así como las razones de su existencia.

1.1 DEFINICIÓN DE PUENTE

Un puente es el conjunto formado por su subestructura y superestructura. Su finalidad es salvar claros para superar accidentes geográficos tales como ríos, bahías, barrancas, valles u otros obstáculos naturales o antropogénicos. Un puente transmite las cargas hacia sus cimientos, y la forma en que esto ocurre depende de su diseño estructural.

Los puentes permiten el paso de vehículos y peatones favoreciendo la comunicación entre comunidades y facilitando su desarrollo económico y social. Permiten, aunque de manera indirecta, el enriquecimiento de la diversidad cultural.

1.2 BREVE SEMBLANZA HISTÓRICA DE LOS PUENTES

Es incierto cómo nació el concepto de puente. Algunos creen que debió nacer de una casualidad, cuando el tronco de un árbol cayó sobre un río y un hombre lo usó para cruzarlo. Ese tronco se convirtió en un puente natural. Sin embargo, la primera idea debió ocurrir cuando el hombre convirtió este modelo natural en uno

artificial, proyectando y construyendo puentes en sitios cada vez más complejos y desafiantes.

La construcción de puentes es una actividad antigua. Los primeros puentes eran estructuras sencillas de madera y piedra. Generalmente eran hechos colocando rocas, unas encima de otras, para cubrir claros cortos sobre arroyos o ríos poco profundos. Un ejemplo de este tipo de puente se encuentra en Exmoor, Inglaterra (figura 1.1), el cual fue construido en el año 1000 a.C. y actualmente sigue en servicio. Posteriormente con la invención del arco, por los etruscos, en el año 700 a.C. se pudo construir puentes con claros más largos.¹



Figura 1.1 Tarr Steps en Exmoor, Inglaterra, 1000 a.C.²

Los puentes han tenido una participación importante en asuntos militares. En el año 480 a.C el rey persa, Jerjes (519 – 465 a.C.), hijo de Darío I, ordenó construir dos puentes flotantes (figura 1.2) en el estrecho de Helesponto, ahora estrecho de los Dardanelos, con el fin de invadir Grecia. Para construir el puente más largo se usaron 360 pontones y en la construcción del más corto 314, cubriendo longitudes de 3.87 y 3.39 km respectivamente, según Frederick

¹ Jensen, Jens Jacob. "History of bridges. A philatelic review." Noruega. p.1.

² http://www.picturesofengland.com/England/Somerset/Liscombe/Tarr_Steps

Maurice.³ Adelante en este mismo capítulo, se incluyen más comentarios al respecto.



Figura 1.2 Puente del Helesponto, 480 a.C.⁴

Los romanos por su lado dominaban el arte de la construcción de puentes y también los usaban con fines militares. Con el uso de arcos semicirculares, lograron cubrir hasta 40 m de longitud. La expansión del imperio romano y la necesidad de una buena comunicación permitieron un desarrollo importante en la construcción de puentes y acueductos (figura 1.3).

³ Baker, Peter. "Crossing the hellespont: a study in ancient logistics." VI Classics Colloquium, 2005. p.5.

⁴ <http://www.johnstockmyer.com/mwcc/wcilect/11.htm>



Figura 1.3 Acueducto de Segovia, España, 100 d.C.⁵

Pero los ingenieros militares romanos no dependían solamente del uso del arco para construir puentes. En el año 55 a.C., Julio César (Roma, 100-44 a.C), consideraba inminente una invasión de los germanos a la Galia, territorio hoy ocupado por Francia y Bélgica. La situación ameritaba acción. Decidió cruzar el río Rin para intimidar y disuadir a sus oponentes. Los ubios, tribu germano-celta, aliada de César, le ofrecieron suficientes botes para cruzar su ejército. Sin embargo Julio César creyó que hacer esa maniobra era demasiado arriesgado y poco acorde con su estatus y la dignidad de Roma.⁶ Por increíble que parezca, decidió construir un puente.

De acuerdo con el propio César, 10 días bastaron para concluir la construcción del puente de madera (figura 1.4) y 18 más para incendiar las aldeas de los germanos, castigar a los sugambros y liberar a los ubios. Considerando que había obtenido suficiente gloria, César y su ejército regresaron a Galia por el mismo puente y de inmediato procedieron a su destrucción.⁷ En su obra,

⁵ <http://coordenadasgps.webnode.es/products/acueducto-de-segovia/>

⁶ Julio Cesar. *Comentarios a la guerra de las galias*. España. Alianza Editorial, 2002. p.143.

⁷ Op. Cit. *Comentarios a la...* p. 145

Comentarios a la Guerra de las Galias, Julio Cesar describe a detalle el método utilizado para construir el puente. Por supuesto, tanto los puentes de Jerjes como este de César fueron obras de carácter provisional. Sin embargo, los romanos construyeron miles de puentes y de ellos existen en Europa alrededor de 900, de los cuales la mayoría fueron construidos usando el famoso arco romano.⁸



Figura 1.4 Modelo del puente de Julio Cesar sobre el Rin, 55 a.C.⁹

En oriente, China particularmente, el desarrollo de puentes tuvo avances significativos. La construcción de canales hizo necesario recurrir al uso de puentes para unir los caminos que quedaban interrumpidos. Los materiales comúnmente utilizados eran la piedra y madera, sin embargo, en el siglo VII los chinos lograron usar el hierro fundido para unir segmentos de piedra. Este método fue utilizado para la construcción del puente Anji (figura 1.5), en Hebei, construido en el año 605 d.C y que aún está de pie después de sobrevivir numerosas guerras, inundaciones y sismos.¹⁰

⁸ Chung C. Fung y Shuqing Wang. *Computational analysis and design of bridge structures*. Estados Unidos. Taylor & Francis Group, 2013.

⁹ <http://ancientrome.ru/art/artworken/img.htm?id=6536>

¹⁰ Op. Cit. *Computational analysis and...* p. 3.



Figura 1.5 Puente Anji, China, 605 d.C.¹¹

Contrario a lo que se pudiera suponer, el puente colgante es un tipo de estructura relativamente antigua. Se sabe que en Sudamérica se conocía esta clase de puentes, hechos con sogas, antes de su descubrimiento por los europeos.¹² Sin embargo, el primer puente suspendido en que se usaron elementos metálicos, fue construido en el año 65 d.C, en China.¹³ Cabe mencionar que en la actualidad los chinos siguen sorprendiendo con su ingeniería, siempre en constante innovación, y que han construido algunos de los puentes más impresionantes y más grandes del mundo. Entre estos se encuentra el puente Qingdao Haiwan (figura 1.6), el cual fue concluido en el año 2011.

Después de la caída del imperio romano en 476 d.C., la construcción de puentes se vio severamente afectada, por no decir interrumpida, en el conjunto de los territorios que se convertirían lo que conocemos como Europa. Sin embargo, durante la Edad Media los sacerdotes se encargaban de construir puentes de mampostería en beneficio de las comunidades. Esta práctica fue adoptada por los

¹¹ <http://www.chinahighlights.com/china-trains/beijing-to-guangzhou-train.htm>

¹² Drewry, Charles Stewart. *A memoir on suspension bridges...* Leopold Classic Library. p. 1.

¹³ Jean-Paul Lebet y Manfred A. Hirt. *Steel bridges. Conceptual and structural design of steel and steel concrete composite bridges.* Suiza. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. p. 31.

reyes, para su beneficio económico –cobraban peajes y tarifas en los puentes- y aumentar su poder político. Sin embargo, también hubo avances tecnológicos durante esta etapa de la historia de Europa supuestamente “oscura”. Los arcos elípticos fueron desarrollados durante esta época, lo cual permitió cubrir claros aún más largos.



Figura 1.6 Puente Qingdao Haiwan en China, 2011.¹⁴

No fue hasta el Renacimiento (siglos XV-XVI) que el arte de diseñar puentes tuvo importantes avances gracias a la contribución científica de grandes mentes de esa época. Leonardo da Vinci (Italia, 1452-1519), Gerolamo Cardano (Italia, 1501-1576), Galileo Galilei (Italia, 1564-1642), por mencionar algunos, aplicaron la estática heredada por de los antiguos griegos a todo tipo de proyectos. Posteriormente, Isaac Newton (Inglaterra, 1643-1727), Gottfried Leibniz (Alemania, 1646-1716) y los hermanos Bernoulli (Suiza) trabajaron con el cálculo infinitesimal,¹⁵ lo cual permitió una evolución rápida y más científica del diseño y construcción de puentes. Sin embargo, la influencia de sus trabajos tuvo mayor impacto en el diseño estructural hasta el siglo XVIII.

¹⁴ <http://architectism.com/the-worlds-longest-sea-bridge-the-jiaozhou-bay-bridge/>

¹⁵ Xanthakos, Petros P. *Theory and design of bridges*. Estados Unidos. John Wiley & Sons Inc., 1994. p.1.

Hasta entonces, en gran medida, el proyecto y construcción de puentes eran meramente empíricos. Pero debido al crecimiento de las ciudades, aparejado con la demanda de obras nuevas, y los escasos recursos, todo es en conjunto, propició que el antiguo arte de hacer puentes adoptara la ciencia de la mecánica.

Como consecuencia de lo anterior, surgió la revolución industrial y con ella la introducción del acero como material de construcción. En particular, la construcción de puentes se vio beneficiada de este avance tecnológico en la segunda parte del siglo XVIII. En 1779, en Coalbrookdale, Inglaterra, se construyó el primer puente de acero (figura 1.7). Este puente fue concebido y construido por un herrero de nombre Abraham Darby, el cual consta de cinco arcos de acero que cubren un claro de 30 metros.¹⁶ La similitud geométrica del puente de Coalbrookdale con los viejos puentes romanos de arco difícilmente puede pasar desapercibida.



Figura 1.7 Puente de Coalbrookdale, Inglaterra, 1779.¹⁷

El concreto reforzado vino a complementar el uso del acero en el diseño y construcción de puentes y otras estructuras. En su forma natural, este material venía siendo utilizado desde los tiempos de los romanos. Sin embargo, fue hasta el siglo XIX cuando surgió la idea de reforzarlo. Curiosamente, la idea básica fue

¹⁶ Op. Cit. *Steel bridges. Conceptual...* p. 32.

¹⁷ <http://www.worldarchitecturemap.org/buildings/coalbrookdale-iron-bridge>

creada, en 1849, por un jardinero francés de nombre Joseph Monier, quien combinó una malla de hierro con el concreto que utilizaba para hacer macetas.¹⁸ Monier, a diferencia de otros que también experimentaron con el reforzamiento del concreto, vio enormes posibilidades en esta nueva tecnología y se dedicó a promoverla extensivamente. Debido a que el concreto reforzado tiene características de agrietamiento y deflexiones limitadas, el concreto presforzado fue introducido en 1927.¹⁹

Desde su invención, el concreto presforzado ha dado lugar a una especie de renacimiento del diseño de puentes. Su principio es simple: se crean fuerzas de compresión en aquellas zonas propensas a tensionarse mediante cables de acero, los cuales son sometidos a esfuerzos de tensión antes de colar la pieza de concreto. Esta técnica tiene una ventaja adicional sobre la tradicional, pues permite tener elementos estructurales más esbeltos y por ende más ligeros y eficientes. En la figura 1.8 se compara el comportamiento del concreto reforzado y el presforzado antes y después de la aplicación de una carga.

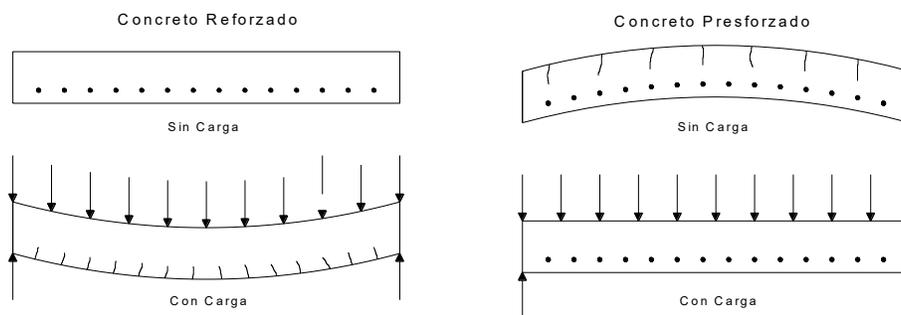


Figura 1.8 Comportamiento del concreto reforzado y presforzado.²⁰

Un avance significativo en la tecnología de puentes fue la sustitución de las cadenas de hierro por puentes suspendidos por cables. En el siglo XIX, en Europa, el puente llamado pasarela de Sanit-Antoine fue el primer puente

¹⁸ Edward Denison e Ian Stewart. *How to read bridges. A crash course in engineering and architecture*. Estados Unidos, Rizzoli International Publications Inc, 2012. p. 30.

¹⁹ Op. Cit. *Theory and design...* p.1.

²⁰ Tomada de Edward Denison e Ian Stewart. *How to read...* p. 31

suspendido por cables, el cual fue diseñado y construido en 1823 por el ingeniero de puentes suizo Henri Dufour (1787-1875).²¹ A partir de entonces, el número de puentes colgantes creció exponencialmente y para finales del siglo XIX se logró, mediante ésta técnica, cubrir claros de hasta 500 m. Por supuesto, la audacia de los ingenieros no se detuvo y para el final de la tercera década del siglo XX ya existían puentes que rebasaban claros superiores a 1,000 m. El primer ingeniero en conseguir que un puente tuviera más de un kilómetro de longitud fue Othmar H. Ammann (Suiza, 1879-1965), quien diseñó el puente George Washington en Nueva York, el cual, inevitablemente, sería superado en longitud 5 años después por el puente Golden Gate ubicado a la entrada de la bahía de San Francisco.²² Éste último cuenta con un claro principal de 1,280 m, 27 m de ancho y una longitud total de 2,737 m.

Durante mucho tiempo los puentes colgantes han ostentado la corona de ser los más grandes e impresionantes del mundo y, probablemente, seguirá siendo así por mucho tiempo más. Sin embargo, pudieron ser desbancados por los puentes atirantados, los cuales durante las últimas décadas del siglo XX experimentaron mejoras sorprendentes. Aunque los primeros puentes atirantados fueron construidos a principios del siglo XX y cubrían claros relativamente cortos, durante la segunda mitad de dicho siglo, superaron los 500 m. Actualmente los puentes atirantados compiten, tanto en tamaño como belleza, con los puentes colgantes concebidos en los últimos 100 años. Un ejemplo de esto es el puente Russky, el más largo de este tipo hasta hoy construido con un claro principal de 1104 m, que se construyó en el año 2012, en Vladivostok, Rusia (Figura 1.8).

²¹ Op. Cit. *Steel bridges. Conceptual...* p. 32.

²² Op. Cit. *Steel bridges. Conceptual...* p. 35.



Figura 1.9 Puente Russky en Vladivostok, Rusia, 2012.²³

Aunque en la actualidad los puentes colgantes son los más económicos cuando se trata de cubrir claros muy largos, su construcción se ha vuelto poco común en comparación con la frecuencia con que se construyen puentes atirantados. Si se trata de claros cortos o medianos, estructuralmente se prefiere diseñar y construir puentes tipo viga, sean de acero o concreto reforzado. Sin embargo, últimamente se diseñan puentes híbridos, los cuales constan de elementos estructurales tanto de acero como de concreto reforzado.

Recientemente, incluso el vidrio se ha utilizado cada vez más como material de construcción para puentes en el diseño de interiores moderno o bien como puentes peatonales que funcionan como atractivos turísticos (figura 1.10). Así como estos materiales han revolucionado la construcción de puentes en nuestro tiempo, a corto plazo la mejora de las técnicas convencionales dará lugar a estructuras más grandes y más eficientes, mientras que a largo plazo los

²³ <http://rusbridge.net/>

materiales y tecnologías nuevas crearán tipos estructurales innovadores que seguirán desafiando los límites de la ingeniería y los retos de la naturaleza.



Figura 1.10 (Izquierda) Puente suspendido de vidrio dentro del Museo de Ciencia de Londres. (Derecha) Puente Skywalk, a 1.2 km de altura en Arizona, Estados Unidos.²⁴

En los últimos 200 años el arte de construir puentes ha evolucionado extraordinariamente. En estos últimos dos siglos se ha hecho lo que no se logró desde que aquel tronco de árbol cayó sobre un río y permitió al hombre cruzarlo. Con los nuevos métodos de análisis y diseño computacional, la mejora de los métodos constructivos y el desarrollo de materiales más resistentes y equipo de levantamiento y transporte más potentes, es claro que aún no presenciamos lo mejor de la ingeniería de puentes. Pero sólo será cuestión de tiempo.

1.3 LOS PUENTES COMO SÍMBOLOS

Los puentes son símbolos de arte, ciencia, ingeniería y arquitectura, y ahora más que antes, la combinación de todas estas disciplinas. Estas estructuras sirven como vínculos entre personas, comunidades y culturas y épocas. Son la unión de dos pedazos de tierra geomorfológicamente incompatibles. Simbolizan poder, comercio, economía, armonía y grandeza.

²⁴ <http://www.panoramio.com/photo/15525847> y <http://incadventures.com/tour-category/tours-from-las-vegas/grand-canyon/west-rim-tours/>, respectivamente.

Tanto en la antigüedad como en la modernidad los puentes han emitido mensajes. De cierta manera nos hablan sobre el lugar en que se encuentran, a donde nos llevan y hasta las razones por las que fueron construidos. Si nos tomamos el tiempo e indagamos lo suficiente, podemos comprender estos mensajes.

Regresemos a los puentes flotantes de Jerjes, antes mencionados. La construcción de dichos puentes con pontones era, probablemente la única solución estratégica para invadir Grecia. Sin embargo, el fin principal de su construcción fue representar la dignidad del rey persa, lo cual quedó de manifiesto cuando ordenó a sus soldados azotar las aguas después de que una tormenta destruyó uno de los puentes. Jerjes sostenía que los mares eran sus esclavos y, como tales, le debían obediencia.

A través de la historia de la humanidad, los puentes han sido utilizados para fines militares, pero muchas veces representan más que sólo una estrategia: pueden transmitir la noción de poder, como en el caso del puente de Julio César sobre el Rin. En la actualidad, esto ha cambiado poco. De cierto modo ese poder se manifiesta en el ingenio, conocimiento y creatividad del ingeniero para materializar obras que desafían a la naturaleza a través de la vida útil de la estructura. Pero la prueba del tiempo no es la absoluta, un puente tiene que trascender también histórica y socialmente, y semejante demanda implica que se diseñen obras estéticas que no sólo combinen con su entorno físico y filosófico, sino que también las complementen.

Baste un ejemplo más del simbolismo que pueden adquirir los puentes. En la ciudad de San Francisco se encuentra quizá uno de los puentes más icónicos del mundo: el puente Golden Gate (Figura 1.11). Construido en 1937, cuenta con dos torres de 227 m de altura, las cuales que sostienen dos cables principales de 0.92 m de diámetro y 2,332 m de longitud, hechas cada uno con 27,572 cables de acero galvanizado que suman una longitud total de 129,000 km, equivalente a 3.2 veces la circunferencia de la tierra. El estilo *Art Decó* de las torres refleja perfectamente el espíritu de la época en que fueron construidos y el color naranja

rojizo de toda su estructura fue elegido para complementar los atardeces sobre el Océano Pacífico.

El puente Golden Gate representa el trabajo y esfuerzo de miles de trabajadores y la creatividad del ingeniero en jefe Joseph Strauss. Desde su construcción, ha sido materia de poemas, cuenta con múltiples apariciones en películas y forma parte de la identidad de la ciudad de San Francisco y sus habitantes.



Figura 1.11 El puente Golden Gate en San Francisco, California, 1937.²⁵

²⁵ <http://foundtheworld.com/golden-gate-bridge/>

CAPÍTULO 2

TIPOS DE PUENTES

“Cuando la historia de nuestro tiempo sea escrita la posteridad nos conocerá no por una catedral o un templo, sino por un puente.”

- Montgomery Schuyler

OBJETIVO. Analizar los diferentes tipos de puentes, sus principios estructurales y sus procedimientos constructivos.

2.1 INTRODUCCIÓN

Un puente debe tener la capacidad suficiente para resistir tanto cargas verticales como horizontales y a la vez transmitir las a los cimientos. Estas fuerzas son: el peso de la estructura, también llamado carga muerta; el tránsito que pasa sobre el, lo cual se denomina carga viva; así como otras cargas externas accidentales producidas por la lluvia, vientos o sismos.²⁶ La manera en que se transmiten las fuerzas depende fundamentalmente del tipo de estructura elegido. Numerosos factores determinan el tipo de puente a construir, como son el uso que se le dará, el presupuesto, la longitud a cubrir, la topografía, el medio físico y el aspecto visual, en general. Por lo anterior, es importante comprender los alcances de cada uno de los tipos de puentes y la naturaleza de los mismos.

Este capítulo trata, en términos generales, los tipos más comunes de puentes que se construyen actualmente. Se incluye, además, una explicación

²⁶ David J. Brown. Bridges. *Three thousand years of defying nature*. Estados Unidos, Firefly Books Ltd, 2005. p.14.

breve de su funcionamiento mecánico así como los procedimientos constructivos más usuales.

2.2 LA NATURALEZA COMO INSPIRACIÓN

A lo largo de la historia, el hombre ha construido diferentes tipos de puentes basados en modelos naturales. Desde los puentes más sencillos, sin mayor trascendencia, por los que circulamos cotidianamente, hasta los puentes más impresionantes están en formas que existen en la naturaleza. Félix Cardellach, en su libro *Filosofía de las Estructuras*, pone como ejemplo de esto a los puentes colgantes, los cuales se asemejan a la silueta formada por dos árboles separados por un río, de los cuales su ramaje se traslapa. Sin embargo, es difícil localizar estas analogías con la naturaleza, lo cual es reconocido por el autor, quien reflexiona: "...no tenemos suficiente experiencia para caminar sin desorientarnos por este horizonte infinito de instinto e inspiración.²⁷ Evidentemente, adoptar estos modelos es complejo ya que requiere de sensibilidad, intuición y otras cualidades que ayudan a identificar estas formas en la naturaleza.

Varios tipos de puentes presentados en este capítulo tienen sus orígenes en formas naturales. Dejaré que el lector hacer las relaciones.

2.3 CLASIFICACIÓN GENERAL

Cuando se trata de elegir el tipo de puente correcto para un proyecto en particular, el ingeniero tiene la posibilidad de echar mano de distintas soluciones posibles. Obviamente, con el paso del tiempo el ingeniero adquiere experiencia y sensibilidad como proyectista o constructor de este tipo de estructuras. Sin embargo, es importante que desde un principio estos profesionistas posean los conocimientos básicos sobre los tipos de puentes que más comúnmente se construyen y sobre las circunstancias que pudieran influenciar la decisión última.

²⁷ Cardellach, Félix. *Filosofía de las estructuras*. 2da. Edición. Barcelona, Editores Técnicos Asociados, 1997.

Esto es importante, porque facilita el proceso de la ingeniería conceptual y permite elegir el tipo de puente más eficiente posible.

En general, los puentes se clasifican con base a:

- tipo de uso,
- su geometría,
- su forma estructural,
- el tipo de losa,
- la posición de la losa,
- su sección transversal y
- otros.

Cada una de las clasificaciones anteriores tiene sus propios criterios, los cuales son aplicables en ciertos tipos de puentes. Sin embargo, dichos criterios no son necesariamente interdependientes. Por ejemplo, un puente puede tener como uso permitir el paso de un ferrocarril; sin embargo, su forma estructural o posición de la losa dependerá de las características físicas del lugar en que construirá. En este trabajo se tratarán aquellos puentes definidos por su forma estructural, principalmente:

- puentes tipo viga,
- puentes en arco,
- puentes atirantados,
- puentes colgantes y
- otros.

2.4 ALCANCES DE LAS FORMAS ESTRUCTURALES

Cada tipo de puente tiene distintas cualidades y la naturaleza de su forma estructural satisface diferentes parámetros. El más importante de estos parámetros es el claro. A medida que el claro crece, el peso propio de la estructura aumenta considerablemente en comparación con las cargas, vivas y accidentales, que posiblemente tenga que resistir durante su vida útil. Esto puede originar que la construcción de ciertos puentes cuyas longitudes sean demasiado grandes resulte impráctica y muy cara.

En la Figura 2.1 se muestra una comparación de los distintos tipos de puentes que se tratan en este capítulo, respecto a las longitudes que cubren usualmente.

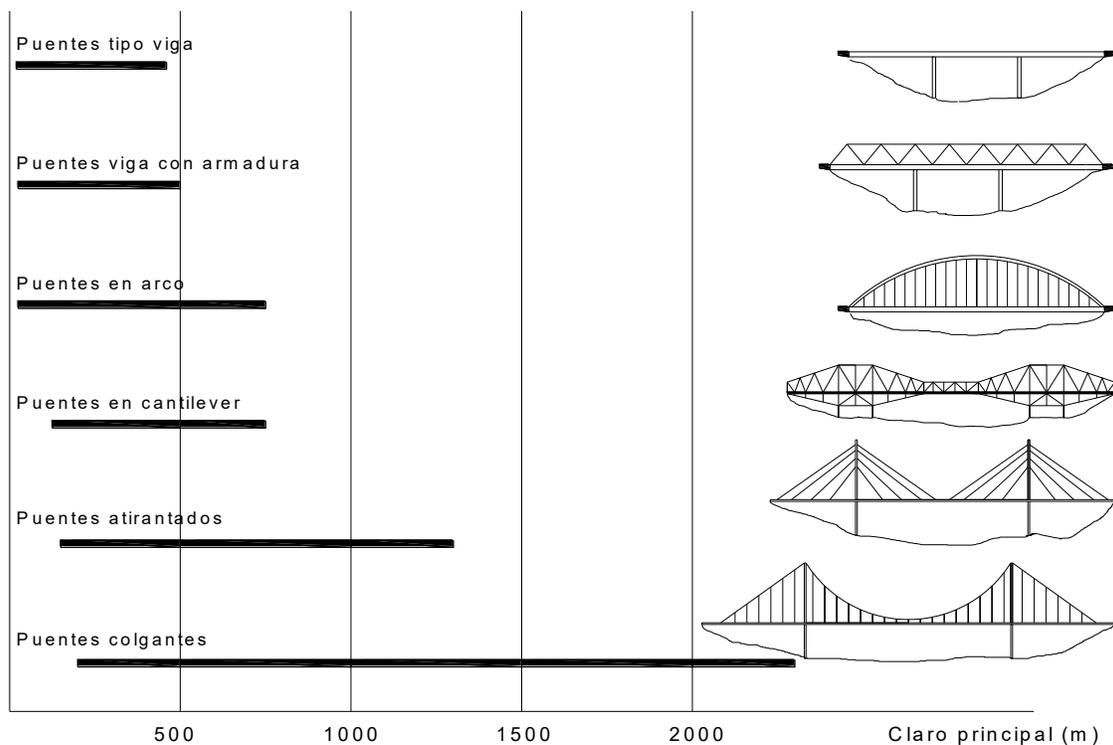


Figura 2.1 Claros que pueden cubrir los distintos tipos de puentes.²⁸

²⁸ Tomada de Jean-Paul Lebet y Manfred A. Hirt. *Steel bridges. Conceptual...* p. 78.

2.5 PUENTES TIPO VIGA

Como su nombre lo indica, estos puentes tipo viga están constituidos por un conjunto de vigas horizontales longitudinales (elementos primarios) y transversales (elementos secundarios) que se apoyan en dos o más puntos. Por su forma, estos puentes soportan las cargas que actúan sobre ellos mediante su capacidad de resistir flexiones, propiedad que depende estrictamente de su geometría (área, momento de inercia, entre otros elementos), mientras que las columnas y pilas, o pilotes, están sometidos a esfuerzos de compresión.

Existen diversos tipos de puentes viga de las cuales distinguimos los siguientes:

- puentes de vigas placa o de sección cajón y
- puentes tipo viga con armadura.

En el primer caso, la capacidad de carga de un puente depende de su resistencia a la flexión y al esfuerzo cortante, tal y como se muestra en la Figura 2.2.

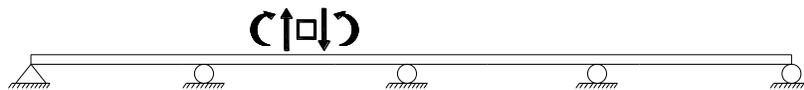


Figura 2.2 Esfuerzos a los que está sometido un puente tipo viga.

Las armaduras, por otro lado, trabajan como una viga grande formada por miembros discretos que forman triángulos, los cuales están sujetos a fuerzas de compresión y tensión²⁹ (Figura 2.3). Este tipo de puente resulta conveniente cuando los claros son tan largos que las placas y cajones resultan prohibitivos por su alto costo. Entonces, en estos casos resulta conveniente usar una armadura de acero ya que este material resiste tanto esfuerzos de compresión como de

²⁹ Op. Cit. *Computational analysis and...* p. 297.

tensión. Los puentes construidos con armadura de acero pueden alcanzar a cubrir claros de hasta 500 m.

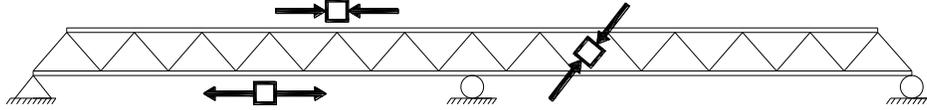


Figura 2.3 Esfuerzos en un puente tipo viga con armadura.

2.4.1 Procesos Constructivos Comunes

Entre otros, uno de los desafíos de los futuros ingenieros es mejorar los métodos actuales de construcción para reducir costos y tiempos. Esto no sólo depende de los ingenieros civiles. Más bien, esto depende del trabajo multidisciplinario de muchos profesionistas. Un ejemplo, en el futuro se requerirá de maquinaria más potente y en esos equipos estarán representadas, como de hecho ya lo están en los equipos actuales de construcción, otras ramas de la ingeniería tales como la industrial, mecánica y eléctrica. Otro ejemplo son los materiales para construcción que forzosamente evolucionarán en cuanto a su resistencia y ductilidad.

- Construcción sobre cimbra *in situ*: este método se utiliza comúnmente para librar claros pequeños. Las secciones son coladas y apoyadas sobre una estructura auxiliar, temporal, que cubre el claro completo.
- Construcción con dovelas de concreto prefabricadas: este método consiste en colar las dovelas en un sitio distinto al de la obra, transportarlas al sitio y luego colocarlas en su posición definitiva. Posteriormente las dovelas son unidas por medio de juntas, con lo cual se da continuidad a la estructura, al puente propiamente dicho.
- Voladizos sucesivos: consiste en colocar secciones del puente, una a una, utilizando una grúa que se mueve sobre la misma estructura. Así, dicha máquina coloca la primera dovela partiendo de un estribo, luego la segunda y así sucesivamente, mientras avanza sobre las secciones ya colocadas

hacia el estribo opuesto. Este método es adecuado cuando la altura del puente no permite el uso de cimbra o grúas.

- Lanzamientos sucesivos: este método consiste en armar los elementos estructurales individuales de acero, alineados con el eje del puente, en un área próxima a uno de los estribos. Luego se procede a jalar o empujar dichos elementos hacia las pilas y el estribo opuesto. Este método es una alternativa al método de voladizos sucesivos cuando la elevación del puente sobre el terreno es muy grande.

Los métodos anteriores son aplicables tanto para vigas de sección constante como de sección variable. Un ejemplo de un puente tipo viga de sección variable se aprecia en la Figura 2.4.



Figura 2.4 Puente Gateway en Brisbane, Australia, 1986.³⁰

³⁰ <http://www.couriermail.com.au/news/queensland/duplicate-gateway-bridge-carries-nearly-50000-vehicles-a-day-in-the-first-year-since-its-opening/story-e6freoof-1226061760972>

2.5. PUENTES EN ARCO

Son puentes que tienen sus apoyos en los extremos y su estructura tiene la forma de un arco, generalmente de acero. El tablero puede estar apoyado en el arco o suspendido del arco.

Los puentes en arco tienen una resistencia natural a la compresión impresionante. Todos los elementos constitutivos del arco trabajan a compresión. Las cargas y el peso propio del arco son llevados hasta los apoyos en ambos extremos. Por esta razón los puentes en arco deben ser construidos con materiales que resistan esfuerzos a compresión.³¹

El proceso del diseño conceptual de un arco es interesante y meramente matemático. El problema principal es la elección de la forma más eficiente. Bajo una carga uniformemente distribuida es preferible usar lo que los autores llaman el arco perfecto.³²

Observe la Figura 2.5 donde se muestra el arco perfecto con una carga distribuida. Nótese que la carga produce una reacción horizontal y una vertical en cada apoyo.

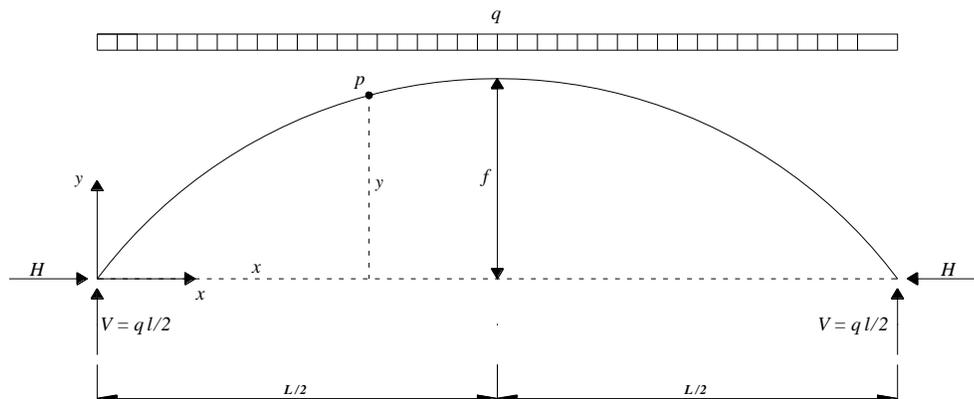


Figura 2.5 Arco perfecto bajo una carga uniformemente distribuida.³³

³¹ Op. Cit. *Computational analysis and...* p. 265.

³² Op. Cit. *Computational analysis and...* p. 280.

³³ Tomada de Chung C. Fung y Shuqing Wang. *Computational analysis and design of bridge structures*. p. 281.

La descarga vertical se obtiene multiplicando la carga distribuida q por la longitud L . Debido a la simetría tanto de la forma del arco como de la carga aplicada, las reacciones verticales son fácilmente deducibles. Así, cada uno de los apoyos soporta la mitad del total de la descarga:

$$V = \frac{qL}{2} \quad (2.1)$$

Suponiendo que el momento en cualquier punto p sobre el arco vale cero, aplicando momentos estáticos, se tiene que:

$$qx \frac{x}{2} + Hy = \frac{qL}{2} x \quad (2.2)$$

En el centro del arco x toma el valor de $L/2$ y el valor de y es evidentemente f . Haciendo suma de momentos con respecto a la corona del arco, se puede deducir que el empuje horizontal H es:

$$H = \frac{qL^2}{8f} \quad (2.3)$$

Sustituyendo la ecuación 2.3 en 2.2 y desarrollando para buscar y , se tiene que en cualquier punto x :

$$y = \frac{4fx}{L} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad (2.4)$$

Cabe mencionar que de la ecuación 2.2 se observa que el empuje horizontal es inversamente proporcional a la altura f .³⁴ El uso del arco perfecto es común ya que las cargas muertas a lo largo del eje del puente no varían mucho.

Dado que los arcos transmiten cargas de compresión grandes en los extremos, la construcción de dicho tipo de puente es factible en zonas donde el suelo permite una solución sencilla para resistir dichas cargas.³⁵ En un arco común, con tablero suspendido, como el de la Figura 2.6, se presentan, además de los esfuerzos a compresión sobre el arco, esfuerzos a tensión en la cuerda inferior y en los cables que sujetan el tablero.

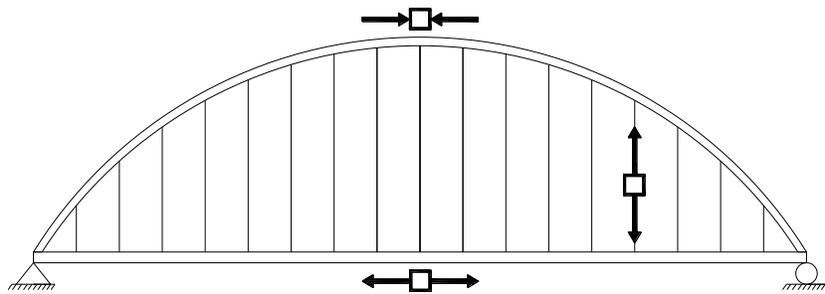


Figura 2.6 Esfuerzos actuantes sobre un puente en arco.

Los puentes en arco permiten salvar claros más largos en comparación con los puentes tipo viga convencionales. En Estados Unidos se encuentra el tercer puente en arco más largo del mundo con 518 m de longitud (Figura 2.7). El puente New River Gorge sólo está por detrás de los puentes Chaotianmen y Lupu, de 552 y 550 metros de longitud respectivamente, ambos localizados en China.

En algunos países, Noruega por ejemplo, podemos encontrar puentes que cubren claros más largos; sin embargo el tablero es soportado por dos o más arcos. En cuanto a economía, la utilización de arcos múltiples puede resultar contraproducente y quizá convenga optar por construir otro tipo de puente como los que presentaremos adelante en este capítulo.

³⁴ Op. Cit. *Computational analysis and...* p. 281.

³⁵ Op. Cit. *Steel bridges. Conceptual...* p. 79.



Figura 2.7 New River Gorge en Estados Unidos, 1977.³⁶

2.5.1 Procesos Constructivos Comunes

Generalmente, los puentes en arco se construyen en lugares de difícil acceso. Por consiguiente, es importante conocer sus procesos de construcción más comunes:

- Construcción por voladizos sucesivos: mediante este método se colocan las secciones una por una avanzando desde las pilas o estribos al centro del arco.
- Construcción sobre cimbra: las secciones se apoyan y arman sobre una estructura auxiliar, temporal, hasta cerrar el arco. Este es el proceso constructivo utilizado más frecuentemente.
- Construcción con auto cimbra: este método consiste en construir una armadura metálica provisional en forma de arco que funciona como cimbra, sobre la cual se construye un puente de concreto armado.
- Construcción mediante cable colgado: Inicialmente se construyen torres provisionales en los estribos, de las cuales se cuelgan cables cubriendo el

³⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/File:New_River_Gorge_Bridge_by_Donnie_Nunley.jpg

claro de lado a lado. De estos cables se suspenden las dovelas y se van empalmando hasta cerrar el arco.



Figura 2.8 Puente Infiernillo I, en Michoacán, México.³⁷

2.6 PUENTES ATIRANTADOS

Los puentes atirantados están configurados de manera que el tablero está conectado con las torres mediante cables rectos llamados tirantes. Éstos le proporcionan al puente una serie de apoyos intermedios semirrígidos. También, los cables generan fuerzas horizontales en el tablero, las cuales se equilibran dentro del mismo (Figura 2.9).

³⁷ Foto tomada por el Ing. Carlos Arce León, académico de la FES Acatlán de la UNAM.

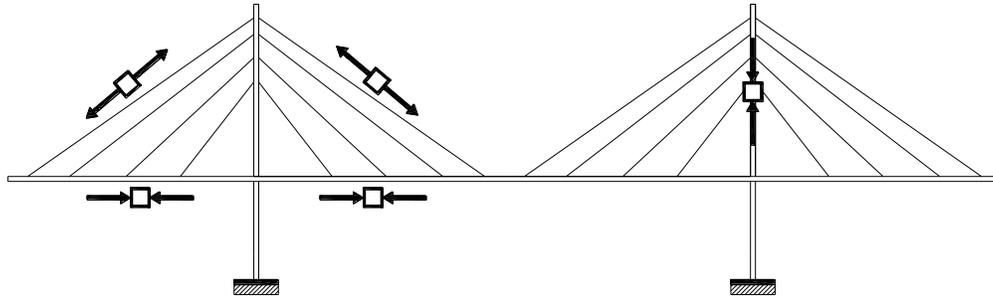


Figura 2.9 Esfuerzos actuantes en un puente atirantado.

Evidentemente los cables trabajan a tensión. El tablero se encuentra sujeto a compresión por efecto de las fuerzas horizontales que los cables ejercen en él. Así mismo, las torres están sujetas a esfuerzos de compresión, tanto por efecto de su peso propio como por las fuerzas verticales que producen los cables hacia abajo.

La historia de los puentes atirantados es relativamente reciente ya que los primeros fueron construidos a principios del siglo XX. En general, estos puentes fueron construidos para cubrir distancias de más o menos 500 metros. Actualmente, existen puentes que duplican esa distancia. Uno de ellos es el puente Sutong (Figura 2.10), localizado en China, con 1,088 metros de claro principal.

2.6.1 Procesos Constructivos Comunes

Los métodos más comunes en la construcción de un puente atirantado son las siguientes:

Los métodos más utilizados para construir puentes atirantados son los siguientes:

- Voladizos sucesivos: con este método las estructuras parciales que se van colocando para formar el tablero quedan, desde un principio, sujetas a cables atirantados, tal como ocurre con el puente completo.

- Construcción sobre apoyos provisionales: el tablero completo del puente se construye sobre un sistema de apoyos temporales antes de atirantarlo. Una vez concluido el tablero y conectado a los cables, a estos se les va dando carga sucesivamente hasta que queda el puente en el aire. Posteriormente se retiran los apoyos provisionales.
- Lanzamientos sucesivos: este método es similar al de los puentes tipo viga. Una sección es empujada sobre la parte existente del puente hasta colocarla en su lugar definitivo y luego se conecta a sus cables atirantados. Hecho lo anterior, se empuja y coloca la siguiente sección y se le asegura en su lugar con sus respectivos cables y así sucesivamente.



Figura 2.10 Puente Sutong en China, 2008.³⁸

³⁸ <http://megaconstrucciones.net/?construccion=puente-sutong>

2.7 PUENTES COLGANTES

Los puentes colgantes han existido por miles de años, pero han sido perfeccionados en los últimos 200. En sentido estricto, la curva que forma un cable pesado y flexible es la de una catenaria, pero si se le agrega una plataforma de peso uniforme y a intervalos iguales se colocan cables verticalmente, el cable principal toma la forma de una parábola y como tal se usa en el cálculo estructural del puente.³⁹ En esencia, la plataforma de un puente colgante está sostenida por un arco invertido formado por cables de acero -formados por miles de cables o cordones de diámetro muy pequeño- de los que se suspende el tablero del puente mediante tirantes verticales o cables secundarios. Las cargas vivas y el peso propio del tablero son transmitidos a los cables principales mediante estos cables secundarios. Los cables secundarios son perpendiculares a la losa y por ello no crean fuerzas horizontales (Figura 2.11).

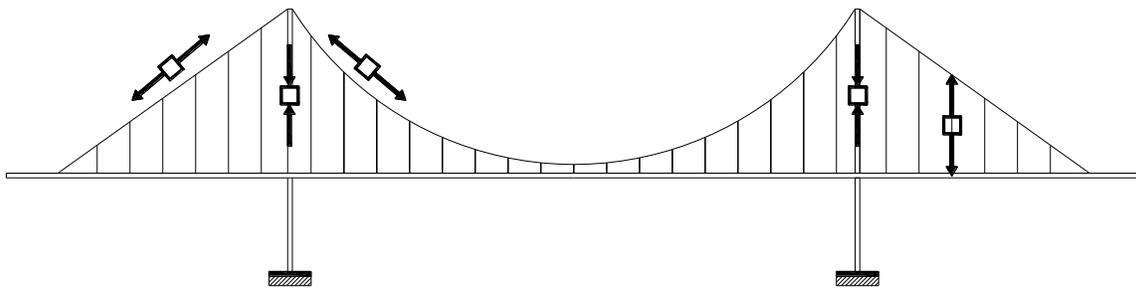


Figura 2.11 Esfuerzos actuantes en un puente colgante.

Los cables principales que se encuentran a tensión hacen que las torres se compriman. Estos cables no resisten flexiones. Sin embargo, cuando se les aplica un sistema de fuerzas toman la forma necesaria para que se produzcan esfuerzos axiales de tensión.

Cuando se trata de salvar claros muy largos, los puentes colgantes ofrecen algunas ventajas:

³⁹ Op. Cit. *A memoir on suspension...* p. 159.

- El claro principal puede ser muy largo en relación con la cantidad de material empleado.
- La altura de sus tableros puede ser suficiente para permitir el paso de barcos debajo de él.
- Siendo una estructura relativamente flexible, su comportamiento ante el efecto de vientos y sismos es ideal.
- Durante la etapa de construcción, no es necesario el uso de apoyos intermedios, lo cual permite su construcción sobre cañones profundos y en zonas marítimas complicadas.

Actualmente, el Akashi Kaikyo (Figura 2.12) es el puente colgante más largo del mundo. Inaugurado en Japón en 1998, tiene un claro principal de 1,991 m y una longitud total de 3,911 m.



Figura 2.12 Puente Akashi Kaikyo en Japón, 1998.⁴⁰

⁴⁰ <http://www.japan-guide.com/e/e3559.html>

2.7.1 Procesos Constructivos Comunes

Los procesos de construcción más comunes de los puentes colgantes son los siguientes:

- Construcción de las torres y contrapesos: Los elementos estructurales de las torres se colocan con grúas, mismos que se van elevando y colocando en su lugar definitivo uno a uno. En cuanto a los contrapesos –elementos de anclaje de los cables principales en los extremos del puente- su dificultad radica solamente en la precisión que requiere la colocación de las piezas metálicas que sirven de anclaje a los cables delgados que constituyen los cables principales.
- Montaje de los cables principales: para montar éstos, generalmente se hace uso de cables auxiliares, los cuales sustenten a los cables principales durante la fase de construcción.
- Montaje del tablero: se realiza básicamente usando el método de voladizos sucesivos. El avance se hace simétricamente partiendo de las torres hacia el centro del claro principal y hacia los extremos.

2.8 OTROS TIPOS DE PUENTES

Los tipos de puentes presentados son los más comunes. Existen otros tipos de puentes híbridos en que se combinan diferentes materiales o sistemas estructurales. Por ejemplo, los puentes tipo viga con piernas inclinadas son una interesante combinación de elementos que tienen un comportamiento parecido al de los puentes en arco. Sin embargo, todos sus elementos estructurales están sujetos a esfuerzos tanto de compresión como de tensión (Figura 2.13).⁴¹

⁴¹ Op. Cit. *Steel bridges. Conceptual...* p. 79.

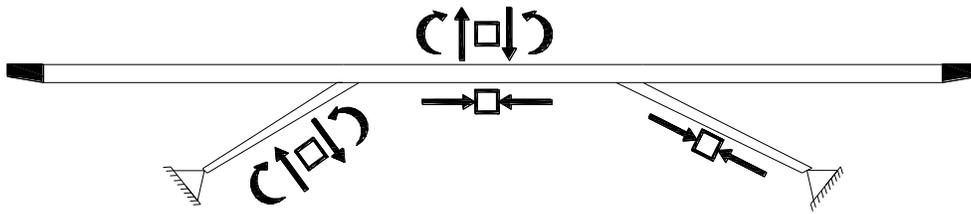


Figura 2.13 Puente tipo viga con miembros inclinados sujetos a compresión y flexión.

Algunos de estos puentes son construidos para satisfacer necesidades específicas. Los puentes flotantes, aunque no muy comunes, son una forma interesante. Éstos se apoyan sobre flotadores –barcas, pontones y otros tipos- los cuales pueden ser de diversos tamaños. El tablero se encuentra apoyado sobre una serie de estos elementos flotantes que mantienen el puente relativamente fijo. La Figura 2.14 muestra un ejemplo de un puente flotante moderno. Construido en el estado de Washington, E.U.A., cuenta con una longitud total de 2,398 m.



Figura 2.14 Puente de Hood Canal en Washington, 1961.⁴²

⁴² <https://landingaday.wordpress.com/tag/hood-canal-bridge/>

En general, los puentes son construidos como parte integral de nuevos caminos, sin embargo, en ocasiones pueden transformarse en obstáculos. Esto ha dado origen al desarrollo los puentes móviles cuya característica principal es que su tablero, o parte de él, es movable para permitir el tránsito de transporte marino, principalmente.

Los puentes móviles cuentan con su propia clasificación, que es amplia y versátil. Por mencionar algunos: levadizo, retráctil, de mesa, sumergible, giratorio entre otros.

CAPÍTULO 3

ESTÉTICA DE LOS PUENTES

“La meta es obtener elegancia de la utilidad. El producto debe ser arte estructural.”

- David Bellington

OBJETIVO. Describir los factores que influyen en el aspecto final de un puente y el uso de éstos para lograr equilibrar seguridad, funcionalidad, economía y estética.

3.1 IDEAS FUNDAMENTALES EN EL DISEÑO DE UN PUENTE ESTÉTICO

Frederick Gottemoeller desarrolla cinco ideas fundamentales que deben ser consideradas en el diseño de puentes funcionales y a la vez agradables a la vista. Estas ideas también reúnen los conceptos de estética, ingeniería y arquitectura, mismos que son indispensables para el diseño de puentes. A continuación se presentan estas ideas, a manera de resumen, las cuales ya fueron expuestas en el libro *Bridgescape: The Art of Designing Bridges*.

3.1.1 Todos Los Puentes Generan Un Impacto Estético

Los puentes pueden provocar distintas emociones en los seres humanos, tales como pasión o admiración, aberración o aburrición y aún nostalgia. Al final todo puente crea un impacto visual y psicológico tanto en los usuarios como en los simples espectadores. Generalmente, el tipo de impacto depende de su aspecto físico; sin embargo, con el paso del tiempo se generan historias alrededor de esas estructuras y tales historias dan origen a cierto valor cultural.

3.1.2 La Gente Tiene Su Opinión Sobre La Belleza De Un Puente

En este punto vale la pena citar a Frederick Gottemoeller textualmente.

A menudo oímos que la belleza está en el ojo del espectador... Dos personas pueden tener reacciones individuales al ver la Mona Lisa, pero ellos y millones más pueden coincidir que la Mona Lisa es una hermosa pintura. Del mismo modo, las personas pueden estar de acuerdo en que puentes son más atractivos que otros.⁴³

Si la mayoría de las personas pueden estar de acuerdo en que puentes son estéticos y cuáles no. Entonces, tanto los puentes estéticos como carentes de belleza deben tener características en común que los hacen así.

3.1.3 Los Ingenieros Deben Ser Responsables Del Impacto Estético De Sus Puentes

Los ingenieros están capacitados para efectuar el análisis y diseño de sistemas y elementos estructurales, así como buscar la solución más cercana a lo adecuado en cuanto a funcionalidad y economía. Sin embargo, dichos profesionistas también deben estar preparados para considerar el aspecto estético de sus obras.

Generalmente, se considera que la estética de las obras civiles está a cargo de los arquitectos; sin embargo, el ingeniero no puede, no debe, negarse a participar en esta cuestión. Esto debiera ser así en el caso de los puentes, porque la apariencia de tales obras es determinada principalmente por las formas y tamaños de sus elementos estructurales y no por elementos arquitectónicos tales como detalles, texturas, colores y acabados entre otros.⁴⁴ Entonces, es casi obligado exigir a los ingenieros mayor participación en la toma de decisiones respecto a la estética de los puentes.

⁴³ Gottemoeller, Frederick. *Bridgescape. The art of designing bridges*. p. 6.

⁴⁴ Op. Cit. *Bridgescape. The art...* p. 8.

3.1.4 Los Ingenieros Deben Considerar La Estética Equilibrada Con Resistencia, Seguridad Y Costo

En el proceso del diseño de un puente se deberían tomar en cuenta tres factores fundamentales:

- Funcionalidad y seguridad,
- costo y
- apariencia.⁴⁵

Gottemoeller considera que en la jerarquización anterior pone como último aspecto a considerar, por supuestamente ser el menos importante, es la apariencia del puente; o que se puede mejorar un punto en detrimento de otro. Esto está lejos de ser cierto.

Se piensa que mejorar la apariencia de alguna estructura incrementa su costo. Esto ocurre porque, en general, el ingeniero tiene la creencia de que la apariencia depende de complementos meramente arquitectónicos, cuando en la realidad el impacto estético de una estructura depende predominantemente de los elementos estructurales que la conforman.

Los elementos estructurales reflejan el comportamiento de un puente y las fuerzas que actúan sobre los primeros. Las fuerzas determinan los elementos mecánicos y por ende las formas y dimensiones de los elementos de la estructura. Estas formas resultan naturalmente más agradables a la vista.

Comprender los principios básicos del análisis y diseño de estructuras permite diseñar un puente estéticamente agradable a la vista independientemente del lugar dónde se construya. Sobra decir que es inaceptable favorecer la apariencia estética de un puente si para ello se tiene que comprometer su seguridad.

⁴⁵ Op. Cit. *Bridgescape. The art...* p. 10.

3.1.5 La Habilidad Artística Puede Ser Adquirida Y Desarrollada Por Ingenieros

Los ingenieros, al igual que los arquitectos y otros profesionales, pueden desarrollar cierta sensibilidad artística. Esto no necesariamente implica que el ingeniero deba tomar cursos especializados de arte (aunque nunca está de más), sino que tenga una idea general de cómo lograr que una obra civil cualquiera sea agradable a la vista del espectador.

Aunque puede ser un tanto subjetivo, la experiencia ha vuelto evidente que hay ciertos factores que se pueden tomar en cuenta, porque ayudan, a que el diseño de un puente resulte estético. Por lo anterior, se hace uso de la teoría del arte estructural.

3.2 TEORÍA DEL ARTE ESTRUCTURAL

Cuando un puente o cualquier estructura, en general, crean una sensación de mediocridad o indiferencia, se puede decir que no van más allá de cumplir su función operativa. En el caso concreto de un puente, este cumple la función de llevar un automóvil o peatón del punto A al punto B. Si además de lo anterior, dicho puente se construye a un bajo costo y cumple los requisitos mínimos de seguridad, se tiene una obra de ingeniería bastante ordinaria. Esto, en muchos casos, es suficiente para los ingenieros, pero no para todos. Los ingenieros que van más allá de lo común son quienes diseñan y construyen los hermosos puentes que nos maravillan cada que los tenemos frente a nosotros.

A esta segunda categoría de puentes, los que nos maravillan, pertenece la estructura que se muestra en la Figura 3.1, el puente Helix, la cual es un atractivo puente peatonal construido en Singapur. Basado en la particular estructura del ADN, este puente ilumina de noche la bahía con series de luces de distintos colores que se van alternando. Como complemento, este puente cuenta con cuatro plataformas con vistas estratégicas hacia la bahía y la ciudad donde en ocasiones se presentan espectáculos.



Figura 3.1 Puente peatonal Helix en Singapur inaugurado en 2010.⁴⁶

El puente Helix permite que los peatones crucen la bahía y además disfruten el paisaje. Por su forma única, aunque basada en la naturaleza, es una atracción turística que favorece la economía de la ciudad y la diversidad cultural. Conscientes de esto, se puede concluir que el puente Helix cumple cabalmente las funciones particulares de un puente peatonal y, con todo rigor, los requisitos de seguridad de la normatividad local. Probablemente muchas personas ignorarán estas dos funciones, pero todas estarán de acuerdo en que se trata de un puente sumamente atractivo. Algunos incluso podrán afirmar que se trata de una obra de arte.

No es necesario que los puentes tengan formas complejas para llamar la atención. De hecho, aunque todos los puentes son diferentes en muchos aspectos, los más atractivos poseen características en común que no

⁴⁶ <http://www.worldfortravel.com/2014/06/15/the-double-helix-bridge-marina-bay-singapore/>

necesariamente coinciden con las del puente Helix. A continuación se presentan esas características:

1. Son más sencillos.
2. Son esbeltos.
3. Las líneas de la estructura son continuas.
4. Las formas de los elementos estructurales reflejan las fuerzas que actúan sobre ellos.⁴⁷

Aunque los problemas inherentes al proyecto de un puente pueden tener muchas soluciones, en general, se puede echar mano de las ideas mencionadas arriba para encontrar la más sencilla y conveniente, con independencia de los problemas que se presenten o del tipo de puente que se quiera proyectar. Así, los primeros tres puntos se explican solos. Sin embargo, se debe enfatizar que dependen en gran medida del último punto, el más importante.

Para explicar en qué consiste el punto cuatro, se usará como ejemplo la Figura 3.2. En dicha figura observamos 3 variaciones de una viga, todas bajo la acción de una carga uniformemente distribuida en toda su longitud. La Figura 3.2.d muestra los momentos que actúan sobre la viga independientemente de su forma. Es evidente que el momento máximo se presenta en el apoyo y disminuye hasta llegar a cero en el extremo libre. Lo anterior, aún antes de emprender el cálculo de las secciones transversales, indica claramente que la viga se requerirá mayor cantidad material en el extremo donde las acciones son mayores y una cantidad de material cada vez menor conforme el punto analizado avanza hacia el punto donde el momento es cero. Es evidente, entonces, que el análisis respectivo permitirá tener como resultado una forma estructural visualmente agradable y que la cantidad de material a utilizar será la óptima.

⁴⁷ Op. Cit. *Bridgescape. The art...* p. 31.

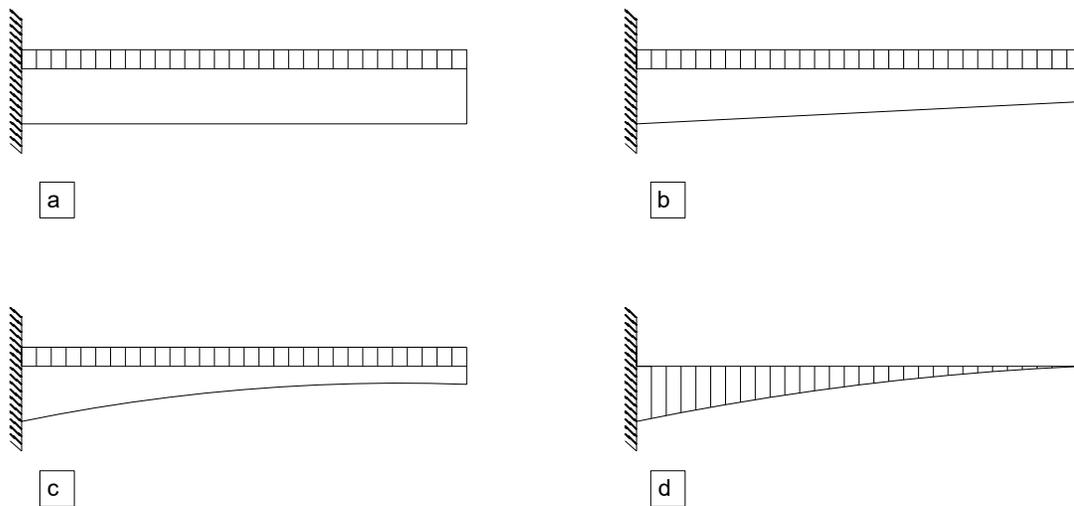


Figura 3.2 Variaciones de una viga empotrada y los momentos en ellos.⁴⁸

La viga de sección variable de la Figura 3.2.c es la que más se aproxima a la forma del diagrama de momentos (Figura, 3.2.d). Aún sin una preparación formal en el área de ingeniería, por simple observación, una persona puede intuir que donde las secciones son mayores existen cargas grandes sobre ellas y que las secciones más esbeltas resisten cargas menores.

Es probable que muchos ingenieros argumenten que el costo del procedimiento constructivo pudiera ser excesivo para formas estructurales de este tipo. Sin embargo, si se toma este principio como filosofía de diseño, el resultado serán puentes más optimizados en relación a materiales, más ligeros y más agradables a la vista.

Como a veces es más sencillo entender los conceptos si están expresados en términos numéricos consideremos, como otro ejemplo, la Figura 3.3:

⁴⁸ Tomada de *Bridgescape. The art of designing bridges*. p. 37.

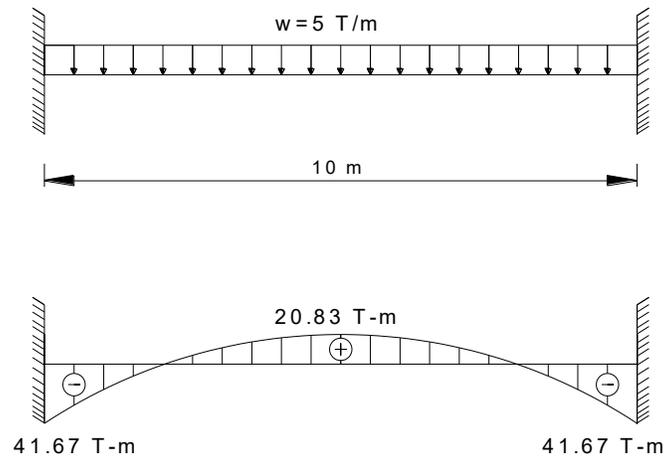


Figura 3.3 Viga doblemente empotrada.

En la realidad los puentes no tienen extremos libres como la viga que se muestra en la Figura 3.2. Un ejemplo más real es el de la Figura 3.3 en que se muestra una viga doblemente empotrada con una longitud de 10 m y una carga uniformemente distribuida de 5 T/m. Como se puede observar, los momentos máximos son negativos y se localizan en los apoyos y tienen una magnitud de 41.67 T-m. Por otra parte, al centro del claro el momento es positivo y su valor es la mitad del máximo momento negativo.

Los momentos positivos ocasionan tensiones en las fibras inferiores de una sección cualquiera, por consiguiente el refuerzo longitudinal en una viga de concreto se concentra principalmente en la parte inferior de la misma. Los momentos negativos, en cambio, producen tensiones en las fibras superiores de la sección, por lo que el refuerzo longitudinal se concentra en la parte superior. Por lo anterior, uno no puede dejar de pensar que una sección constante, diseñada para resistir el momento máximo, da origen a un desperdicio de materiales.

Existen teorías que sostienen que los objetos que nos parecen atractivos son aquellos que claramente reflejan su comportamiento estructural. Estas teorías asumen que todos procesamos e internalizamos una compresión general inherente a las estructuras, basada en la lucha de cada persona contra la

gravedad desde el día que aprendemos a caminar. Siguiendo este razonamiento, las vigas usadas como ejemplos en este subcapítulo son atractivas porque representan las vigas que todos conocemos: los brazos o las piernas humanas, o las ramas de un árbol. De esta manera, las personas desarrollan un conocimiento intuitivo de lo que el ingeniero conoce como cálculos, los cuales revelan que los esfuerzos en una viga son mayores en el apoyo y por tanto es ahí donde debe usarse más material.⁴⁹

En resumen, Gottemoeller expresa que el arte estructural está basado en tres aspectos relevantes:

- Eficiencia: mínima cantidad de materiales controlada por la seguridad.
- Economía: costos controlados por la calidad del servicio y su mantenimiento.
- Elegancia: expresión personal máxima del diseñador controlada por los aspectos eficiencia y economía.

3.3 EL ARTE DE ROBERT MAILLART

Durante mucho tiempo el concreto fue considerado un material tosco y difícil de manejar. Las estructuras construidas con este material generalmente eran robustas y demasiado pesadas. Robert Maillart (Suiza, 1872-1940) fue el primero en explorar el uso del concreto combinando elegancia, belleza, economía y practicidad. Maillart realizó sus primeros trabajos como aprendiz y no tuvieron mayor reconocimiento. No fue hasta 1905, cuando diseñó el puente Tavanasa, el cual atraviesa el Rin en territorio Sueco, que sus trabajos comenzaron a tener cierto reconocimiento. El puente Tavanasa muestra un bello contraste entre la esbelta estructura en arco, que representa modernidad, y los robustos estribos de mampostería que evocan tiempos pasados (Figura 3.4).

⁴⁹ Op. Cit. *Bridgescape. The art...* p. 37.



Figura 3.4 Puente Tavanasa, Suiza, 1905.⁵⁰

Desafortunadamente, el puente Tavanasa puede ser observado solamente en fotografías pues fue destruido por una avalancha en 1927.

Sin embargo, Robert Maillart logró su trabajo más reconocido hasta 1930: el puente Salginatobel (Figura 3.5). Se trata de un arco de 90 m de concreto reforzado que cubre una longitud total de 132 m sobre un valle a 90 m de altura.



Figura 3.5 Puente Salginatobel, Suiza, 1930.⁵¹

⁵⁰ <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1357>

⁵¹ <https://www.locationscout.net/switzerland/983-salginatobel-bridge-switzerland>

Los trabajos de Maillart eran reconocidos siempre por ser los más económicos en comparación a los de sus rivales.⁵² El Salginatobel fue elegido en un concurso entre muchos otros proyectos propuestos por su bajo costo y su rápida construcción, consecuencia de la eficiencia estructural del mismo más que por su forma esbelta y elegante. Este puente tiene a su alrededor, como complemento, un paisaje natural impresionante que resalta su aspecto modernista. A su vez, sin estribos visibles en sus extremos dicho puente es un complemento perfecto para el paisaje. Cabe resaltar que la cimbra utilizada para construir este puente fue en sí misma una magnífica obra de ingeniería (Figura 3.6).



Figura 3.6 Cimbra para el puente Salginatobel.⁵³

Los puentes de Robert Maillart son de los primeros ejemplos de eficiencia la estructural combinada con el arte en que se ha convertido la ingeniería de puentes hoy. Después de Maillart y su manera de revolucionar el uso del concreto

⁵² Op.Cit. *Three thousand years...* p. 128.

⁵³ <http://www.pontipedia.es/noticias/puentes/hormigon/salginatobel-bridge-13014.htm>

reforzado, surgieron ingenieros que han encarnado las habilidades de ingeniero y arquitecto, cambiando por completo la ingeniería estructural. Santiago Calatrava Valls (España, 1951) destaca entre estos por su estilo particular de atirantar los puentes con mástiles inclinados para compensar la descarga de los tableros (Figura 3.7).



Figura 3.7 Puente de Jerusalén, Israel, 2008.⁵⁴

⁵⁴ <http://lavozdelmuro.net/14-chapuzas-millonarias-del-santiago-calatrava-a-lo-largo-del-mundo/>

CAPÍTULO 4

DISEÑO CONCEPTUAL

“Así yacía yo y esperaba: ningún puente que haya sido construido alguna vez puede dejar de ser puente sin derrumbarse.”

- Franz Kafka. Fragmento del cuento *El puente*.

OBJETIVO. Proporcionar los factores básicos a considerar en el diseño de un puente estético que complemente su entorno.

4.1 INTRODUCCIÓN

El proceso del diseño de un puente es mucho más complicado que el de otras estructuras. Los métodos computacionales modernos incluso han hecho que el análisis y diseño de algunas estructuras caigan en lo trivial. Sin embargo, el proyecto de un puente nunca es igual a otro por numerosas razones: topográficas, geológicas, hidrológicas y climáticas entre otras. Incluso, en proyectos grandes de puentes las condiciones del suelo y sismicidad pueden cambiar de un extremo a otro. Lo anterior, hace a cada puente único en todo sentido.

El proyecto de un puente pasa primero por un largo y complicado proceso de diseño conceptual que lo hace distinto a los proyectos de casa habitación, estructuras para telecomunicaciones, etcétera. Las características generales del puente son determinadas en esta etapa y la participación del ingeniero es esencial ya que, como se mencionó, el impacto visual del puente será determinado por sus elementos estructurales. Este proceso de ingeniería conceptual no requiere de cálculos mayores pero sí depende de la experiencia y creatividad de los ingenieros a cargo del proyecto.

Terminada la etapa conceptual del diseño del puente se deben hacer estudios pertinentes del medio físico para considerar las cargas a las cuales estará sometido y su respuesta ante las mismas. Éste proceso se llama análisis estructural y es uno de las más importantes. Una vez concluido el análisis estructural se cuenta con los elementos mecánicos y con éstos se procede a diseñar los miembros del puente.

El análisis y diseño estructural de puentes son temas que se estudian a profundidad en los posgrados en estructuras. Estos temas son interesantes y complejos por sí solos, pero están más allá del alcance de este trabajo. Por lo tanto, este capítulo se limita al proceso que no se enseña en la carrera de ingeniería civil: el diseño e ingeniería conceptual.

4.2 INGENIERÍA CONCEPTUAL

La ingeniería conceptual es la etapa en que se examinan todas las soluciones plausibles para el diseño de un puente en bocetos, generalmente. Antes de tratar las distintas fases del diseño conceptual es importante ubicar su lugar en el proyecto integral de puente.

Lebet y Hert dividen la elaboración del proyecto en cinco etapas como se muestra en la Figura 4.1. El diseño conceptual se limita a tomar en cuenta todas las posibles soluciones y desarrollar distintos conceptos de las mismas. Esta etapa es importante durante la misma se toma en cuenta la estética del puente. Es trascendental considerar el aspecto estético en esta etapa temprana del proyecto, porque en las últimas fases difícilmente podrán incorporarse cambios importantes cuya finalidad sea que el puente y el paisaje se complementen visualmente.

A pesar de que, en general, el diseño conceptual es tomado a la ligera, se trata de un proceso meticuloso e importante en que se deben considerar los diversos factores que al final determinarán la apariencia del puente. Si bien es cierto, como ya se dijo anteriormente, que cada puente es único, existen lineamientos bien definidos que todo ingeniero debiera tener presente al

considerar la estética de dichas estructuras. Estos lineamientos se presentan a continuación.

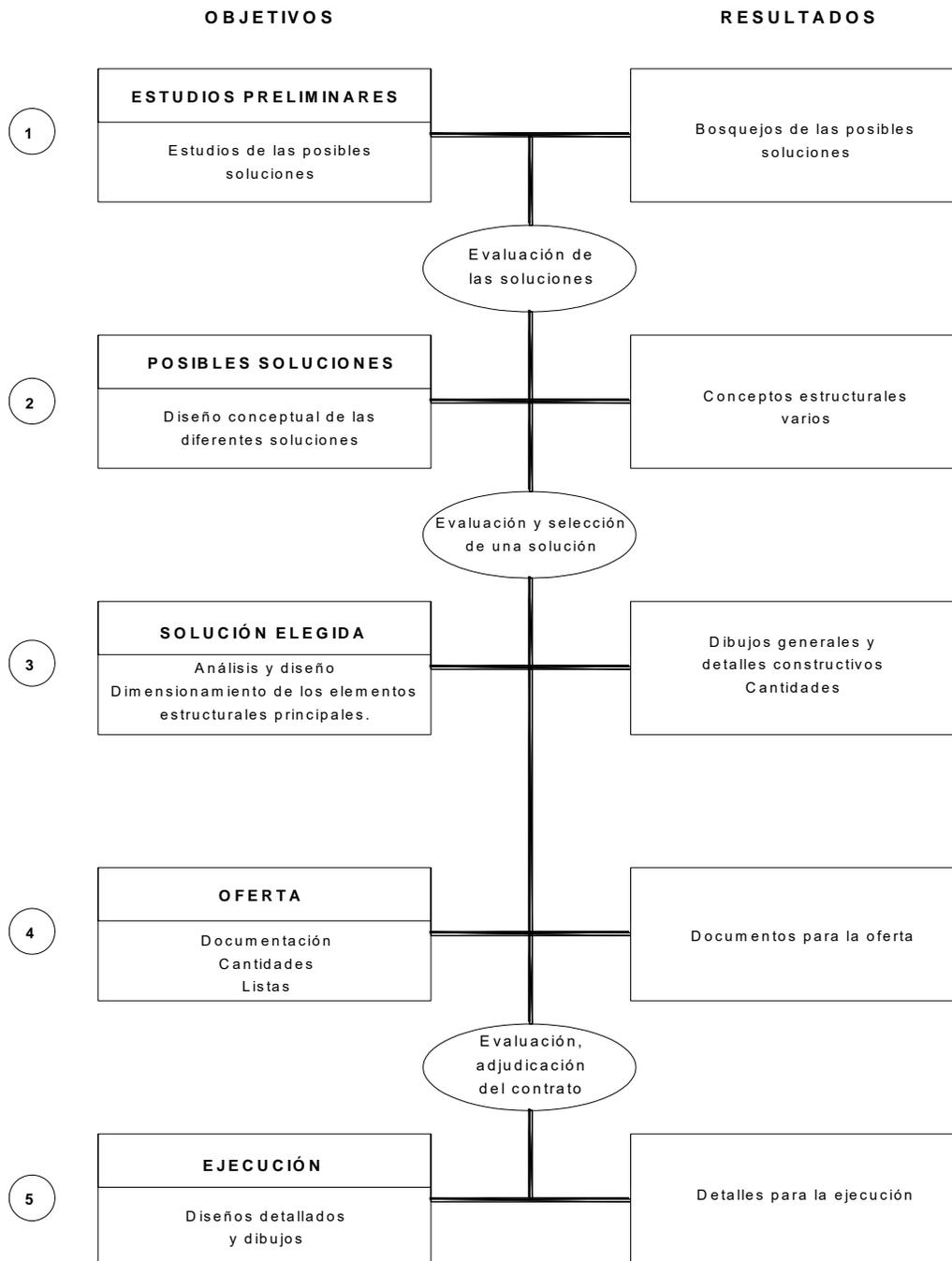


Figura 4.1 Etapas en la elaboración del proyecto.⁵⁵

⁵⁵ Tomada de Jean-Paul Lebet y Manfred A. Hert. *Steel bridges. Conceptual...* p. 49.

4.2.1 El Contexto

Un puente deberá de cumplir distintos requisitos dependiendo de la zona en que se vaya a construir, sea urbana, rural o industrial. Según el caso, el puente siempre debiera estar armonizado con su entorno.

En el diseño se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- Requisitos físicos,
- medio visual,
- el uso del entorno,
- simbolismos,
- límites del proyecto,
- requisitos del propietario y
- participación multidisciplinaria y de los ciudadanos.

4.2.2 Conocer El Sitio

El sitio en el que se construirá el puente es un factor determinante en su configuración y, por consiguiente, su apariencia. Conviene que todos los interesados hagan visitas al sitio a diferentes horas del día para que tengan una perspectiva amplia del medio físico⁵⁶. Se recomienda elaborar un archivo fotográfico. Es importante conocer el sitio y comprender qué fin tiene el puente, tanto como un complemento para el sistema de transporte, como su fin social y simbólico. Los puentes que se diseñan con la intención de complementar su entorno deben ser, a la vez, funcionales y estéticos.

De acuerdo al sitio, se debe analizar lo siguiente:

- Los obstáculos que atravesará un puente tales como un río, un cañón, etcétera.
- Las cargas, dimensiones y velocidades de diseño de acuerdo al sitio (condiciones de clima y sismicidad).

⁵⁶ Subcommittee of bridge aesthetics of the transportation research board. *Bridge aesthetics sourcebook*. p. 10.

- El tipo de tránsito esperado que atravesará el puente. Es importante considerar la posibilidad del cruce de peatones según el uso del puente, especialmente en zonas turísticas.
- Cómo se aprecia el sitio a diferentes horas y distintas épocas del año, esto desde distintos ángulos.
- Evaluar si la geografía del sitio favorece algún tipo de cimentación o subestructura en particular.
- Complementar comunidades históricas y turísticas con puentes estéticamente adecuados para crear una armonía que sea agradable tanto para los habitantes como los turistas.

4.2.3 Geometría

Ese factor es uno de los criterios más importantes que determinan la apariencia de un puente. En este caso, el ingeniero puede influir de distintas maneras:

- Buscar la distancia más corta entre puntos.
- Construir alineaciones horizontales y verticales a partir de curvas continuas largas. Las curvas cortas se verán como torceduras en la alineación; en cambio, una curva amplia cumplirá con las expectativas visuales de las personas.
- Relacionar la longitud de la curva con la longitud de la estructura. En puentes de menos de 800 m de longitud, con una curva horizontal, la longitud de la curva no deber ser menor que la mitad de la longitud del puente.
- Cuando sea posible, usar curvas verticales discretas con el fin de dar al puente un ligero efecto de arco.
- Ajustar la alineación horizontal para simplificar o descartar el uso de diferentes tipos de columnas.

4.2.4 Superestructura

Generalmente el tipo de superestructura es influenciado por las condiciones del sitio, longitud de los claros y los costos. Sin embargo, existen situaciones en las que dos o más tipos de superestructura pueden ser consideradas soluciones óptimas. Cuando se tenga una situación en que haya múltiples posibles soluciones, la estética puede servir como criterio para la elección final del tipo de puente a construir.

En el Capítulo 2 se explicó a detalle el funcionamiento y los procesos constructivos de distintos tipos de puentes con el fin de que el ingeniero o arquitecto tenga una perspectiva más amplia de las opciones posibles. Conociendo los principios estructurales de cada uno de ellos y considerando la magnitud del proyecto será más sencillo visualizar qué tipo de puente podrá cumplir con la meta propuesta y cuales no valdrán la pena siquiera discutir. Así, poseer estos conocimientos puede permitir reducir el proceso del diseño conceptual de la obra.

Siempre habrá otros factores determinantes que se deben tomar en cuenta en el diseño conceptual de un puente. Entre los distintos elementos que influyen en la elección de la superestructura se destacan los siguientes:

- Geometría de la carretera.
- Requisitos propios de los claros.
- Topografía y condiciones de cimentación.
- Ubicación de puntos de donde se aprecie el puente y su papel simbólico.
- Costo.

El costo de un puente en relación con la longitud que debe cubrir es el parámetro más importante. Observando la Figura 4.2, nos podemos dar cuenta que el precio de los puentes colgantes es muy elevado no importando la longitud de los mismos. Sin embargo, se observa también que a medida que éstos crecen en longitud se vuelven los más económicos; es decir, el aumento del costo por efecto de la distancia es significativamente menor en este caso, en comparación con el incremento del costo con la distancia de los demás tipos de puentes.

Además, los puentes colgantes permiten salvar claros que para cualquier otro tipo de puente serían inalcanzables.

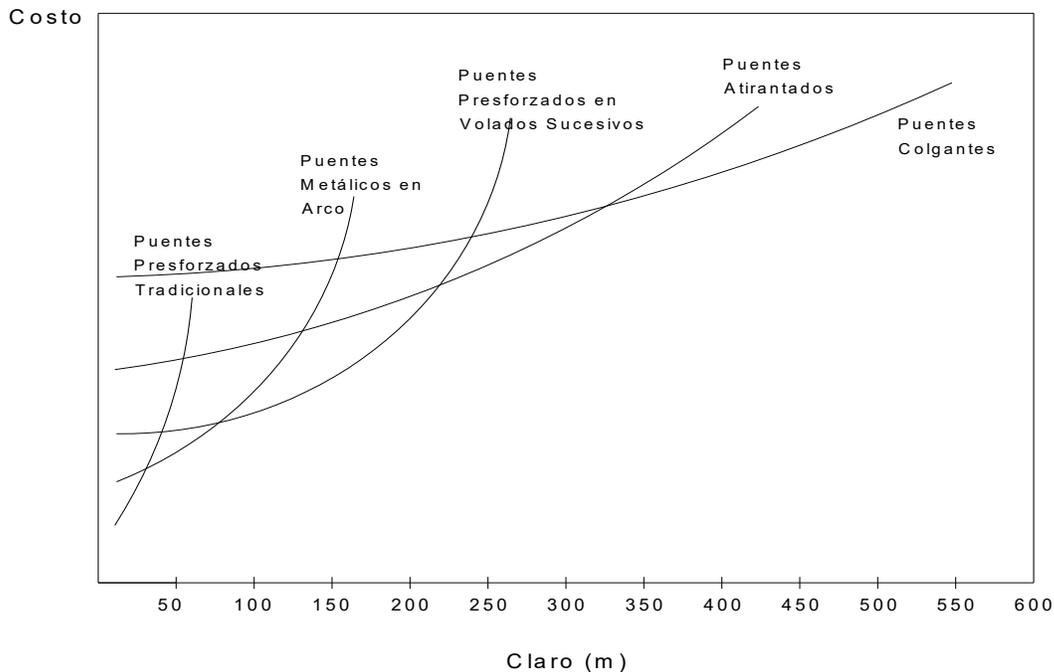


Figura 4.2 Relación de los costos de un puente con su claro.

4.2.5 Subestructura

La subestructura está formada por los estribos, columnas, pilastras, pilas o pilotes. Se trata del conjunto de elementos que soportan la estructura horizontal. En puentes tipo viga, la subestructura influye mucho en la apariencia del puente. Un ligero cambio en la posición y forma de las columnas y estribos pueden hacer una gran diferencia estética y hasta pudiera ayudar a reducir costos.

4.2.5.1 Posición de las columnas

Las columnas deben estar dispuestas de acuerdo a la topografía del sitio. Nunca se debieran colocar en las partes más profundas de un valle porque esto incrementará los costos innecesariamente. Es importante tomar en cuenta lo

anterior pues el costo de la subestructura puede ser de entre 25% y 40% del costo total del puente.

El costo de la superestructura se eleva considerablemente conforme aumenta la longitud del puente, mientras que el costo de la subestructura decrece (Figura 4.3).⁵⁷

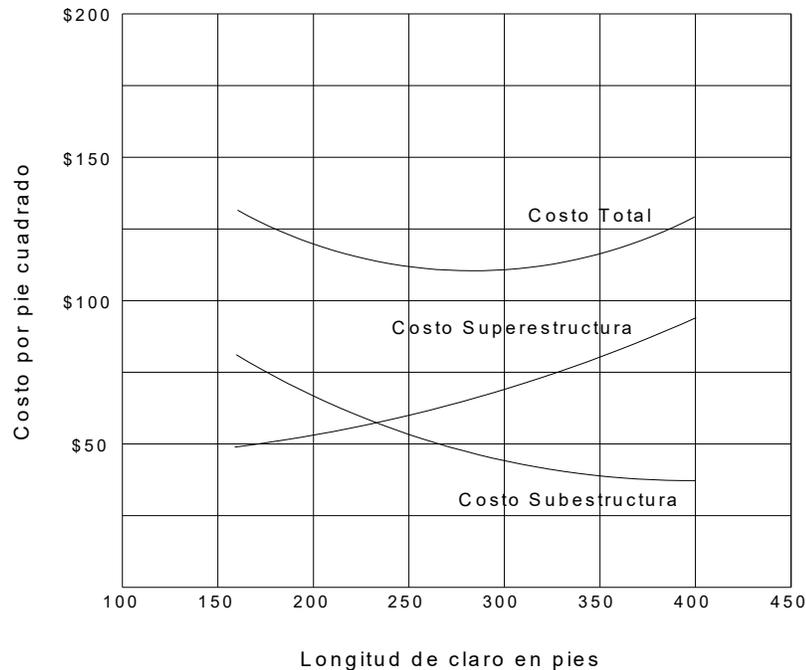


Figura 4.3 Curva típica de costos, en dólares.⁵⁸

Como se puede observar en la Figura 4.3, después de cierto rango el costo total del puente aumenta, lo cual hace que el decremento del costo de la subestructura se vuelva superfluo. Sin embargo, en el rango de los puentes cortos o de mediana longitud, se puede aprovechar esta información en cuanto a costos y estética. Por ejemplo, Gottemoeller recomienda que la longitud del claro sea mayor que la altura de la columna (Figura 4.4). Esto permitirá tener una menor cantidad de pilas o columnas, lo cual abaratará los costos de la subestructura; sin

⁵⁷ Op. Cit. *Bridgescape. The art...* p. 100.

⁵⁸ Tomada de *Bridgescape. The art of designing bridges.* p. 101.

embargo, al mismo tiempo aumentarán las dimensiones, pesos y costos de la superestructura. El desafío consiste en encontrar un punto de equilibrio en que el aumento del costo de la superestructura sea compensado por la reducción del costo de la subestructura. Por supuesto, se pueden aplicar los criterios del Capítulo 3 para reducir los esfuerzos a que estarán sometidos los elementos estructurales y con ello, al mismo tiempo disminuirá el peso de la estructura.

También es recomendable, cuando sea posible, que el número de claros sea impar, como se muestra en la Figura 4.4. Incluso es importante guardar las proporciones horizontales entre los diferentes claros y columnas ($L_1/h_1=L_2/h_2=L_3/h_3\dots$).

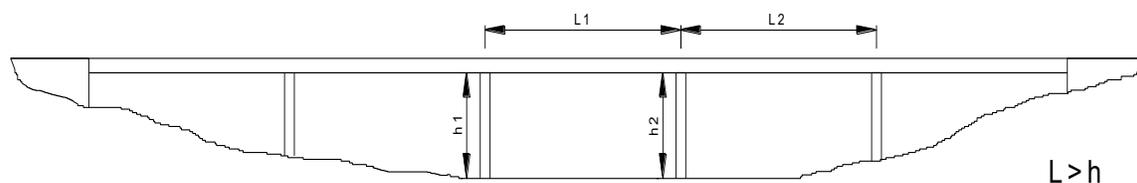


Figura 4.4 Proporciones horizontales.⁵⁹

4.2.5.2 Estribos

En los puentes largos sus estribos pueden llegar a ser ignorados debido a que los ojos de los espectadores se dirigen a la estructura principal. Sin embargo, en puentes cortos los estribos pueden ser un factor determinante para la apariencia general de un puente. Así, los estribos muy robustos pueden hacer que el puente pierda elegancia; sin embargo, si los estribos son pequeños tal vez se tenga que aumentar el peralte de las vigas que conforman la superestructura. Un equilibrio entre estos dos factores creará una apariencia refinada y elegante. Los estribos

⁵⁹ Tomada de *Bridgescape. The art of designing bridges*. p. 102.

pequeños harán que el puente parezca más largo y permitirán una vista más agradable del paisaje al pasar por debajo de él.

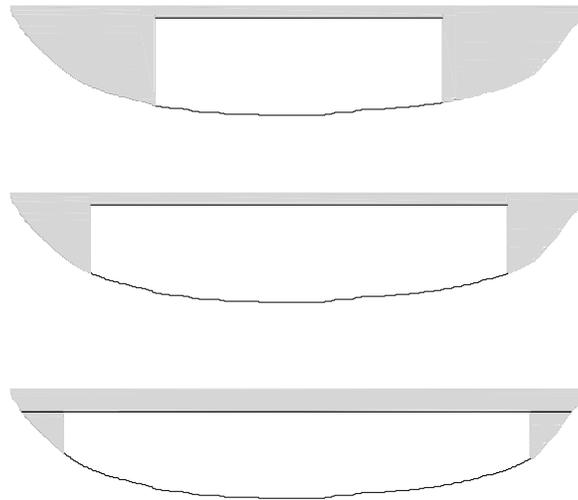


Figura 4.5 Diferentes tamaños de estribos.

4.3 APROVECHAMIENTO DEL ESPACIO

4.3.1 El Espacio Alrededor Del Puente

Cuando nos aproximamos a un puente en automóvil, generalmente nuestra vista se concentra en esa estructura y el camino que nos lleva a la misma, así como el paisaje, queda en segundo plano. Sin embargo, en ocasiones los espacios que rodean a los puentes pueden ser tan agradables a la vista de los espectadores como las mismas estructuras.

El espacio que se encuentra alrededor del puente tiene distintas funciones estéticas:

- Es el escenario donde se observa al puente.
- Es el paisaje que se avista desde el puente.
- Proporciona una oportunidad de enmarcar y crear un contraste con el puente.

Conscientes de lo anterior, es importante que tanto los arquitectos como los ingenieros tomen en cuenta el contexto que proporciona el espacio que rodeará a la futura estructura. En el capítulo anterior se habló de Robert Maillart, uno de los ejemplos más notables de un ingeniero que supo actuar como artista estructural. Además de diseñar puentes eficientes y económicos, Maillart fue capaz de integrar perfectamente sus obras con el medio físico. En el puente Salginatobel, dicho ingeniero aprovechó la vegetación y las rocas para esconder la cimentación mientras quedaba a la vista solamente la elegante forma de sus elementos estructurales (Figura 4.6).



Figura 4.6 Puente Salginatobel.⁶⁰

4.3.2 El Espacio Debajo Del Puente

Así como el espacio que sirve de escenario a los puentes es importante, también se debe tomar en cuenta en el diseño conceptual el espacio que está debajo de los mismos e integrarlo al proyecto general. Este espacio se puede aprovechar de

⁶⁰ <http://www.myswitzerland.com/en-us/salginatobel-bridge-schiers.html>

distintas maneras. Muchos países han aprovechado estos espacios con fines artísticos tales como la colocación de esculturas o la exhibición de pinturas; la construcción de corredores, estacionamientos o jardines. En ocasiones, incluso, esos espacios son usados para actividades comerciales.

En México, se han estado aprovechando los espacios bajo puentes de manera muy creativa. Sobre la avenida Río Churubusco, en Coyoacán, Distrito Federal, cualquiera puede disfrutar de buena comida y bebida bajo el tránsito incesante que pasa por encima del tablero, el cual está apoyado sobre grandes vigas de concreto reforzado. Aunque no se trata de un puente agradable en sí mismo, los árboles y el ambiente urbano a su alrededor logran lo que a veces no es posible: la conexión entre las personas y la estructura (Figura 4.7).



Figura 4.7 Puente en Avenida Río Churubusco, Coyoacán, México.⁶¹

⁶¹ <https://www.google.com.mx/maps/>

CONCLUSIONES

Los puentes han sido, son y serán obras valiosas para la sociedad. A través de la historia han sido vínculos entre comunidades y culturas, se han construido con fines de estrategia militar para atacar al enemigo y derrumbado por motivos de defensa. Los puentes han unido países para intensificar el intercambio comercial y la diversidad cultural, pero también han funcionado para conquistar y someter comunidades y naciones; en épocas antiguas eran símbolos de dignidad, poder y grandeza; en la actualidad son la representación del arte, la ciencia, arquitectura e ingeniería unificados.

Dada la importancia histórica, social y económica de los puentes, cuando se proyectan y construyen estas obras de ingeniería no podemos tomarlas a la ligera. Cada proyecto, por tener características distintas, ofrece la oportunidad de construir algo único que deje huella en la historia.

A través de estas páginas, se ha discutido que el ingeniero debe tener mayor participación en cuanto a los aspectos estéticos de los puentes. Más aún, debiera tener el mando. Pero para que esto ocurra, los ingenieros deben desarrollar habilidades artísticas, paralelamente a la capacidad técnica correspondiente a esta profesión, para que el producto final sea arte estructural. Naturalmente, el lugar más apropiado para que esto suceda es la escuela.

El arte estructural depende de tres disciplinas fundamentales que ya fueron mencionadas en este trabajo: eficiencia, economía y elegancia. Este último aspecto está regido por los dos primeros. Pero si pensáramos que al buscar la elegancia aseguramos los otros dos aspectos, en la mayoría de los casos el resultado sería el logro de estructuras estéticas. La elegancia no se define como algo ostentoso, sino como algo bello y a la vez sencillo. Siguiendo la filosofía presentada en el apartado de la teoría estructural, capítulo 3, podríamos diseñar estructuras esbeltas y sencillas; es decir, elegantes. Si la *eficiencia* se define como *hacer más con menos*, esto se cumplirá si se utiliza *más* material de construcción donde los esfuerzos son mayores y *menos* donde son mínimos. Al diseñar

elementos de sección variable, crearemos estructuras más ligeras, lo cual se traduce en ahorro monetario. Si usamos menos material en general, cumplimos con el factor económico. Por supuesto que la estética no debe comprometer la seguridad; sin embargo, tampoco la seguridad debe descartar a la primera.

La estética de un puente debe ser considerada desde las primeras etapas del proyecto, en particular durante del diseño conceptual. No debemos olvidar que la mayoría de los puentes estéticos son esbeltos y sencillos, que sus líneas deben parecer continuas a lo largo de los mismos y que sus formas estructurales han de reflejar su comportamiento, consecuencia de las fuerzas que actúan sobre ellos. Diseñar un puente complicado y ostentoso puede ser contraproducente, especialmente si se trata de una estructura de longitud corta.

En los capítulos 3 y 4 se mencionaron algunas ideas y recomendaciones que se debieran tener presentes durante la etapa del diseño conceptual de un puente que ayudan a evitar los errores más comunes. Sin embargo, es tarea del ingeniero profundizar sus conocimientos sobre el tema con el fin de desarrollar sus habilidades artísticas. El resultado final al diseñar la estructura dependerá del tipo de problema a resolver y de los recursos disponibles. Pero, a la vez, dependerá del sello personal del ingeniero estructurista, el cual es producto de su creatividad y sensibilidad.

A lo largo de este trabajo se ha hablado, principalmente, de la tarea personal del ingeniero. Sin embargo, éste profesional no es el único responsable de que un proyecto se lleve a cabo. Cada empresa tiene sus propias políticas en cuanto a la estética –aunque no siempre es así- que es complicado modificar cuando no son las más adecuadas. Por esta razón, es muy importante tener presente que, aunque un sólo ingeniero o arquitecto no puede cambiar las políticas estéticas de una empresa, en todo momento oportuno debiera recomendarlo. Las empresas constantemente desarrollan materiales nuevos y procedimientos constructivos más eficientes con la activa participación de profesionales de la ingeniería. Entonces, si dichos profesionales participan en

estas innovaciones, también debieran ser capaces de recomendar mejores políticas sobre cuestiones estéticas.

Quizá el problema de la estética aplicada a obras de ingeniería civil sea más profundo. Sin embargo, la respuesta está, en primera instancia, en las escuelas donde se debieran impartir asignaturas o talleres que estimulen a los estudiantes a tomarlo en cuenta, en todos los casos, la cuestión estética en sus actividades profesionales. En este mismo sentido, también es necesario educar a los gobernantes y al público en general, los gobernados. Los primeros debieran facilitar la participación ciudadana en temas de infraestructura, mientras que los segundos debieran exigir que se les tome en cuenta en la toma de las decisiones que finalmente terminarán afectándoles como usuarios de dicha infraestructura. La competencia entre empresas constructoras pudiera contribuir a que los puentes tengan un impacto visual positivo pues pudiera haber algunas más propensas que otras a considerar lo estético, junto a los aspectos económico y funcional, de sus obras. Antes de terminar este trabajo, se debe mencionar que esto también puede verse como una cuestión ética. Todos los involucrados en la construcción de una obra de ingeniería civil –puentes en este caso- desde su concepción hasta su ejecución, estamos obligados a realizar un trabajo sobresaliente ya que los ciudadanos esperan los mejores resultados a cambio de sus impuestos.

Lo presentado en estas páginas de ninguna manera pretende ser una guía que proporcione los lineamientos exactos a seguir cuando se diseña un puente - está muy lejos de serlo. En general, este trabajo ha sido realizado con la intención de que sirva como una humilde fuente de inspiración para las personas que tengan la inquietud de aventurarse en el mundo de la ingeniería de puentes. En cuanto a los estudiantes, futuros ingenieros, la intención es que cuenten con otra fuente de información acerca de estas estructuras. Finalmente, cabe la posibilidad de que este trabajo sirva a algunos profesores para enriquecer el contenido de sus asignaturas o que, por lo menos, las referencias bibliográficas ayuden a no cesar su búsqueda de conocimiento.

GLOSARIO

Acero: aleación de hierro y carbono en proporciones variables que, según su tratamiento, adquiere elasticidad, dureza o resistencia.

Antropogénico: se refiere a los efectos, procesos o materiales que son resultado de la actividad humana.

Arco: sección de un círculo que une dos puntos del mismo.

Cimbra: estructura o armadura, de madera o acero, que sirve como base para la construcción de elementos estructurales.

Cimiento: parte de la estructura que queda enterrada y que sostiene a toda la construcción.

Claro: espacio entre apoyos.

Concreto: mezcla heterogénea de agua y agregados pétreos como arena, grava y cemento.

Concreto presforzado: se refiere a la creación intencional de esfuerzos permanentes en una estructura con el propósito de mejorar su comportamiento y resistencia bajo condiciones de servicio.

Concreto reforzado: combinación de concreto y acero para conformar un elemento estructural. El acero proporciona la resistencia a la tensión de la cual carece el concreto.

Cortante: la fuerza cortante en una sección de un elemento estructural cualquiera, es igual a la proyección –según la sección- de la suma de todas las fuerzas, activas y reactivas, a la izquierda o a la derecha de la sección.

Dovelas: elemento constructivo, piezas o secciones que conforman un arco y que pueden ser de diferentes materiales.

Ductilidad: capacidad de un material para disipar energía.

Esfuerzo de compresión: resultante de las tensiones o presiones dentro de un sólido deformable que tiende a acortar las dimensiones de un cuerpo en determinada dirección.

Esfuerzo: fuerza interna aplicada, que actúa por unidad de superficie del material que da forma a un elemento estructural por efecto de una carga externa.

Estribo: es la parte de un puente que soporta el peso del tablero y que transmite dicha carga y su peso propio al terreno.

Estructura: entidad física concebida como una organización de elementos dispuestos en el espacio y diseñados para soportar cargas gravitacionales y horizontales.

In situ: expresión que significa en el sitio.

Momento flexionante: el momento flexionante, en una sección de un elemento estructural cualquiera, es igual a la suma de los momentos de todas las fuerzas, activas y reactivas, a la izquierda o a la derecha de la sección, con respecto al centroide de dicha sección.

Pilas: elementos de concreto armado que se usa en cimentaciones profundas. Se vuelan in situ y tienen gran capacidad de carga. La diferencia básica entre las pilas y pilotes son sus dimensiones. El diámetro de una pila suele variar entre 0.80 2.20 m mientras las dimensiones transversales de los pilotes son mucho menores.

Pilotes: elementos estructurales de concreto reforzado que se utilizan en cimentaciones profundas. Los pilotes permiten transmitir cargas hasta estratos resistentes después de atravesar suelos blandos. Son prefabricados y luego transportados e hincados en su ubicación definitiva por medios mecánicos.

Pontón: barco chato que se utiliza para cruzar ríos o construir puentes.

Resistencia: capacidad de un material para absorber las cargas que actúan sobre él sin llegar a la falla por fractura o flujo plástico.

Rigidez: propiedad de un cuerpo, elemento o estructura de oponerse a los desplazamientos.

Subestructura: parte o conjunto de partes tales como estribos, pilas o pilotes, etcétera. La subestructura soporta al tramo horizontal de un puente.

Superestructura: parte del puente que se construye sobre apoyos. Está constituida por la losa, las vigas, bóveda, estructura metálica, etcétera, lo cual constituye el tramo horizontal.

Tensión: estado de un cuerpo sometido a la acción de fuerzas opuestas que lo atraen. El material tiende a alargarse por efecto de dicha acción.

Viga: miembro estructural diseñado para soportar cargas aplicadas perpendicularmente a su eje.

Voladizo: elemento de construcción que se prolonga horizontalmente más allá del elemento que lo soporta.

BIBLIOGRAFÍA

Petros P., Xanthakos. *Theory and Design of Bridges*. Estados Unidos, Wiley & Sons Inc., 1994.

Chung C. Fung y Shuqing Wang. *Computational Analysis and Design of Bridge Structures*. Estados Unidos, Taylor and Francis Group, 2015.

Jean-Paul Lebet y Manfred A. Hirt. *Steel bridges: Conceptual and Structural Design of Steel and Steel-Concrete Composite Bridges*. Suiza, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.

Gottemoeller, Frederick. *Bridgescape: The Art of Designing Bridges*. Estados Unidos, Wiley & Sons, Inc., 1998.

Cardellach, Félix. *Filosofía de las estructuras*. 2da edición. Barcelona, Editores Técnicos Asociados, 1997.

Charles Stewart Drewry. *A memoir on suspension bridges, comprising the history of their origin and progress, and of their application to civil and military purposes; with descriptions of some of the most important bridges*. Leopold Classic Library.

Edward Denison e Ian Stewart. *How to Read Bridges: A Crash Course in Engineering and Architecture*. Estados Unidos, Rizzoli International Publications Inc, 2012.

Julio Cesar. *Comentarios a la guerra de las Galias*. España, Alianza Editorial, 2002.

David J. Brown. *Bridges. Three Thousand Years of Defying Nature*. Estados Unidos, Firefly Books Ltd, 2005.

PÁGINAS WEB

Jensen, Jens Jacob. *History of Bridges: A Philatelic Review*. Noruega. Disponible

en:

<https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chromeinstant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=history+of+bridges+a+philatelic+review>

Consulta: 24 de enero de 2016.

Baker, Peter. *Crossing the Hellespont: a Study in Ancient Logistics*. VI Classics

Colloquium, 2005. Disponible en:

<http://www.unisa.ac.za/contents/faculties/humanities/classical/docs/DAEDALUSCROSSING%20THE%20HELLESPONT.pdf>

Consulta: 24 de enero de 2016.

Subcommittee of Bridge Aesthetics of the Transportation Research Board (TRB).

Bridge Aesthetics Sourcebook. Disponible en:

http://www.wsdot.wa.gov/publications/fulltext/Bridge/Aesthetics_Sourcebook.pdf

Consulta: 24 de enero de 2016.

FOTOGRAFÍAS

Figura 1.1 Tarr Steps en Exmoor, Inglaterra, 1000 a.C.

http://www.picturesofengland.com/England/Somerset/Liscombe/Tarr_Steps

Figura 1.2 Puente del Helesponto, 480 a.C.

<http://www.johnstockmyer.com/mwcc/wcilect/11.htm>

Figura 1.3 Acueducto de Segovia, España, 100 d.C.

<http://coordenadasgps.webnode.es/products/acueducto-de-segovia/>

Figura 1.4 Modelo del puente de Julio Cesar sobre el Rin, 55 a.C.

<http://ancientrome.ru/art/artworken/img.htm?id=6536>

Figura 1.5 Puente Anji, China, 605 d.C.

<http://www.chinahighlights.com/china-trains/beijing-to-guangzhou-train.htm>

Figura 1.6 Puente Qingdao Haiwan en China, 2011.

<http://architectism.com/the-worlds-longest-sea-bridge-the-jiaozhou-bay-bridge/>

Figura 1.7 Puente de Coalbrookdale, Inglaterra, 1779.

<http://www.worldarchitecturemap.org/buildings/coalbrookdale-iron-bridge>

Figura 1.9 Puente Russky en Vladivostok, Rusia, 2012.

<http://rusbridge.net/>

Figura 1.10 (Izquierda) Puente suspendido de vidrio dentro del Museo de Ciencia de Londres. (Derecha) Puente Skywalk, a 1.2 km de altura en Arizona, Estados Unidos.

<http://www.panoramio.com/photo/15525847> y <http://incadventures.com/tour-category/tours-from-las-vegas/grand-canyon/west-rim-tours/>, respectivamente.

Figura 1.11 El puente Golden Gate en San Francisco, California, 1937.

<http://foundtheworld.com/golden-gate-bridge/>

Figura 2.4 Puente Gateway en Brisbane, Australia, 1986.

<http://www.couriermail.com.au/news/queensland/duplicate-gateway-bridge-carries-nearly-50000-vehicles-a-day-in-the-first-year-since-its-opening/story-e6f9e0of-1226061760972>

Figura 2.7 New River Gorge en Estados Unidos, 1977.

https://en.wikipedia.org/wiki/File:New_River_Gorge_Bridge_by_Donnie_Nunley.jpg

Figura 2.8 Puente Infiernillo I, en Michoacán, México.

Foto tomada por el Ing. Carlos Arce León, académico de la FES Acatlán de la UNAM.

Figura 2.10 Puente Sutong en China, 2008.

<http://megaconstrucciones.net/?construccion=puente-sutong>

Figura 2.12 Puente Akashi Kaikyo en Japón, 1998.

<http://www.japan-guide.com/e/e3559.html>

Figura 2.14 Puente de Hood Canal en Washington, 1961.

<https://landingaday.wordpress.com/tag/hood-canal-bridge/>

Figura 3.1 Puente peatonal Helix en Singapur inaugurado en 2010.

<http://www.worldfortravel.com/2014/06/15/the-double-helix-bridge-marina-bay-singapore/>

Figura 3.4 Puente Tavanasa, Suiza, 1905.

<http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=1357>

Figura 3.5 Puente Salginatobel, Suiza, 1930.

<https://www.locationscout.net/switzerland/983-salginatobel-bridge-switzerland>

Figura 3.6 Cimbra para el puente Salginatobel.

<http://www.pontipedia.es/noticias/puentes/hormigon/salginatobel-bridge-13014.htm>

Figura 3.7 Puente de Jerusalén, Israel, 2008.

<http://lavozdelmuro.net/14-chapuzas-millonarias-del-santiago-calatrava-a-lo-largo-del-mundo/>

Figura 4.6 Puente Salginatobel.

<http://www.myswitzerland.com/en-us/salginatobel-bridge-schiers.html>

Figura 4.7 Puente en Avenida Río Churubusco, Coyoacán, México.

<https://www.google.com.mx/maps/>