

més a més, poques vegades volem simplement copiar perquè la situació o el nostre esperit creador no ho permet. Però, quan els dissenyadors ens encarem amb el problema de fer alguna cosa que va més enllà del que s'ha fet abans, val molt més examinar els fracassos del passat que no pas els seus èxits. Són només els fracassos allò que ens deixa veure amb claredat el que intentem evitar, i l'única manera d'assegurar l'èxit és obviar al fracàs.

Bibliografia citada

- FERGUSON, Eugene S. (1977), «The Mind's Eye: Nonverbal Thought in Technology», *Science*, 197.
- FISHER, John W. (1984), *Fatigue and Fracture in Steel Bridges: Case Studies*, John Wiley & Sons, Nova York.
- GORDON, J. E. (1981), *Structures: Or why Things don't fall down*, Da Capo Press, Nova York.
- LEONHARDT, Fritz (1984), *Bridges: Aesthetic and Design*, The MIT Press, Cambridge, Mass.
- MCCULLOUGH, David (1972), *The Great Bridge*, Simon and Shuster, Nova York.
- PETROSKI, Henry (1985), *Engineer is Human: The Role of Failure in Successful Design*, St. Martin Press, Nova York.
- (1987), «Inventions Spurned: On Bridges and the Impact of Society on Technology», *Impact of Science on Society*, 147.
- ROEBLING, J. A. (1841), «Some Remarks on Suspension Bridges, and on the Comparative Merits of Cable and Chains Bridges», *American Railroad Journal and Mechanics' Magazine*, abril 1.
- SIBLY, P. G. i WALKER, A. C. (1977), «Structural Accidents and Their Causes», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, part 1, 62.
- VINCENTI, Walter G. (1986), «The Davis Wing and the Problem of Airfoil Design: Uncertainty and Growth in Engineering Knowledge», *Technology and Culture*, 27.

E L DISEÑO COMO MANERA DE OBIVIAR EL FRACASO

RESUMEN

Evitar sistemáticamente el fracaso es lo que caracteriza el diseño racional. Por esto los estudios históricos de casos de fracaso están llenos de información importante para el éxito del diseño, y el diseñador que desconozca la historia de los fracasos corre el riesgo de repetir viejos errores. En lugar de comentarlos de una manera general en este ensayo, vamos a examinar estas ideas son en el contexto del ejemplo específico de la ingeniería estructural.

INTRODUCCIÓN

El problema de ingeniería-estructural de diseñar un puente nos puede servir no sólo como paradigma, sino también como metáfora para cualquier problema de diseño. La *necesidad*, o por lo menos el *deseo*, de tender un puente se produce previamente, y nunca pensando en un diseñador determinado. Alguna persona, grupo o comunidad percibe habitualmente la necesidad de tender un puente, porque el papel que dicho puente desempeña —permitir que el tráfico se mueva con eficacia, seguridad y fiabilidad del punto A al punto B pasando por encima de todo obstáculo o estorbo que pueda haber entre ambos puntos— no puede cumplirse por medios o procedimientos ya existentes.

La necesidad de disponer de un puente define un problema de diseño que de inmediato se plantea a los que están acostumbrados a tratar dichos problemas: los diseñadores de puentes. Los que plantean el problema reconocen, implícita o explícitamente, que los problemas de diseño no tienen soluciones únicas, y que a menudo se realiza un concurso de diseño. Los que quieren que se construya un puente especifican sus funciones y delinear las exigencias que definen los datos específicos de cada problema del puente: dónde se debe construir el puente, cuánto tráfico debe soportar, de qué margen de altura debe disponer, cómo debe encajar con la infraestructura existente, etc. Es aquí cuando el diseñador suele empezar a trabajar, y aunque las restricciones sociales, ergonómicas y ambientales no están impuestas explícitamente en la definición del problema del diseño, el diseñador las verá como aspectos autoimpuestos, naturales y deseables de toda solución. Para conseguir un éxito verdadero, cualquier diseño de debe dejar de cumplir con *todos* los requisitos y las restricciones, tanto explícitos como implícitos. El problema del diseño es fundamentalmente, por lo tanto, un problema de anticipar y obviar el fracaso.

era comprendre com i per què els ponts anteriors havien fallat. Un problema especialment difícil de superar foren els vents forts, i Roebling escriví un assaig el 1841 en el qual descriví diversos fracassos famosos de ponts suspesos per culpa del vent. Després de moltes pàgines en què va descriure les vicissituds de la construcció de ponts, va tancar el seu assaig amb una disculpa:

Les observacions precedents [sobre problemes i accidents relacionats amb els ponts penjants] no s'han fet per a desacreditar els ponts penjants. Atribuir-me aquesta intenció seria injust. No hi pot haver un admirador més gran del sistema que jo mateix. [...] En parlar dels punts fluixos del sistema, només he volgut mostrar les precaucions que són necessàries en dissenyar i construir un pont penjant per a garantir-ne la seguretat (ROEBLING, 1841 : 196).

No solament el vent, sinó la naturalesa del trànsit que els ponts suspesos de mitjan segle XIX havien de suportar va fer que el disseny d'un pont reeixit esdevingués una empresa formidable. A mitjan segle, els dissenyadors tradicionals de ponts acceptaren el fet que no es podia fer un pont penjant de cinc-cents o mil peus de longitud que fos prou rígid per a suportar el pes concentrat de les locomotores ferroviàries, cada vegada més pesants, que aleshores es construïen. Els grans enginyers britànics, com Robert Stephenson i Isambard Kingdom Brunel, idearen mitjans complicats per a cobrir unes grans distàncies amb rígids (i cars) ponts de travesses, però Roebling, quan compregué tot el que podria ocórrer si un pont penjant s'esfondrava, sabé inventar una manera d'obviar a tal fracàs mitjançant un disseny més econòmic. El seu Niagara Bridge de dos pisos fou enginyosament endurit i subjectat amb cables i s'obrí al servei ferroviari i de carros de transport el 1855.

L'EVOLUCIÓ DELS PONTS PENJANTS

«Millorar» els dissenys ja existents pertany a la naturalesa del disseny. En el cas dels ponts penjants, això implica no solament construir ponts encara més llargs, sinó fer-ho d'una manera més econòmica. Com que els ponts reeixits, com els de John Roebling, semblaven coses corrents, sorgí la tendència previsible, augmentada pels interessos pecuniaris dels qui volen la construcció de ponts i pels interessos estètics dels qui els dissenyen, a eliminar-ne part de l'excés de pes, com també del material que no solament costa molts diners, sinó que també destrueix les línies del pont. Al cap i a la fi, si els ponts de Roebling podien suportar totes les vicissituds del temps, del riu i del trànsit, ¿no havia pensat ell en tot i no havia dissenyat contra totes les escomeses a què un punt suspès pot estar subjecte? No havia obviat a tots els tipus de fracàs? De fet, des del moment que els seus ponts i uns altres com els d'ell havien complert tan bé la seva funció durant tants

anys, els ponts penjants no eren *sobredissenyats*? Certament, en el segle XX, quan els principis del disseny d'estructures eren molt més sofisticats que els del segle XIX, els grans ponts no necessitaven tant acer modern com els seus avantpassats.

Per això l'evolució dels ponts penjants de la primera part del segle XX donà lloc a dissenys tan afins com l'originari George Washington Bridge (abans que hi afegissin un pis inferior), el Bronx-Whitestone (abans d'afegir-hi el tramet rígid) i el Tacoma Narrows Bridge (abans que s'enfonsés). L'estètica del disseny dels ponts suspesos dels anys trenta apuntava cap a ulls de pont més llargs amb estructures de coberta molt poc profundes, cosa que conduí al final a un tipus de fracàs inesperat però no sense precedents històrics (SIBLY i WALKER, 1977 : 191-208).

Mentre que el Brooklyn Bridge tenia un pis molt profund que servia per a endurir la calçada del trànsit i complicats cables de suspensió en diagonal per a enrigidir-lo amb vista al vent, els ponts més recents s'havien convertit en estructures que solament posseïen vestigis d'aquelles característiques. Allò que Roebling havia meditat llargament per tal d'obviar al fracàs els seus successors ho oblidaren o ni tan sols ho imaginaren. La càrrega enorme dels vuit canals del George Washington Bridge féu que el seu pis pesés tant que la seva mateixa inèrcia pogué resistir el vent. El Bronx-Whitestone i els seus contemporanis, dissenyats uns cinc o deu anys després, començaren a mostrar signes d'una flexibilitat excessiva respecte al vent quan foren inaugurats a la fi dels anys trenta.

S'arribà al límit quan s'inaugurà el Tacoma Narrows, amb un pis molt estret només de dos canals —perquè el trànsit de Puget Sound no necessitava més— molt poc profund, que recolzava en unes innovadores jàsseres sòlides. El pont era, de fet, prou fort per a suportar el seu propi pes i el trànsit que hi circulava, però als seus dissenyadors no se'ls ocorregué que el vent en pogués tòrcer la lleugera estructura amb la seva violència. Encara que els dissenyadors potser van anticipar i dissenyar correctament totes les altres menes de fracàs en què el seu pont podia fallar, el fet que no pensessin en l'*únic tipus crític* de fracàs és ara el que té importància.

CONCLUSIÓ

Existeix una tendència a buscar models en els èxits del passat quan hom topa amb nous problemes de disseny. Creiem que el que ha funcionat bé en el passat ens pot guiar per al funcionament futur. Aquest enfocament és correcte si tot el que volem fer és una còpia aproximada de quelcom que ha de funcionar en un context gairebé idèntic (i com més semblant, millor). Acostuma a haver-hi prou conservadorisme al model i a la nostra còpia per a permetre l'analogia imperfecta, però és evident que il·lusions d'aquesta mena no poden continuar sense perill. A

més a més, poques vegades volem simplement copiar perquè la situació o el nostre esperit creador no ho permet. Però, quan els dissenyadors ens encarem amb el problema de fer alguna cosa que va més enllà del que s'ha fet abans, val molt més examinar els fracassos del passat que no pas els seus èxits. Són només els fracassos allò que ens deixa veure amb claredat el que intentem evitar, i l'única manera d'assegurar l'èxit és obviar al fracàs.

Bibliografia citada

- FERGUSON, Eugene S. (1977), «The Mind's Eye: Nonverbal Thought in Technology», *Science*, 197.
- FISHER, John W. (1984), *Fatigue and Fracture in Steel Bridges: Case Studies*, John Wiley & Sons, Nova York.
- GORDON, J. E. (1981), *Structures: Or why Things don't fall down*, Da Capo Press, Nova York.
- LEONHARDT, Fritz (1984), *Bridges: Aesthetic and Design*, The MIT Press, Cambridge, Mass.
- MCCULLOUGH, David (1972), *The Great Bridge*, Simon and Shuster, Nova York.
- PETROSKI, Henry (1985), *Engineer is Human: The Role of Failure in Successful Design*, St. Martin Press, Nova York.
- (1987), «Inventions Spurned: On Bridges and the Impact of Society on Technology», *Impact of Science on Society*, 147.
- ROEBLING, J. A. (1841), «Some Remarks on Suspension Bridges, and on the Comparative Merits of Cable and Chains Bridges», *American Railroad Journal and Mechanics' Magazine*, abril 1.
- SIBLY, P. G. i WALKER, A. C. (1977), «Structural Accidents and Their Causes», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, part 1, 62.
- VINCENTI, Walter G. (1986), «The Davis Wing and the Problem of Airfoil Design: Uncertainty and Growth in Engineering Knowledge», *Technology and Culture*, 27.

E L DISEÑO COMO MANERA DE OBIVIAR EL FRACASO

RESUMEN

Evitar sistemáticamente el fracaso es lo que caracteriza el diseño racional. Por esto los estudios históricos de casos de fracaso están llenos de información importante para el éxito del diseño, y el diseñador que desconozca la historia de los fracasos corre el riesgo de repetir viejos errores. En lugar de comentarlos de una manera general en este ensayo, vamos a examinar estas ideas son en el contexto del ejemplo específico de la ingeniería estructural.

INTRODUCCIÓN

El problema de ingeniería-estructural de diseñar un puente nos puede servir no sólo como paradigma, sino también como metáfora para cualquier problema de diseño. La *necesidad*, o por lo menos el *deseo*, de tender un puente se produce previamente, y nunca pensando en un diseñador determinado. Alguna persona, grupo o comunidad percibe habitualmente la necesidad de tender un puente, porque el papel que dicho puente desempeña —permitir que el tráfico se mueva con eficacia, seguridad y fiabilidad del punto A al punto B pasando por encima de todo obstáculo o estorbo que pueda haber entre ambos puntos— no puede cumplirse por medios o procedimientos ya existentes.

La necesidad de disponer de un puente define un problema de diseño que de inmediato se plantea a los que están acostumbrados a tratar dichos problemas: los diseñadores de puentes. Los que plantean el problema reconocen, implícita o explícitamente, que los problemas de diseño no tienen soluciones únicas, y que a menudo se realiza un concurso de diseño. Los que quieren que se construya un puente especifican sus funciones y delinear las exigencias que definen los datos específicos de cada problema del puente: dónde se debe construir el puente, cuánto tráfico debe soportar, de qué margen de altura debe disponer, cómo debe encajar con la infraestructura existente, etc. Es aquí cuando el diseñador suele empezar a trabajar, y aunque las restricciones sociales, ergonómicas y ambientales no están impuestas explícitamente en la definición del problema del diseño, el diseñador las verá como aspectos autoimpuestos, naturales y deseables de toda solución. Para conseguir un éxito verdadero, cualquier diseño de debe dejar de cumplir con *todos* los requisitos y las restricciones, tanto explícitos como implícitos. El problema del diseño es fundamentalmente, por lo tanto, un problema de anticipar y obviar el fracaso.

EL PROCESO DEL DISEÑO

Planteado el problema, definido en términos de datos sobre el emplazamiento, las necesidades circulatorias del tráfico, el ambiente y otras cuestiones pertinentes, ¿cómo se construye en realidad un puente? Según Fritz Leonhardt, destacado ingeniero de puentes alemán,

Los datos deben ser completamente asimilados y considerados. El puente debe entonces adquirir su forma inicial en la imaginación del diseñador. Para que este proceso tenga lugar, el diseñador debería, ante todo y a conciencia, haber visto y estudiado muchos puentes en el transcurso de un largo proceso de aprendizaje. Debería saber [...] cuándo es oportuno un puente de travesaños, un puente de arcos o un puente colgante. (LEONHARDT, 32-33).

Es como si el diseñador hojeara el catálogo acumulado por su mente durante largos años de experiencia, casi de la misma manera como los primeros diseñadores de máquinas consultaban los catálogos sin texto de mecanismos descritos por FERGUSON (1977 : 827-836) y como los diseñadores de aviones estudiaban los de las superficies sustentadoras descritas por VINCENTI (1986 : 717-758).

El diseñador de puentes reconoce que tendrá la ventaja de poder recurrir a la experiencia, pero también que cada puente es único en el sentido de que descansará sobre unos cimientos sobre los que ningún otro puente descansa, y que existirá dentro de un contexto social, ergonómico y ambiental que el mismo puente modificará. Así, según Leonhardt, después que los esbozos del concepto del diseñador hayan sido realizados y criticados con respecto a su conveniencia para el lugar y para su función, el ingeniero de puentes se comporta como un artista con sus bosquejos o bocetos preliminares:

El diseñador debe ahora encerrarse con estos primeros resultados, reflexionar sobre ellos, pensar a fondo su concepto y concentrarse en él con los ojos cerrados. ¿Se han satisfecho todos los requisitos? ¿Será una buena construcción? ¿Éste o aquél no tendría mejor aspecto o no servirían mejor si añadiéramos detalles posteriores? (LEONHARDT, 1984 : 33).

Sólo después de «varias [...] fases de corrección» empiezan los cálculos en serio y

en primer lugar, con simples aproximaciones, se comprueba que las dimensiones asumidas sean suficientes [...] Luego se puede practicar con programas modernos de ordenador, usando diferentes profundidades u otras variables para encontrar las dimensiones más económicas; éstas, sin embargo, sólo deberían ser escogidas si ningún otro requisito esencial, como la estética, la longitud de los accesos, los grados, etcétera, quedan afectados por ellas (LEONHARDT, 1983 : 34).

Aunque un esfuerzo organizado de ingeniería se consume en los cálculos analíticos de las presiones, las desviaciones y otras medidas cuantitativas de rendimiento o de los límites de rendimiento, que podrían definirse como hipotéticos «fracasos» (VINCENTI, 1986 : 717-758), el proceso del diseño es, ante

todo, creativo y no deductivo, y en este sentido no es muy distinto de escribir o de cualquier otro acto creativo (PETROSKI, 1985).

Es evidente que es la elección genérica cualitativa constituye el aspecto inicial creativo e intuitivo del diseño de un puente, mientras que los cálculos y cómputos siguen después, y ello es válido para todo diseño, J. E. Gordon, el ingeniero de aviones y pensador británico, ha escrito:

Ni la matemática ni las fórmulas de los manuales «diseñarán» una estructura para nosotros. Debemos diseñar nosotros mismos a la luz de la experiencia, sabiduría e intuición que podamos poseer; cuando lo hayamos hecho así, los cálculos analizarán el diseño para nosotros y nos dirán, por lo menos aproximadamente, cuales son los esfuerzos y las desviaciones que podemos esperar (GORDON, 1981 : 375).

En cuanto el diseñador, que puede estar compitiendo con otros diseñadores para que los que necesiten o desean que se construya un puente aprueben su encargo, sabe que *el* diseñador será él, empieza el proceso de «detallar». Es un proceso que, sobre todo en casos de grandes proyectos como los puentes, pocas veces exige una sola persona, sino más bien un auténtico ejército para atacar al enemigo del diseño en todas sus manifestaciones. Y el enemigo de todo diseño es el fracaso. Y éste puede llegar no solamente en forma de un derrumbamiento catastrófico, sino también en la ineficacia, la impropiedad o, sencillamente, en la incapacidad para explotar los fenómenos de la naturaleza hasta el máximo considerado posible en cualquier momento dado.

LOS DISEÑOS ACERTADOS NO FRACASAN

Implícita en todo diseño está la suposición de que, bajo condiciones razonables o hasta un nivel esperado de fiabilidad, el objeto diseñado funcionará como fue diseñado, y que *no dejará de hacerlo* ni en su aspecto funcional, económico, estético, social, ergonómico, ambiental ni en cualquier otro de sus aspectos. Entonces el problema del diseñador se reduce, en efecto, a una comprensión del fracaso, ya que el diseñador debe anticipar de qué manera su creación puede fracasar a fin de evitar tal fracaso. Si hay una sola manera de fracasar o un solo escenario de fracaso que no haya sido correctamente previsto y obviado por el diseñador, todo el diseño corre peligro.

Un diseño es una hipótesis y tal hipótesis puede ser verificada, pero jamás comprobada absolutamente (PETROSKI, 1985). En cuanto el diseño existe sobre el papel, tal como describen Leonhardt y Gordon, puede empezar el proceso de análisis. Y el propósito del análisis es *verificar* la hipótesis de que el producto de la imaginación y la experiencia del diseñador *no fracasará*. Para hacerlo, el diseñador (o, en esta etapa, el «analista») debe comprender *cómo* pueden fallar las estructuras. Debe conocer *los modos de fracaso* tan a fondo como sus diseños anteriores, ya que para verificar que su diseño no fracasará, debe poder detectar el tipo de fracaso al que sus cálculos se aplican.

El diseñador acertado obviará todos los modos creíbles de fracaso si hace su estructura lo bastante rígida y fuerte como

para resistir cualquier tormenta, real o metafórica. Comprenderá las cargas y fuerzas estructurales a que estará sujeta su estructura, las esperanzas sociales de sus usuarios, los factores ergonómicos de su diseño y el ambiente en el que su estructura pasará la vida que le espera. Infravalorar la magnitud, la importancia o la interacción de cualesquiera de estos factores es atraer el fracaso. Puesto que el pronóstico es tan difícil en el diseño de puentes como en cualquier otro aspecto de la vida, los diseñadores de éxito evitarán el fracaso utilizando varios modos de prevenirlo, mediante la incorporación a sus diseños de factores de seguridad, redundancia, recursos de mantenimiento y adaptabilidad.

Quienes más han aprendido de los fracasos previos son los que más probabilidades tienen de prever, y obviar así, los fracasos en sus propios diseños. Del mismo modo que el diseñador experimentado sabe cuándo un puente de vigas, de arcos o colgante resuelve mejor un determinado problema de diseño, así el analista experimentado sabe cuándo la combadura, el torcimiento, el pandeo, la fatiga, o cualquier otro modo de fracaso amenaza más el éxito de un diseño.

Y en el caso de los diseños monumentales como los puentes importantes, raramente hay ocasión de someter la estructura a una prueba definitiva, sea filosófica o estructuralmente. Filosóficamente, jamás puede haber *prueba* alguna de que *todos* los posibles modos de fracaso hayan sido pensado, y mucho menos analizados. Y estructuralmente, la prueba que *demonstraría de manera concluyente* la exactitud de cualquier cálculo de la resistencia máxima de la estructura sería, por definición, destructiva. En los diseños que no son únicos, como las máquinas producidas en serie, un proceso de aprendizaje que incluye fallos de componentes o de unidades puede llevar al «perfeccionamiento» de un diseño, pero en el caso de estructuras únicas de ingeniería civil, como los puentes, y de estructuras de la ingeniería aeronáutica, como los transbordadores espaciales, las lecciones que se aprenden a través de fracasos catastróficos son dolorosas y, desde luego, imprevistos añadidos a los canones de la experiencia.

LOS EJEMPLOS DE LA HISTORIA

La historia de los puentes ofrece un buen ejemplo del papel desempeñado por el fracaso en el diseño acertado (PETROSKI, 1985). Los primeros puentes eran de madera y piedra y, en general, su diseño iba evolucionando de la experiencia adquirida por un método del tanteo. Si una determinada clase de puente funcionaba en cierto lugar, su diseño se copiaba para usarlo en otro lugar. Pero si el primero estaba situado en un lugar de aguas más bien tranquilas, mientras el segundo en un lugar de corrientes difíciles y rápidas, los pilares del nuevo puente pronto quedaban socavados y el diseño del puente, seguro en el primer sitio, fracasaría en el segundo. El diseño casi nunca es algo tan fácil que permita trasladar el éxito de una situación a otra. Pero con cada puente perdido se aprendió una lección más sobre cómo puede fracasar un puente, y así el próximo puente podía ser más fuerte a causa de la debilidad del anterior. No reconocer los detalles con capacidad de fracaso que puedan estar o no presentes o latentes en situaciones anteriores, puede conducir al desastre en una nueva situación.

El primer puente de hierro fue acabado en el año 1779 en Coalbrookdale, situado en lo que era entonces el centro de la Revolución Industrial del oeste de Inglaterra. De hecho, el éxito de los fabricantes de hierro de la región fue tan importante que el modo tradicional de atravesar el río Severn con un transbordador fue considerado como un obstáculo al comercio. La idea de construir un puente a través del río en tal lugar había surgido años antes, pero los métodos convencionales del momento para la construcción de puentes necesitaban obras de apuntalamiento que habrían estorbado el tráfico de barcazas en el río y, por tanto, resultaban inaceptables. Aunque el diseño de un puente, para ser acertado, tenía que superar numerosos obstáculos tanto de tipo técnico como de otros tipos (PETROSKI, 1987), el diseño finalmente adoptado fue tan logrado que el puente existe hoy y todavía admite el tránsito de peatones.

Al usar armazones de hierro colado en el mismo lugar y de tamaño sin precedente, los diseñadores del Iron Bridge pudieron construir un arco de treinta metros sin los andamios de madera tradicionales, por el proceso lento y laborioso de colocar piedra sobre piedra hasta que la masa formase un arco capaz de mantenerse por sí mismo. Además, ya que los armazones de hierro en forma de arco abierto permitían que un río caudaloso pasara libremente, había menos probabilidad de que el puente fuera arrastrado por las aguas. El Iron Bridge, desde luego, sufrió reveses menores, como tener que asegurar sus cimientos, pero éstos ocurrían con lentitud y así eran una advertencia suficiente para que pudieran ser corregidos. Y efectivamente las deficiencias fueron corregidas con prontitud, ya que fueron reconocidas como potenciales modos de fracaso que no habían sido obviadas correctamente por los constructores desde el principio.

El Iron Bridge tuvo un éxito enorme por su novedad, principalmente porque imitaba el puente de arco de piedra, perfeccionándolo, y porque el hierro colado era una materia tan buena como la piedra mejor asentada. Sin embargo, mientras el hierro iba evolucionando como materia para la construcción por derecho propio, se produjeron numerosos fracasos de diseños al intentar explotar la resistencia del metal a la *tracción*. Y este problema continúa hoy en día, cuando se emplean nuevas aleaciones, nuevas técnicas de fabricación y nuevos diseños estructurales con intención de sacar partido de las nuevas ventajas que se suponen en una nueva materia. Pero, como ocurre con frecuencia, hay diseñadores excesivamente optimistas que tienden a ignorar cualquier defecto —mal conocido— de una nueva materia, un nuevo proceso o un nuevo diseño, y, por tanto, tienden a minimizar o dejar de lado riesgos de fracaso nuevos o poco conocidos (FISHER, 1984).

EL CASO DE LOS PUENTES COLGANTES

El diseño de puentes también avanza al aceptar desafíos cada vez más ambiciosos. Hace dos siglos los ojos de los puentes fueron medidos, mejor dicho, soñados, en centenas de pies. Hoy en día hay puentes con distancias de una milla entre las torres de suspensión y de dos millas en los tableros y aún más en las mentes de los ingenieros. No obstante, estos símbolos de las proezas de la tecnología moderna no se consi-

guieron sin coste, y la historia de los puentes colgantes está llena de los escombros de aquellos que se hundieron. En general, muchos de dichos fracasos no son del dominio público y son conocidos solamente por los ingenieros de estructuras o por los historiadores de la tecnología. Una excepción notable es el del Puente de Tacoma Narrows; los ingenieros pudieron hacer poco más que filmar el puente mientras se torcía y finalmente se destruía durante el vendaval de 1940. En efecto, los ingenieros de aquella época, aunque practicaban escrupulosamente las normas de su arte, cometieron el imperdonable error de diseño de no conocer la historia de fracasos relacionados con el tipo de estructura con la que trabajaban.

Los puentes colgantes siempre han tenido mala reputación por su flexibilidad y los frágiles puentes para peatones, que encontramos a veces en la montaña donde van nuestros hijos para las colonias de verano, nos ofrecen una experiencia de primera mano. Los puentes más grandes que empezaron a construirse a principios del siglo XIX eran susceptibles de hundirse bajo la marcha rítmica de soldados cuya cadencia correspondía a la frecuencia natural del mismo puente. Aún persiste hoy la superstición de que los soldados deben romper el paso cuando atraviesan *cualquier* puente, incluso los de macizos arcos de piedra; el puente colgante, el Albert Suspension Bridge, que atraviesa el río Támesis en Londres tiene, en su acceso, un letrero con este fin.

John Roebling, el gran diseñador de puentes colgantes del siglo XIX, y su hijo Washington, quien supervisó la construcción del diseño de su padre para el puente de Brooklyn, entendían que el fenómeno del derrumbamiento tenía como causa las vibraciones resonantes. En la pasarela de construcción del gran puente colocó el letrero siguiente (McCULLOUGH, 1972 : 420):

SEGURO PARA NO MÁS DE 25 HOMBRES A LA VEZ. NO CAMINEN JUNTOS. NO CORRAN. NO SALTEN. NO TROTEN. ¡ROMPAN EL PASO!

Pero el mayor Roebling comprendía que no podría establecer reglamentos para las fuerzas de la naturaleza, y que la única manera de construir un puente colgante más largo y más rígido era comprender cómo y por qué los puentes anteriores habían fallado. Un problema especialmente difícil de superar fue el caso de los vientos fuertes y Roebling escribió un ensayo en 1841 en el cual describió varios fracasos de puentes colgantes a causa del viento, todos famosos en su día. Después de muchas páginas de descripciones de las vicisitudes de la construcción de puentes, cerró su ensayo con una disculpa:

Las precedentes observaciones (sobre problemas y accidentes relacionados con los puentes colgantes) no han sido hechos para desacreditar los puentes colgantes. Atribuirme tal motivo sería injusto. No podría haber mayor admirador del sistema que yo mismo... Al hablar de los puntos flojos del sistema, sólo he querido demostrar cuánto cuidado se necesita al diseñar y construir un puente colgante para garantizar su seguridad (ROEBLING, 1841 : 196).

No solamente el viento, sino también la naturaleza del tráfico que los puentes colgantes de mediados del siglo XIX te-

nían que soportar, hizo que el diseño de un puente de éxito fuera una empresa formidable. A mediados de siglo los diseñadores convencionales de puentes aceptaron que no se podía hacer un puente colgante de 1.500 o 3.000 metros de longitud lo bastante rígido como para soportar el peso concentrado de las locomotoras ferroviarias, cada día más pesadas, que se estaban entonces desarrollando. Los grandes ingenieros británicos, como Robert Stephenson e Isambard Kingdom Brunel, inventaron medios complicados para atravesar grandes distancias con rígidos (y caros) puentes de travesaños, pero Roebling, al comprender todo lo que podría causar el fracaso de un puente colgante, supo inventar una manera de obviar dicho fracaso, y con un diseño más económico. Su puente Niágara de dos pisos fue endurecido y sujeto con tirantes de una manera ingeniosa y se abrió al tráfico ferroviario y de carros de transporte en el año 1855.

LA EVOLUCIÓN DE LOS PUENTES COLGANTES

Forma parte de la naturaleza del diseño «mejorar» los diseños ya existentes. En el caso de los puentes colgantes esto implica no solamente construir puentes aún más largos, sino hacerlos con mayor economía. Ya que los puentes acertados, como los de John Roebling, parecían ser cosas corrientes, surgió la tendencia previsible, aumentada por los intereses pecuniarios de los que quieren los puentes y los intereses estéticos de los que diseñan los puentes, a eliminar parte del exceso de peso y materiales que no sólo cuestan dinero, sino también destrozan las líneas de un puente. Al fin y al cabo, si los puentes de Roebling podían soportar todas las vicisitudes del tiempo y del río y del tráfico, ¿no había pensado él en todo? y ¿no había diseñado él sus puentes colgantes para poder resistir todos los ataques a los cuales podrían verse sujetos? ¿No había obviado todos los modos de fracaso? En realidad, ya que sus puentes habían cumplido su función tan bien durante tantos años, ¿no eran los puentes colgantes *sobrediseñados*? En el siglo XX, cuando los principios del diseño de estructuras eran mucho más sofisticados que los del siglo XIX, los grandes puentes no necesitaban tanto acero moderno como sus antepasados.

Por eso, la evolución de los puentes colgantes de la primera parte del siglo XX dio diseños tan elegantes como el puente original de George Washington (antes de añadir su piso inferior), el puente Bronx-Whitestone (antes de añadir sus vigas de celosía) y el puente de Tacoma Narrows (antes de su hundimiento). La estética del diseño de los puentes colgantes de los años 30 iba dirigida hacia tramos siempre más largos, pero con pisos muy poco profundos, lo que condujo, al final, a un modo de fracaso inesperado pero, a la vez, no sin precedentes históricos (SIBLY y WALKER, 1977 : 191-208).

Mientras el puente de Brooklyn tenía un piso muy profundo, que servía para endurecer su tablero y así soportar el peso del tráfico, y complicados cables de suspensión y de apoyo diagonal para endurecerlo con vistas al viento, los puentes más recientes se habían convertido en estructuras que no tenían más que unos vestigios mínimos de dichas características. Lo que Roebling había meditado detenidamente para obviar el fracaso sus sucesores lo olvidaron, o ni siquiera lo imaginaron. La enorme carga de los ocho carriles del puente

George Washington hizo que su piso pesara tanto que su inercia misma pudo resistir el viento. El puente Bronx-Whitestone y los otros de su época, diseñados quizá no más de cinco o diez años después, ya empezaban a mostrar señales de una flexibilidad excesiva hacia el viento cuando fueron inaugurados al final de los años 30.

Se alcanzó el límite cuando se inauguró el puente de Tacoma Narrows, con un piso muy estrecho de no más de dos carriles —porque el tráfico de Puget Sound no necesitaba más— y un piso, casi sin profundidad, que se apoyaba en innovadoras vigas sólidas. Por supuesto, el puente era lo suficientemente fuerte para soportar su propio peso y el tráfico que circulaba en él, pero a sus diseñadores no se les ocurrió que el viento pudiera torcer su ligera estructura con tanto vigor. A pesar de que los diseñadores pudieron haberlo anticipado correctamente y diseñado su puente teniendo en cuenta todas las maneras posibles de fracaso, el hecho de que no pensaron en el *único modo crítico* de fracaso es todo lo que ahora importa.

CONCLUSIÓN

Existe una tendencia a buscar modelos entre los éxitos del pasado cuando uno se encuentra confrontado con nuevos problemas de diseño. Se cree que lo que ha funcionado en el pasado puede aconsejarnos sobre lo que funcionará en el futuro. Tal enfoque está bien si todo lo que queremos hacer es una copia aproximada de algo que ha de funcionar en un contexto casi idéntico (y cuanto más parecido, mejor). Suele haber suficiente conservadurismo en el modelo y en nuestra copia para permitir la analogía imperfecta, pero es evidente que ilusiones de este tipo no pueden continuar sin peligro. Además, son pocas las veces que sólo queremos copiar, porque o la situación o nuestro temperamento creativo no lo permite. Pero cuando los diseñadores nos vemos confrontados con el problema de hacer algo que va más allá de lo que se ha hecho antes, es mucho mejor examinar los fracasos del pasado que sus éxitos. Sólo los fracasos nos dejan ver con claridad lo que intentamos evitar y la única manera de asegurar el éxito es obviar el fracaso.

Bibliografía citada

- FERGUSON, Eugene S. (1977), «The Mind's Eye: Nonverbal Thought in Technology», *Science*, 197.
- FISHER, John W. (1984), *Fatigue and Fracture in Steel Bridges: Case Studies*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- GORDON, J. E. (1981), *Structures: or why things don't fall down*, Da Capo Press, Nueva York.
- LEONHARDT, Fritz (1984), *Bridges: Aesthetic and Design*, The MIT Press, Cambridge, Mass.
- McCULLOUGH, David (1972), *The Great Bridge*, Simon and Shuster, Nueva York.
- PETROSKI, Henry (1985), *Engineer is Human: the Role of Failure in Successful Design*, St. Martin Press, Nueva York.
- (1987), «Inventions Spurned: On Bridges and the Impact of Society on Technology», *Impact of Science on Society*, 147.
- ROEBLING, J. A. (1841), «Some Remarks on Suspension Bridges, and on the Comparative Merits of Cable and Chains Bridges», *American Railroad Journal and Mechanics' Magazine*, 1 abril.
- SIBLY, P. G. y Walker, A. C. (1977), «Structural Accidents and their Causes», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Parte 1, 62.
- VINCENTI, Walter G. (1986), «The Davis Wing and the Problem of Airfoil Design: Uncertainty and Growth in Engineering Knowledge», *Technology and Culture*, 27.