

PRIMERA PARTE

ANTEPROYECTOS

CAPÍTULO I.—Cómo se proyecta un puente.

CAPÍTULO II.—Ubicación.

CAPÍTULO III.—Desagüe.

CAPÍTULO IV.—Rasantes.

CAPÍTULO V.—Plataforma.

CAPÍTULO VI.—Elección de tipos y luces.

CAPÍTULO I

CÓMO SE PROYECTA UN PUENTE

Definiciones. — Objeto de este tomo III. — Complejidad del problema. — El Ingeniero artista, pero ecléctico. — El Ingeniero economista. — No debe olvidarse el interés compuesto. — El Ingeniero calculista. — Ciencia e hipótesis.

Definiciones. — Ya definimos como *puentes*, en el Tomo I de este libro (1), aquellas obras de 10 metros de luz en adelante destinadas a cruzar las vaguadas de los ríos, reservando el nombre de *viaductos* a las que salvan depresiones sensibles de terreno.

Son *puentes-viaductos* cuando en estas vaguadas exista un río de sección muy inferior al desagüe del viaducto.

Y, por último, llamamos *acueductos* y *sifones* a las obras especiales destinadas a dar paso a los canales, ya con las rasantes del cajero, ya en conducción forzada.

Todas estas obras necesitan empalmar con las explanaciones por medio de terraplenes, que frecuentemente se llaman *de avenidas*.

Pero como también a las *crecidas* de los ríos se las suele llamar *avenidas*, para evitar confusiones, el autor prefiere, y así lo hará en este libro, emplear el nombre de *accesos de los puentes* para los terraplenes y obras llamadas *de avenidas*, y no utilizar tampoco

(1) En las páginas 20 a 22 del primer tomo se detallan estas definiciones.

este último nombre para las *crecidas* de los ríos, cuya palabra procurará emplear exclusivamente.

Asimismo, para evitar repeticiones, añadiremos que, salvo los párrafos y capítulos especiales dedicados a los *viaductos*, *acueductos* y *sifones*, cuanto digamos de los *puentes en general* es aplicable a aquellas otras obras de paso para vías terrestres o hidráulicas.

Objeto de este tomo III. — Hemos enumerado en el tomo I los materiales que pueden emplearse en las obras de fábrica, y reseñamos la infinita variedad de las disposiciones que se han imaginado desde los tiempos más remotos para cruzar los ríos o depresiones del terreno, los *Muros*, que sirven para contener las tierras, y, por último, las *Pequeñas obras* de luces inferiores a diez metros, que permiten el desagüe de las vaguadas de menor cuantía.

En el tomo II, *Cimientos*, hemos estudiado comparativamente los procedimientos de cimentación que permiten realizar la *Infraestructura*, por decirlo así, de todas las obras.

Vamos a dedicar este tomo III, *Proyectos*, al examen escalonado de los problemas que se presentan para proyectar la *Superestructura de los puentes de fábrica y hormigón armado*.

Complejidad del problema. — Este problema, que parece el más vulgar y corriente de la Carrera de Ingeniero de Caminos, es, sin embargo, de los más complejos que se le presentan.

La gran variedad de soluciones que el Arte constructivo y la Ciencia mecánica han imaginado, constituye la más aparente dificultad, *l'embarras du choix*, que dicen gráficamente los franceses, que sólo puede traducirse, imperfectamente, por *la duda en la elección*.

En efecto, un puente puede proyectarse con los siguientes materiales o disposiciones:

Materiales	{	Fábricas ..	{ Naturales: sillerías y mamposterías.
		Hormigón armado.	
		Acero laminado.	
		Cables.	
		Madera.	

Disposiciones en arco de fábrica, hormigón armado o acero.....

{	Arcos inferiores, superiores o medios	{	Luces: de 10 a 200 m.
	Curvas directrices de los arcos: circulares, carpaneles, elípticas, parabólicas, funiculares, catenoides, etc.		Flechas: de 1/1,5 a 1/15.

Disposiciones en tramos rectos o con reacciones verticales sobre apoyos..

{	De hormigón armado.	{	Con vigas macizas: de 10 a 30 m.
	Metálicos, con sus múltiples combinaciones.		Con vigas aligeradas: de 20 a 60 m.

Puentes colgados Móviles o rígidos.

Pero no son la elección del material, ni la de las luces, ni la del tipo y de la disposición del puente los problemas más indeterminados.

Hay otros problemas previos e indispensables más esenciales y variables aún, y que integran el proyecto de la obra, y son:

La *ubicación* o *emplazamiento*, que está en íntima conexión con el trazado de la vía carretera, férrea o hidráulica, pues unas veces es consecuencia del trazado, pero también puede ser el puente, viaducto, acueducto o sifón *el que imponga el trazado* de la vía, según más adelante veremos.

Pero la *ubicación* debe estudiarse simultáneamente con los *cimientos* de la obra.

Puede encontrarse una ubicación magnífica para un puente o viaducto, desde el punto de vista del trazado, de los materiales, de la disposición que permita la superestructura de la obra, y ofrecer, sin embargo, dificultades y gasto de cimentación tales que obliguen a desechar aquel emplazamiento.

Es, pues, obligado tener en cuenta a la vez los dos factores: *cimientos* y *ubicación*.

Pero no basta.

Es necesario fijar también el *desagüe* que ha de necesitar el puente.

Cuando es excesivo, suele encarecerse sensiblemente la obra. Si es escaso, peligran los cimientos, a menos que se profundice exageradamente.

Debe, pues, también calcularse el *desagüe* con vistas *al procedimiento y a la importancia de las cimentaciones* que el subsuelo imponga.

Asimismo hay que determinar las *rasantes* del puente, no sólo teniendo en cuenta las exigencias del trazado y de la explotación de la vía, sino de las crecidas máximas del río y de su libre desagüe en toda la anchura de los valles atravesados.

Hay que fijar después la *anchura transversal* del puente, que varía esencialmente según las necesidades, así como las *sobrecargas* máximas que podrán actuar y que deberá resistir holgadamente.

Y sólo entonces es cuando podrá comenzarse el estudio de los *anteproyectos* con las soluciones posibles más aplicables al caso, variando las luces y las *disposiciones* en arcos o tramos de la superestructura, y los *materiales* que pueden emplearse en la obra.

El Ingeniero artista, pero ecléctico. — Tiene primeramente el Ingeniero que poner en juego sus disposiciones artísticas en el más amplio concepto de esta palabra (1), croquizando los tipos más racionales y mejor proporcionados en cada caso, ya sea apelando a los ejemplos conocidos o imaginando las disposiciones originales que se le ocurran.

En los puentes de pequeña importancia las soluciones son poco numerosas, y la elección entre ellas no suele ofrecer dudas.

Pero en los de gran luz y altura aumenta la variedad de tipos posibles, y se complica el problema si el Ingeniero artista tiene el *eclecticismo*, que debe ser su característica (2).

Para evidenciarlo, recordaremos un ejemplo personal: el proyecto que redactamos en 1897 (hace treinta años) para el puente-viaducto de Pino, sobre el Duero (Zamora).

Las figuras 1.^a a 12 dan idea de las disposiciones que podían adoptarse entonces para aquel puente, todas ellas clásicas y realizadas por eminentes Ingenieros.

De entonces acá, la guerra europea, por un lado, con sus tras-

(1) *Arte*, según la Academia, es la «virtud, disposición o industria para hacer alguna cosa». La *construcción* es un arte, y fueron artistas los más geniales constructores de la Antigüedad y del Renacimiento.

(2) El autor, a pesar de sus preferencias bien conocidas por los puentes de hormigón armado, no vacila en muchos casos en proponer y construir soluciones metálicas: el puente de Mora de Ebro, sobre el Ebro, lo ha proyectado y construido con vigas continuas de 276 metros, con 48 y 60 m. de luz; en Amposta, sobre el mismo río, proyectó y construyó un tramo colgado de 135 m. de luz, descrito en la *Revista de O. P.* del año 1914, páginas 527, 539 y 551.

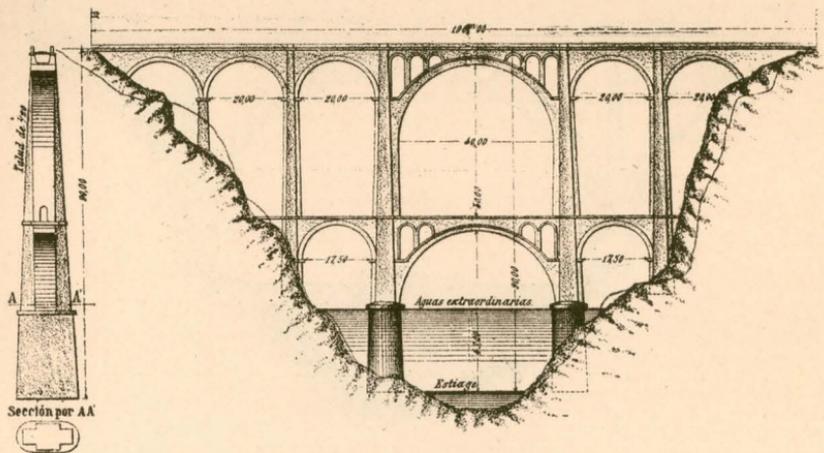


Fig. 1.ª Tipo Goetzschal (Sajonia)

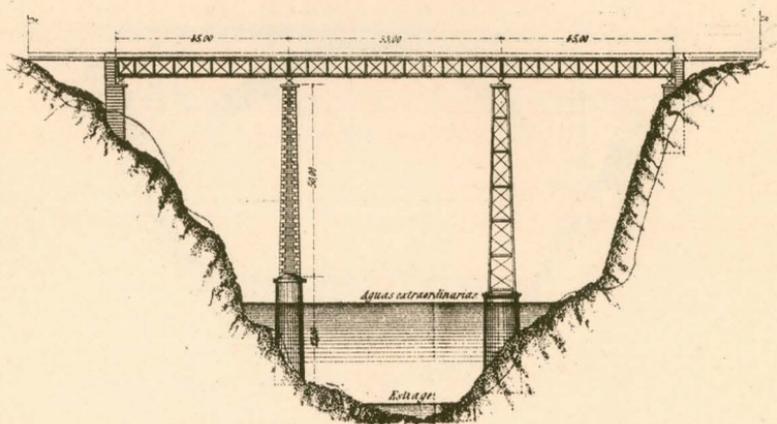


Fig. 2.ª Tipo Alcoy (España)

Fig. 2.ª bis. Tipo Salado (España)

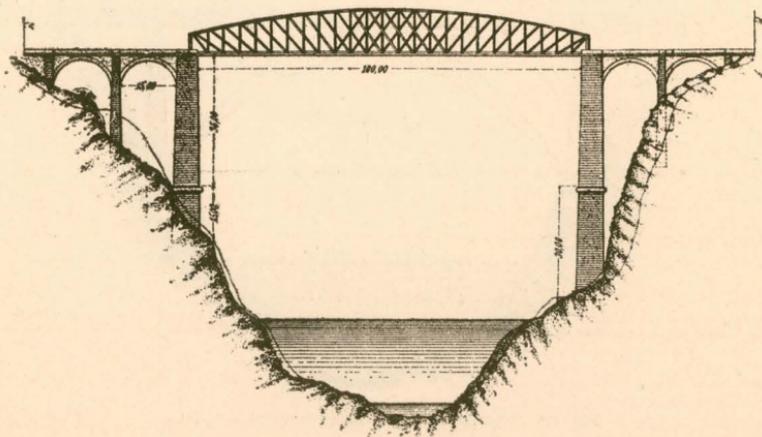


Fig. 3.ª Tipo Rance (Francia)

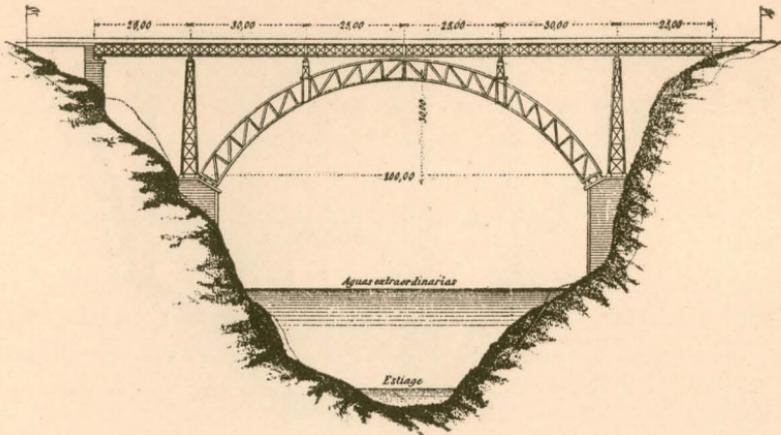


Fig. 4.ª Tipo Palermo (Italia)

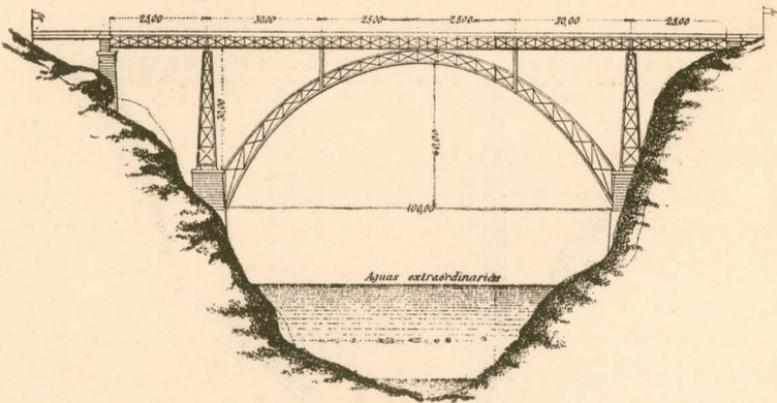


Fig. 5.ª Tipo Seyrig. Puente Don Luis (Oporto) 1884

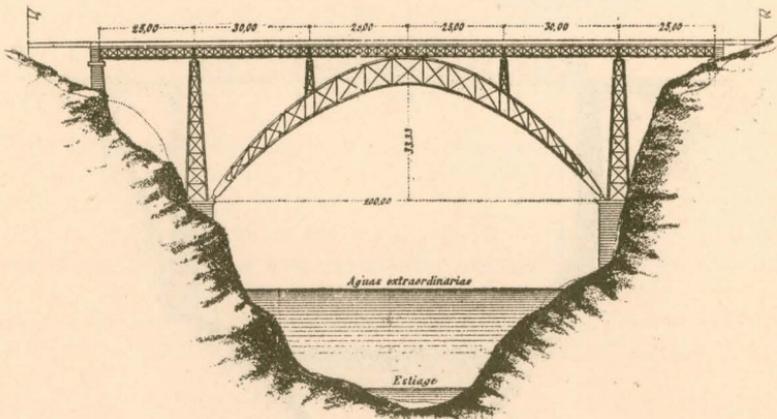


Fig. 6.ª Tipo Eiffel, en Garabit (Francia) y Oporto

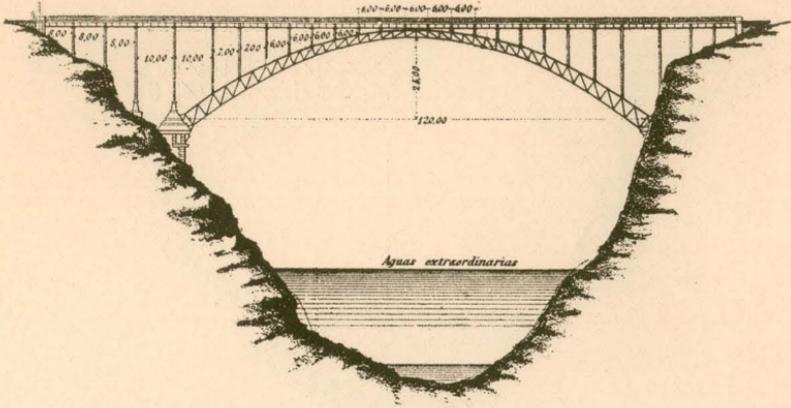


Fig. 10. Tipo Suizo (Schwarzwasser)

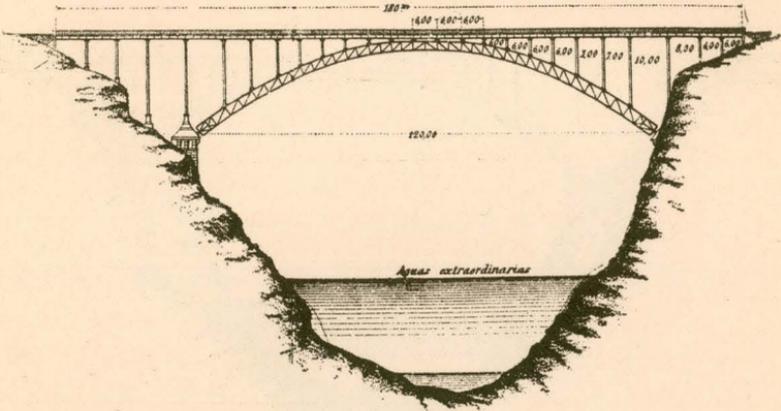


Fig. 11. (Adoptado.) Tipo Washington (Nueva York)

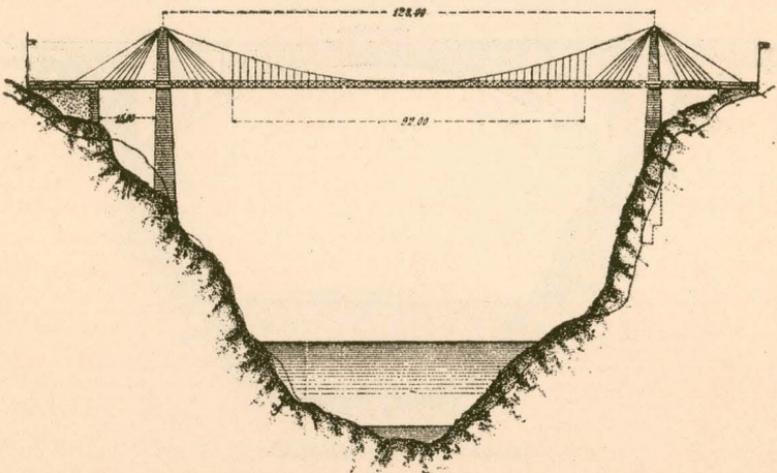


Fig. 12. Tipo Saint-Urbize (Francia)

tornos en los precios de mano de obra y materiales, y por otro lado los notorios progresos del hormigón armado, han venido a perturbar radicalmente las apreciaciones y los procedimientos de construcción del siglo pasado.

Las fábricas caras tienden a sustituirse con hormigones fabricados mecánicamente; los obreros especialistas se suprimen en lo posible; los puentes enteramente metálicos, principalmente los que exigen trabajo delicado en el taller y montajes difíciles, van dejando el paso a las soluciones de hormigón en masa o de hormigón armado, ambos ejecutados con peones.

El aumento de las sobrecargas en los puentes, sobre todo en los de ferrocarriles, justificados en la nueva Instrucción para el cálculo de puentes metálicos, aprobada por R. O. de 24 de octubre de 1925, redactada por nuestro compañero D. Domingo Mendizábal, agudiza aún más la superioridad económica de las soluciones de hormigón en la mayor parte de los casos.

Es, pues, preciso tantear, por lo menos, las disposiciones posibles con los tipos modernos de puentes, poniéndolos en parangón con las soluciones que fueron clásicas el siglo pasado, si desde el primer examen ofrecieran éstas alguna duda.

No debe creerse, sin embargo, que el hormigón armado es la panacea constructiva de los puentes.

En el puente-viaducto de Pino, por ejemplo, las soluciones de hormigón armado que parecen más aplicables son las representadas por las figuras 13 y 14.

Pero quizá fuera conveniente compararlas con la solución metálica de *Cantilever*, de la figura 15, o con la nueva disposición de puentes colgados rígidos, sistema Gisclard, que ofrece grandes economías de metal, y sobre todo de montaje, sin los inconvenientes de la movilidad de los antiguos puentes de esta clase (1).

Hemos, pues, demostrado que cuando se trata de obras impor-

(1) En nuestro citado artículo de la *Revista de O. P.* de 24 de septiembre de 1911, sobre el puente-viaducto de Pino y en mi autocritica de aquel proyecto, al reconocer el aumento de gasto que produjo la construcción del arco aprobado, por el encarecimiento del metal en curvas y el enorme gasto y peligros del montaje en voladizo, aconsejaba para casos análogos la sustitución de este tipo de puentes. Hubiera resultado más económico, en definitiva, o la solución de tramos metálicos continuos sobre pilas de acero montados por lanzamiento o la de un puente colgado.

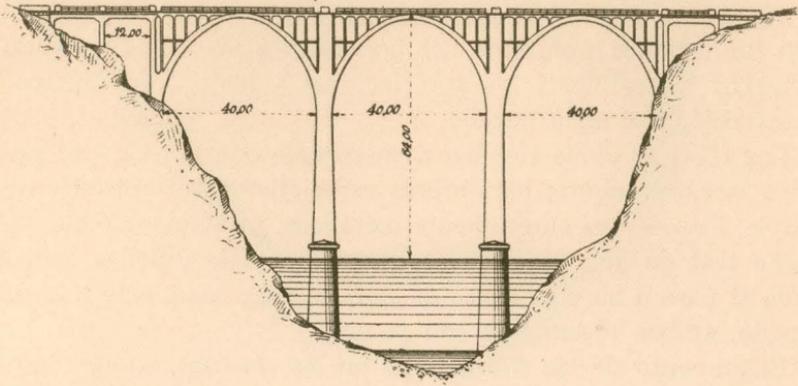


Fig. 13. Tipo Pyrimont (Francia)

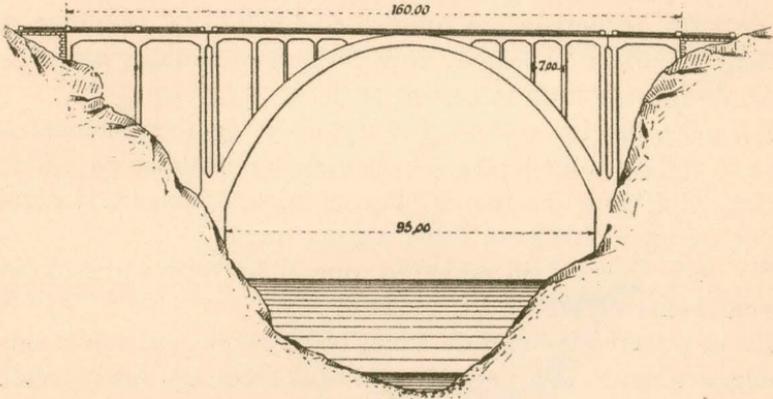


Fig. 14. Tipo Alcoy (España)

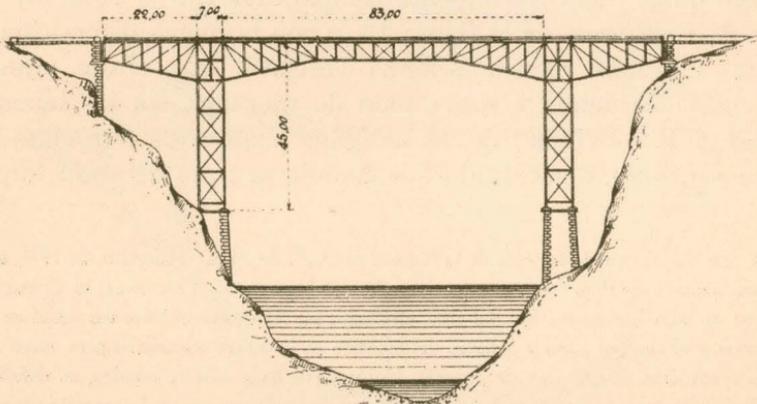


Fig. 15. Tipos Cantilever

tantes es necesario el examen comparativo de las soluciones más adecuadas a las circunstancias de la ubicación y perfil de la vaguada.

El Ingeniero economista. — Una vez seleccionadas las disposiciones del puente más racionales, el Ingeniero debe despojarse de su calidad de artista y entrar de lleno en sus funciones financieras.

En efecto, no debe sólo preocuparse el autor de un proyecto de realizar una obra hermosa y permanente.

Debe recordar que está obligado a defender ante todo los intereses de la Administración, en la que no desempeña una función sacerdotal y científica, sino gestora y económica.

Ha de apreciar que así como el puente debe tener, como ya dijimos, *el cimiento que se merece*, en cada vía de comunicación deben proyectarse los puentes que le corresponden con arreglo al servicio que han de prestar.

A igualdad de ubicación, de desagüe, de materiales, no se proyectan las obras de un camino vecinal *con igual criterio de duración, ni de resistencia siquiera*, que para un ferrocarril de gran y constante tráfico.

Aquél puede correr la contingencia de ser destruído, pero su caída sólo perturbaría necesidades locales y secundarias; la explotación permanente de una gran vía férrea debe, en cambio, estar al abrigo de una interrupción en el tráfico y en la vida de una gran zona del país.

No debe olvidarse el interés compuesto.— Hay que tener también muy presente que la economía que puede obtenerse en estas obras permitirá, *capitalizándolas a interés compuesto*, reconstruir otros puentes análogos o mejores al cabo de unos pocos años.

Insistimos sobre este concepto primordial, que hemos sugerido ya en nuestro tomo II (pág. 22) al ocuparnos del estudio de los cimientos, en el que recordamos que con intereses compuestos de 5, 6 y 7 por 100 se duplican los capitales al cabo de catorce, doce y diez años, respectivamente.

No basta, pues, que al Ingeniero artista le satisfaga más una solución de fábrica, por creer que así realizaría una obra para los siglos venideros.

Aunque muy vulgar, es fundamentalmente erróneo suponer que un puente de sillería resulta *a la larga* más económico que los de hierro u hormigón armado.

En cuanto la economía entre una u otra solución sea del 20 por 100, por ejemplo, los intereses compuestos de esta economía permitirían *reconstruir* otro puente nuevo al cabo de menos de treinta años. Quizá para entonces existan otras necesidades y otros materiales y convenga realizar el futuro puente con nuevas disposiciones.

Las diferencias de coste pueden ser enormes, y si no pueden apreciarse por experiencia propia, hay que calcular, aunque sea aproximadamente, los anteproyectos que el Ingeniero artista ha concebido.

Para dar idea de la necesidad de esta comparación económica, reproducimos a continuación los presupuestos de las doce soluciones del puente-viaducto de Pino, antes citadas (1):

(1) Estos presupuestos, redactados en 1897, tendrían hoy que multiplicarse por 2,5.

Pueden verse detalles de este estudio en nuestro libro *Estudio sobre los grandes viaductos*, año 1897, que forma parte de la Biblioteca de la *Revista de Obras Públicas*.

También en el libro *Ponts suspendus*, de M. Gr. Leinekugel Le Cocq, tomo II, página 260, incluye su autor el citado cuadro comparativo, para demostrar la economía que puede obtenerse con el puente colgado.

Número de las figuras	SOLUCIONES ESTUDIADAS	PUENTES CONSTRUIDOS TOMADOS COMO TIPO	PRESUPUESTO DE EJECUCION MATERIAL CON FABRICAS DE	
			Silleras mamposterías concertadas	Hormigones mamposterías ordinarias
			Pesetas	Pesetas
1. ^a	Completamente de fábrica	Goeltzschthal (Sajonia) (1851)	1.727.000	964.000
2. ^a	Tramos rectos continuos sobre pilas de fábrica	Alcoy (España)	1.101.000	697.000
3. ^a	Vigas parabólicas (Bow-string)	Moerdick (Holanda) y Rance (Francia)..	655.000	582.000
4. ^a	Grandes luces sobre arco (tipo suizo)	Kirchenfeld (Berna) (1883) y Palermo (Italia) (1888)	654.000	570.000
5. ^a	Grandes luces (tipo Seyrig)	Puente Don Luis, en Oporto (1884)	635.000	551.000
6. ^a	Grandes luces (tipo Eiffel)	Garabit (Francia) (1884) y Oporto (1878).	614.000	532.000
7. ^a	Tramo recto (tipo americano Linville)	Cincinatti y Kentucky-River (E. U. A.) (1877) Salado (España)	575.000	474.000
2 bis	Tramos rectos continuos sobre pilas metálicas	Castellaneta (Italia) y Friburgo (Suiza) (1863)	652.000	412.000
8. ^a	Arco metálico empotrado con accesos de fábrica	Javroz y Schwarzwasser (Suiza) (1880 y 1882)	505.000	409.000
9. ^a	Arco metálico articulado con accesos de fábrica	Washington (E. U. A.) (1889) y Pontevedra (1897)	443.000	352.000
10	Tablero metálico de pequeñas luces sobre arco empotrado	Javroz y Schwarzwasser (Suiza)	346.000	317.000
11	Tablero metálico de pequeñas luces sobre arco articulado. (Solución adoptada.)	Washington (E. U. A.)	333.000	303.000
12	Puente colgado de cables parabólicos	Saint-Ilpize-sur-Allier (1898)	307.000	264.000

Vemos, pues, cómo entre soluciones, todas clásicas y, por tanto, admisibles técnicamente, pueden haber diferencias de coste de 300.000 a 1.800.000 pesetas, es decir, el séxtuplo.

Por último, no ha de olvidarse el autor de un proyecto de puente que una cosa es *dibujar* y otra *construir*; que no debe preocuparse tanto de reducir el volumen de las fábricas y el peso de los hierros, sino *el gasto total* de ejecución que su empleo en obra ha de ocasionar.

Ya veremos la excepcional importancia que tiene este punto de vista; ya demostraremos que no es más barato el puente que necesite menos metros cúbicos de hormigón y menor cantidad de kilogramos de acero, si exige su ejecución más costosos medios auxiliares y mayor número de jornales, gastos que se pierden por completo. Es decir, que incluso a igualdad de coste, será siempre preferible la solución que ofrezca mayor masa, pues habría de sufrir menores vibraciones, que pueden ser destructoras.

Y sólo habida cuenta de todos estos factores y circunstancias, es como puede el Ingeniero *aproximarse a la solución óptima*, que consistirá, en definitiva, en resolver el problema con el menor desembolso a igualdad de resistencia y duración del puente.

El Ingeniero calculista.—Elegida la disposición preferible y la más económica, mediante los anteproyectos y sus presupuestos previos, se procederá a confeccionar el proyecto propiamente dicho.

Solamente entonces es cuando interviene la ciencia del Ingeniero.

Tendrá que estudiar el detalle de todos los elementos que compondrán la obra: cimientos, estribos y pilas, tramos o arcos, muros y obras complementarias y de defensa de los accesos y crecidas y la decoración adecuada al conjunto.

Simultáneamente *deberá comprobar* las resistencias de cada uno de estos elementos, a los que se pueden dar muy distintas dimensiones.

Decimos *comprobar*, porque los espesores de muros, pilas o bóvedas y las secciones de las armaduras metálicas *no se deducen del cálculo*, sino que se fijan previa y aproximadamente por experiencia propia o por comparación con análogos casos.

La mecánica sólo permite *comprobar* que son escasos o excesivos

los espesores y secciones, y sólo por tanteos se obtienen con bastante aproximación las que resulten suficientes.

Ciencia e hipótesis.—Pero no debe olvidarse que una cosa es la ciencia y otra cosa es la hipótesis, y sin remontarnos a las alturas del insigne Poincaré (1), creemos útil insistir sobre esta consideración.

Las *Matemáticas* dan soluciones precisas, inmutables.

La *Mecánica aplicada a las construcciones* ya no ofrece igual exactitud, pues las hipótesis admitidas para su explicación y formulismo, cuando no son arbitrarias, *no se realizan sino aproximadamente en la práctica.*

Tienden los Ingenieros noveles a considerar como dogmas las hipótesis; suponen, por ejemplo, con relativa frecuencia, que un estribo o unas pilas o palizadas quedan perfectamente empotradas en el terreno por tener un cimiento profundo, y no vacilan en proyectar bóvedas rígidas, o vigas metálicas continuas, o pórticos de hormigón armado, cuyos cálculos están fundados en la inmovilidad del terreno y fábricas.

Y, sin embargo, son muchos los casos en que el hipotético empotramiento no se realiza, y en cuanto uno de aquellos cimientos asiente o ceda, *desaparece la aparente exactitud del cálculo* y la obra se deforma, cuando no se derrumba.

Es cierto que nos aproximamos hoy, con la hipótesis elástica, a una comprobación más exacta del trabajo en las bóvedas.

Pero, sin embargo, la elasticidad que se supone en las bóvedas es seguramente más compleja que las hipótesis admitidas por la Resistencia de materiales (2).

(1) En su conocido libro *La science et l'hypothèse* (París; Flammarion, 1912), dice este genial matemático: «La experiencia es el manantial único de la verdad; ella sólo puede enseñarnos algo nuevo; ella sólo puede darnos la certeza.»

(2) El autor se adhiere en un todo a lo que sobre este particular afirma el ilustre Sejourné en su libro *Grandes voûtes*, tomo III, página 381: «No se dispone en este momento, para el cálculo de bóvedas, de mejor hipótesis que la hipótesis elástica.»

«En resumidas cuentas, aceptémosla, no porque sea la verdad, sino porque bóvedas delgadas así calculadas están resistiendo.»

«Pero no la aceptemos sino muy provisionalmente, a beneficio de inventario, es decir, hasta que nuevos experimentos establezcan otras fórmulas que se ajusten mejor a los hechos.»

Tampoco estamos seguros ni de la homogeneidad de los materiales y fábricas, ni de la perfección de la mano de obra.

Se supone, por ejemplo, que un muro bien hecho trabaja como un monolito, lo que es a veces mucho suponer; pero, en cambio, no se tiene la convicción del ángulo de corrimiento del terraplén que sobre él actúa, ni de la perfecta incomprendibilidad del suelo en que se apoya el cimiento.

Porque ignoramos aún todos los fenómenos mecánicos que se producen en una construcción en estado de potencia, se aumentan las dimensiones de los elementos de una obra *mediante el ingenio eufemismo de los coeficientes de seguridad*, que es la careta con que encubrimos la inseguridad de nuestros cálculos.

¿A qué, pues, perseguir las *decimales* con tanto ahinco, cuando no estamos seguros de las *unidades*?

No motejemos, pues, a la experiencia y al empirismo, que es resultante de aquélla; copiemos lo que han hecho otros, y no recurramos al cálculo sino con una fe proporcional a nuestra confianza en sus hipótesis.