

CAPÍTULO IV

RASANTES DE LOS PUENTES

En carreteras. — En valles inundables. — En ferrocarriles. — Badén de 27 kilómetros. — Peraltes sobre crecidas. — En grandes viaductos para carreteras. — En grandes viaductos para ferrocarriles. — Rasantes con o sin balasto. — En acueductos.

Las *rasantes* de los puentes son, como las de una vía cualquiera, las líneas rectas, quebradas o curvas que constituyen el perfil longitudinal de su plataforma.

La fijación de estas rasantes es, en muchos puentes, consecuencia inmediata del desagüe que exigen.

En los viaductos y acueductos ya no dependen del desagüe. Examinaremos los distintos factores de este problema.

En carreteras. — En la mayor parte de los puentes antiguos (1) las calzadas están en rampa hacia el centro del puente, lo que permitía la construcción de grandes arcos de luces crecientes desde las márgenes sin elevar los estribos (fig. 34).

Pero aun con arcos rebajados se han empleado con frecuencia rasantes inclinadas.

El eminente Sejourmé dice (2): « Para el aspecto, un puente largo debe siempre tener su coronación convexa; una larga imposta horizontal aparece cóncava a la vista. »

(1) Puentes de Orense, San Juan de las Abadesas, Martorell, Fabricio, Ceret, Verona y Rialto. (Véanse las páginas 93, 94, 128, 131 y 137 del tomo I.)

(2) *Grandes voûtes*, tomo V, página 82.

Se apoya este concepto, algún tanto arcaico, en que los griegos encorvaron el entablamento y el pavimento del Partenón para que a la vista aparezcan horizontales.

Los Ingenieros franceses, amantes de la exquisitez arquitectónica, han mantenido esta tradición y a todos sus puentes monumentales de París, Lyon, Burdeos, Toulouse, Orleans y Blois han dado suaves pendientes a sus plataformas.



Fig. 34. Puente llamado romano, en Cangas de Onís (Asturias)

Como los arranques de los arcos deben mantenerse al mismo nivel, porque la vista los refiere al plano de agua, deben entonces crecer las luces desde las márgenes al centro.

Presentamos tres ejemplos de París (fig. 35).

El primero, puente Luis Felipe, tiene arcos de 30 y 32 m. de luz.

El segundo, de la Concordia (construído por Perronnet), de 25,38,-28,20 y 31,13 m.

El último, puente del Alma, de 38,50 y 43 m.

La desigualdad en los arcos y empujes, la inclinación de impostas y armamentos, complica y, por tanto, encarece la construcción.

¿Vale la pena de imponerse ese gasto?

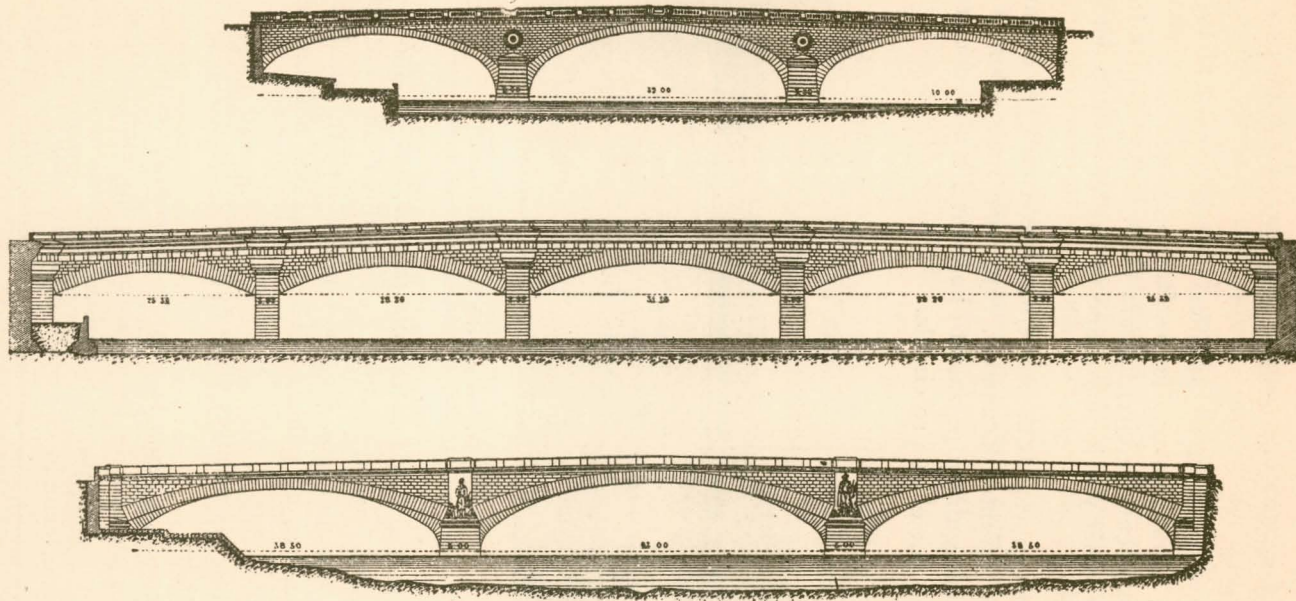


Fig. 35. Puentes Luis Felipe, de la Concordia y del Alma, en París

El autor lamenta no estar conforme con sus ilustres colegas ultrapirenaicos.

Nuestra convicción no significa desprecio para la belleza de las formas, ni despreocupación estética.

Pero un puente se ejecuta para atravesarlo; es más frecuente verlo por encima y a lo largo, que no por el costado, en cavilosa contemplación.

A nuestro juicio, *es de peor efecto* encontrarse, al entrar en un puente, con rasantes inclinadas, *cuyo lomo suele tapar la margen opuesta*, que seguir un pavimento horizontal o a nivel con la calle o el camino por el que se circula.

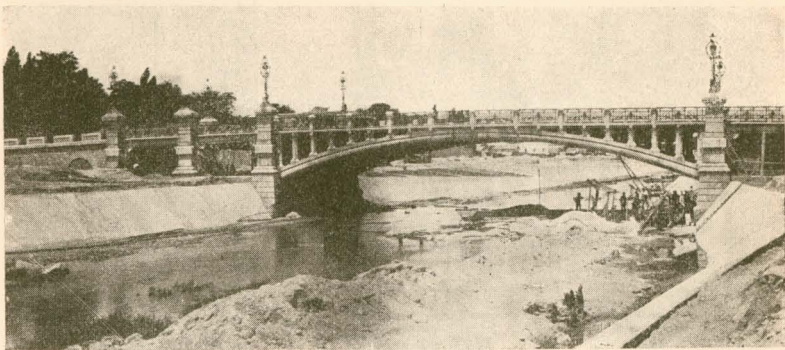


Fig. 36. Puente Reina Victoria, en Madrid

Es de más utilidad la rasante interior, que la silueta exterior.

En España, menos sensibles a esos refinamientos ópticos, o más prácticos y económicos (de todo puede haber), construimos los grandes puentes de poblaciones con rasantes horizontales y con arcos de igual luz.

Así están los puentes de Madrid, Sevilla, Valencia, Bilbao y San Sebastián.

Unicamente, cuando la rasante horizontal del puente necesita quedar por encima de las rasantes de las márgenes, se alcanza aquel nivel por rampas en las orillas, convenientemente atenuadas.

Asimismo, cuando el puente está formado por un arco único, cuyo rebajamiento no convenga exagerar, pues así se reduce el consiguiente empuje en los estribos, se suele quebrar la rasante

con una rampa y una contrapendiente cuyo ángulo se suaviza en el centro por medio de una pequeña rasante horizontal.

Así lo hemos hecho en el puente Reina Victoria, en Madrid (figura 36).

Para no exceder el rebajamiento de $1/10$ y alcanzar a nivel las carreteras de ambas márgenes, hemos dispuesto una rasante horizontal en el centro del puente de 6 m., y una pendiente y una rampa de 0,015 por metro por ambos lados.

En este mismo orden de ideas, en algunos puentes de grandes ciudades, se han empleado rasantes en curva, para evitar los cambios bruscos de inclinación.

En valles inundables. — Cuando los puentes han de establecerse en valles inundables, el estudio de las rasantes adquiere aún mayor importancia, por la complicación que presentan los terraplenes de acceso a los mismos.

Ya indicamos en el capítulo anterior que no era obligado proyectar estos accesos con iguales rasantes que en el puente.

Es más, demostramos la conveniencia de rebajar en muchos casos las cotas de los terraplenes de acceso, no sólo para reducir su coste, sino para facilitar el libre desagüe de las crecidas desbordadas en los valles, constituyendo así largos *badenes*.

Ya vimos también que algunos Ingenieros prefieren adoptar una solución intermedia: la de fijar la rasante de los accesos por encima de las crecidas ordinarias y por debajo de las excepcionales; pero cuando éstas ocurren puede producirse una cascada por encima de los terraplenes, que los destruiría, probablemente.

Comparemos las posibles soluciones de rasantes (fig. 37). La disposición *A*, en la que la rasante única y horizontal se establece por encima de las crecidas excepcionales, es técnicamente la más perfecta, sobre todo si se suprimen los terraplenes de acceso sustituyéndolos en toda la extensión inundable por una serie de alcantarillas o pontones.

Pero el coste del puente sería entonces enorme; habría que resignarse a reducir estas obras suplementarias a las indispensables para el desagüe; entonces los terrenos situados aguas arriba de los mismos sufrirán perjuicios, por la corriente, a veces impetuosa, que en ellos se produzca al descender el nivel de la inundación.

Si, pues, no fuera de una necesidad imperiosa el mantener la circulación permanente por el camino carretero o ferrocarril, pueden quebrarse las rasantes en la forma de la figura 37 B.

Se consiente entonces la sumersión en las crecidas excepcionales de una gran parte de los accesos del puente, y éste solo emergerá por encima de aquéllas.

Por último, y a semejanza de lo que se ha hecho en el Uruguay (1), puede adoptarse una rasante mínima (fig. 37 C) por

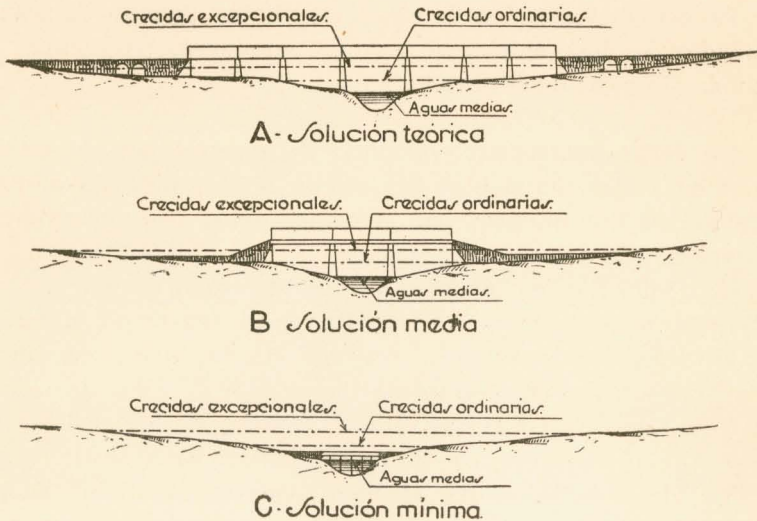


Fig. 37

debajo de las crecidas ordinarias, en las que el puente quedará totalmente sumergido.

A ese efecto, se construyen los puentes con tramos pequeños, que antes se hacían de madera, después de hierro y hoy de hormigón armado. Para reducir la resistencia a la corriente y a los cuerpos flotantes, se construyen barandillas plegables.

Las diferencias de gasto entre estas tres soluciones son enormes.

Más que el Ingeniero, debe intervenir en este problema el economista.

Ha de estudiarse si las trabas a la circulación permanente,

(1) Comunicación presentada al II Congreso Científico Panamericano por el Ingeniero D. Federico E. Caparro. *Revista de la Asociación Politécnica del Uruguay*, enero de 1916.

que imponen las soluciones de rasantes *B* o *C*, son preferibles al aumento de gasto que ocasionaría la solución *A*, *sin olvidar los intereses compuestos* de esas diferencias.

Serán frecuentes los casos en que la relación de gastos de estas tres soluciones estarán en la relación de 1, 3 y 15.

Entre gastar en un puente 100.000 o 1.500.000 pesetas, no sólo hay una diferencia de coste inicial de 1.400.000 pesetas, sino, al 6 por 100, la de 84.000 pesetas de intereses anuales.

Con el gasto de 1.500.000 pesetas para un solo puente, podrían construirse 15 puentes de 100.000 pesetas.

Es un razonamiento que los técnicos inconscientes suelen menospreciar, pero que merece que lo repitamos.

Rasantes en ferrocarriles. — En los puentes y viaductos corrientes para ferrocarriles, en los que las rasantes son más obligadas, se adoptan en aquellas obras las rasantes que corresponden al perfil general del trazado.

Cuando los puentes son largos, pueden realizarse con rasantes horizontales, que facilitan la ejecución, si con ello no se perjudica sensiblemente al trazado vertical de la línea.

Pero en los puentes sobre valles inundables, aunque con menos elasticidad que en las carreteras, hay también que tener en cuenta los factores económicos que antes exaltamos.

Citaremos algunos ejemplos recientes:

Si las crecidas o mareas máximas alcanzan poca altura sobre el valle; si las velocidades que se producen a lo largo de los terraplenes en la época del descenso de las aguas no son de temer, entonces convendrá sustraer la vía a cualquier desbordamiento por las mayores inundaciones.

Así lo hemos hecho en los terrenos pantanosos de la desembocadura de los ríos Haxef y Mahrar (1), donde no vacilamos en construir terraplenes de acceso de cerca de un kilómetro de longitud y cotas de 1,50 m. de altura media.

Pero lo hicimos así porque como estos puentes se encuentran cerca de la desembocadura en el mar, el nivel máximo de las crecidas del río no puede sensiblemente exceder al de las mareas

(1) Trazo 1.º del ferrocarril de Tanger á Fez, entre Cuesta Colorada y Arzila.

vivas equinocciales; por tanto, los terraplenes necesitan, desde luego, superar también a este nivel, para no quedar sumergidos por las mareas vivas.

Hubo, sin embargo, que defender sus taludes con encachados y bloques de hormigón, para que el chapoteo de las aguas y la



Fig. 38. Puente sobre el Lucus, Marruecos

corriente que se produce a lo largo de los mismos en las vaciantes no los socaven o destruyan.

Además, hemos intercalado en esos terraplenes tajeas en los puntos bajos, para facilitar el desagüe de las crecidas y pleamares.

En cambio, en el mismo ferrocarril, hemos procedido con criterio distinto en otros valles inundables, y conviene exponer estos *ejemplos vividos* para que los lectores aprecien bien el criterio variable con que hay que proceder en casos al parecer semejantes.

Para el paso del río Lucus, en las inmediaciones de Alcázar, el nivel de las grandes crecidas es diferente en el cauce del río y en la extensa vega que rodea a Alcázar.

Nos preocupamos de poner los tramos rectos del puente (figura 38) por encima de la máxima crecida observada en Alcá-

zar (1). Pero hubiese resultado muy costoso cruzar toda la vega con un terraplén de acceso de igual rasante, pues alcanzaría cotas de 3 a 5 m. en 2 km. de longitud.

Decidimos, pues, quebrar la rasante, plegándola al terreno lo más posible, en la forma que representa el perfil (fig. 39).

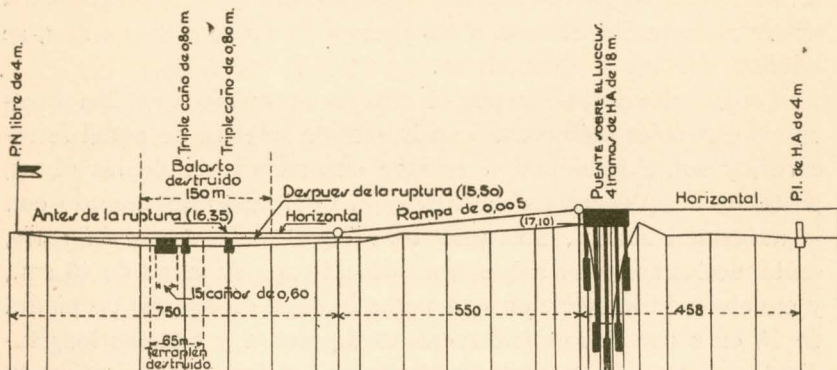


Fig. 39

La crecida del año 1926 desbordó el terraplén en 0,35 m. y en 900 m., arrastró el balasto en 150 m. y rompió el terraplén en 65 m. Para repararlo, nos limitamos a construir un nuevo grupo de 15 caños de 0,60 m., además de los dos grupos triples de 0,80 que habíamos primeramente construido y resultaron insuficientes.

Badén de 27 kilómetros. — Veamos otro ejemplo, aún más radical, y en el mismo ferrocarril de Tánger a Fez.

Este, en la zona francesa, atraviesa el valle del río Sebú en una extensa explanada casi horizontal de 32 kilómetros de anchura, de los que las grandes crecidas que se producen cada seis u ocho años sumergen una zona de 28 kilómetros de ancho.

En el primer proyecto de estos trozos, redactado con el espíritu de magnificencia que presidía antes de la guerra en la técnica francesa, se fijaron las rasantes de los terraplenes de avenida del

(1) De cuyo dato no hemos podido obtener, por cierto, comprobaciones seguras, si bien la crecida de 1926, que fué excepcional, según dicen los naturales del país, no alcanzó las vigas del puente, aunque sólo faltaron 0,20 m.

En el tomo II, página 300, detallamos los cimientos de este puente.

puede de manera que el nivel de la plataforma quedara siempre un metro por encima de las crecidas máximas observadas.

Esta condición de insubmersibilidad de la línea exigía un volumen de terraplén de 600.000 m.³, y la construcción de 72 obras de desagüe suplementario, muchas de ellas con 2, 3 y hasta 5 tramos de 6 m. El gasto de estos 28 kilómetros de acceso alcanzaba nueve millones de francos, a los precios de 1919; a los de hoy, se hubiera doblado el desembolso.

Pero, quizá influenciados por el criterio económico que los Ingenieros españoles sosteníamos en la sección nuestra de aquel ferrocarril, y sobre todo por el enorme encarecimiento de las obras, posterior a aquel proyecto, decidió la Compañía, de acuerdo con la autoridad zonera, atravesar todo aquel valle *a ras del suelo*, sentando las traviesas sobre una primera capa de arena de 40 cm., y envolviendo aquéllas en una segunda capa de balasto de piedra de 15 cm.; con drenes transversales de piedra y cunetas longitudinales se saneaba la plataforma en los puntos algo bajos; en 42 depresiones más acentuadas se construyeron grupos de pequeñas obras para facilitar el desagüe.

Las rasantes, con límite de 2 mm. de pendiente, se plegaron al terreno natural de manera que la vía no constituyera en ningún punto un dique a las inundaciones, y únicamente alcanzaron 6 mm. de pendiente en los accesos al puente propiamente dicho, de tramos rectos metálicos, cuyas cabezas inferiores se han elevado 1,50 m. por encima de la máxima crecida (1).

En resumen, se ha hecho *un badén de 27 kilómetros*.

La economía de esta solución sobre la de 28 kilómetros de terraplén insubmersible, es del orden de *cuatro millones de pesetas*, a los actuales precios.

Construída la línea, la extraordinaria crecida de febrero de 1924 sumergió gran parte del valle; los desperfectos fueron insignificantes; únicamente hubo que añadir dos nuevos tramos de 6 m. para aumentar el desagüe en los puntos más castigados.

Vemos, pues, la flexibilidad de criterio que debe presidir en la fijación de rasantes en valles inundables, aun para puentes de ferrocarriles de vía ancha.

(1) En el tomo II, página 113, hemos dado algunos detalles sobre la cimentación de las pilas de este puente, constituido por 3 tramos de 27 m. y 2 tramos de 35 m. de longitud.

Peraltes sobre crecidas (1). — Cuando el trazado de la vía consiente rebajar la rasante del puente, claro es que conviene hacerlo cuanto lo permita el desagüe que se desea obtener; así se reduce el costo de la obra.

Para ello, y una vez aquilatadas las dimensiones de las vigas en los tramos o de los tímpanos y arcos, conviene fijar el nivel de las cabezas inferiores de aquéllos o de la clave en éstos sobre el de las crecidas, de manera que no les alcancen, a ser posible, los cuerpos flotantes que aquéllas suelen arrastrar.

Esta distancia es el *peralte* sobre las crecidas.

En tramos rectos convendría que este peralte no fuera inferior a unos 0,60 m.; en puentes en arco rebajado, el nivel de las crecidas ordinarias no deberá exceder del nivel de arranques, y en bóvedas de medio punto, de la altura de sus riñones.

Pero este *desideratum* es generalmente platónico.

Las crecidas no se sujetan al nivel que en los planos se les señala. Su variabilidad aconseja no fiarse de estas reglas, ni debemos tampoco preocuparnos con exceso de ellas.

Cuando sobreviene una crecida extraordinaria, los puentes bien dispuestos las sufren sin deterioro, y sólo en casos excepcionales, y entonces, generalmente por socavación en los cimientos, se registran hundimientos de uno o más tramos.

Recuérdese también que cuando las crecidas llegan a tapar los ojos de un puente, y hasta cuando sobrepasan su plataforma, como hemos citado casos en el capítulo anterior, se han inundado los accesos y los valles; el aumento de la sección de desagüe lleva entonces consigo la reducción automática de la velocidad de la corriente.

En grandes viaductos para carreteras. — Cuando el terreno o el trazado piden grandes viaductos, el estudio de sus rasantes adquiere singular importancia, porque su coste aumenta o se reduce, no en la proporción de sus alturas, sino en progresión geométrica, como con las luces de los tramos o arcos.

Mejor que una explicación servirá un ejemplo anecdótico.

En la carretera estratégica que estudiamos en 1897, entre

(1) Los franceses lo denominan *Revanche*.

Fonfría y Bermillo de Sayago (Zamora), se desarrolla el trazado en mesetas entrellanas y a unos 250 m. de altura sobre el nivel del río Duero, que las divide por una muy pronunciada depresión, de que da idea la figura 40, en la que teníamos que proyectar la obra de paso correspondiente (1).

Estableciendo la rasante de un puente a unos 15 o 20 m. de altura, suficiente para su desagüe, hubiera sido necesario desarro-



Fig. 40. Puente-viaducto de Pino, sobre el Duero

llar la bajada hasta el puente con un recorrido de unos 4 kilómetros, al 6 por 100, y después de atravesar el río, continuar con una rampa de igual longitud y pendiente.

Las márgenes del río son muy abruptas en casi toda su altura y en una gran extensión de su cauce, en la zona de la ubicación

(1) Nuestro ilustre compañero D. Práxedes M. Sagasta, Ingeniero de aquella provincia el año 1868, había comenzado el estudio de este puente, cuando los sucesos revolucionarios de aquella época le arrastraron a Madrid, donde se ocupó desde entonces de política.

del puente; además, no había vaguadas afluentes que permitieran aquellos desarrollos del trazado, por lo que éste necesitaba recurrir a varios zig-zags, con todos sus inconvenientes de gasto y de peligro.

El coste medio de un kilómetro de carretera en aquellas pendientes y rampas de acceso al puente, no siendo inferior en aquella época a 100.000 pesetas (hoy costaría más del doble), los 8 kilómetros de desarrollo hubieran representado un gasto de 800.000 pesetas.

Nos pareció, pues, evidente la conveniencia de un gran viaducto, pero el problema magno consistía entonces en determinar la rasante que había de adoptar.

Ante esta indecisión, procedimos por laboriosos tanteos de trazado y de soluciones correspondientes a diversas rasantes de viaductos, para que los aumentos de coste del viaducto fueran compensados por la reducción de longitud de la carretera.

Así conseguimos fijar la rasante del viaducto a 90 m. sobre el río, y disminuir en 2.200 metros el desarrollo del camino, que sólo necesitó un amplio zig-zag en la margen derecha.

Quedó, además, a favor del tránsito la reducción de la bajada y consiguiente subida en los 70 m. que conseguimos así elevar la rasante.

Vemos, pues, que aun para carreteras deben estudiarse las rasantes de los viaductos con especial predilección, sobre todo ahora, en que la intensa circulación automóvil las permite competir, a veces con ventaja, sobre ferrocarriles de escaso tráfico y acentuados perfiles.

En grandes viaductos para ferrocarril. — Pero es más importante aún que en las carreteras, el estudio de las rasantes de los grandes viaductos para ferrocarril.

En éstos, las pendientes admisibles para el trazado (salvo para tracción eléctrica, aún poco extendida) no exceden de 20 mm., y el coste de explanaciones y obras de fábrica, por efecto de las grandes curvas que exige, es mucho mayor que el de los caminos ordinarios.

Por último, la supresión de largas pendientes y rampas influye muy considerablemente en los gastos de explotación.

Así que todos estos factores obligan frecuentemente al estudio de grandes viaductos, cuyas rasantes no deben establecerse sin un concienzudo estudio de todas las soluciones de trazado y viaductos correspondientes.

Como dijimos en el ejemplo precedente, téngase en cuenta que cada veinte metros que se eleve la rasante del viaducto, pueden economizarse dos kilómetros de desarrollo en pendiente de 20 mm.; que en terrenos quebrados, como los que suelen encontrarse en las regiones necesitadas de viaductos, el kilómetro de línea férrea exige un gasto de construcción que oscilará hoy entre 300 y 600 mil pesetas; estas cifras serán frecuentemente superiores a lo que cueste la elevación correspondiente de la rasante.

Recuérdense, por último, las economías de conservación y *sobre todo de explotación* que esta reducción y mejora del perfil de la línea había de producir.

Como dijimos en el capítulo II, con igual razonamiento que al trazar un ferrocarril no vacila el Ingeniero en afrontar un túnel que separa dos valles, debe estudiar un viaducto que separa dos laderas (fig. 22, pág. 42).

Un largo túnel puede ser beneficioso, a pesar de su gran coste. Lo mismo suele ocurrir con un gran viaducto.

Los grandes arcos de acero, y mejor aún de hormigón armado, permiten soluciones múltiples, que deben tantearse con las diferentes rasantes que el trazado permita. Unicamente su comparación económica permitirá apreciar la disposición y la rasante óptima. Sería fatuidad ridícula pretender el acierto espontáneo de un problema tan complejo, en el que se juegan centenares de miles de pesetas.

Rasantes con o sin balasto. — En puentes o viaductos de hormigón armado para ferrocarril habrá que resolver previamente si las traviesas de la vía han de apoyarse directamente sobre el tablero, como en los puentes de hierro, o sobre la capa normal de balasto, como suele hacerse en los puentes de fábrica.

La cuestión no es indiferente, pues se trata de una reducción de 15 a 20 cm. de altura en toda la longitud del puente, y lo que es más importante aún, de una reducción de peso muerto de 3.000 kilogramos por metro lineal de puente, por supresión de balasto, que afecta sensiblemente al coste de los arcos o tramos.

Sostienen los Ingenieros opiniones diversas, según ya indicamos en el tomo I (pág. 230), al ocuparnos de las pequeñas obras.

El autor entiende que, como el balasto tiene por objeto principal repartir las sobrecargas sobre la plataforma, en los tableros

de hormigón armado las traviesas y el forjado se bastan para efectuar este reparto; sobra, pues, el balasto, y hasta perjudica, pues que aumenta inútilmente el peso muerto.

Así lo hemos realizado en muchos puentes (1), y así lo hizo Zafra en los ferrocarriles suburbanos de Málaga.

Pero hay muchos técnicos ferroviarios que prefieren mantener el balasto, porque suponen con ello mejor repartidas las sobrecargas y más fácil el asiento y, sobre todo, la conservación de la vía.

La Comisión nombrada por la Dirección general de Obras públicas para redactar modelos oficiales de puentes de ferrocarril de vía ancha, de hormigón en masa, de hormigón armado y metálicos (2), se ha pronunciado, por unanimidad, en la forma siguiente:

En los puentes con bóvedas de hormigón en masa, semejantes por su peso a los de fábrica, la vía llevará balasto.

En los puentes de hormigón armado que excedan de 15 metros de luz, y en los metálicos, puede y debe suprimirse el balasto; en los primeros bastará una pequeña capa de 3 a 6 centímetros de arena gruesa, contenida lateralmente por pequeños bordillos de hormigón armado, en la forma que describiremos en el capítulo XVII, al ocuparnos de estos modelos oficiales.

Así se fijarán las rasantes de las plataformas.

En canales. — En estas obras las pendientes tienen que ser constantes y en un solo sentido, pero de muy escasa inclinación.

Cuando los acueductos son largos, conviene aumentar en ellos la pendiente de los canales, para reducir la sección de los cajeros y, por ende, el coste de los acueductos. Así lo hemos hecho en los canales del Taivilla y Guardamar (provincia de Murcia), forzando en los acueductos largos las pendientes a 0,001, en canales cuyas inclinaciones estaban comprendidas entre 0,00025 y 0,0005.

En acueductos cortos no vale la pena de recurrir a esta economía, que no suele compensar las pérdidas de carga en los cambios de régimen del canal producidos por los quebrantos de rasantes.

(1) Los de Ceuta a Tetuán y de Tánger a Fez (zona española).

(2) Por O. de 28 de octubre de 1926 de la Dirección de O. P. se nombró esta Comisión, formada por el Inspector general D. J. Eugenio Ribera, Presidente, y los Ingenieros D. Domingo Mendizábal y D. Alfonso Peña, todos ellos Profesores de la Escuela especial de Ingenieros de Caminos.

A primera vista no parece que esta cuestión de aumentos o reducción de pendientes en los acueductos tenga gran importancia, pero ya veremos más adelante, al ocuparnos de los sifones, que todo aumento de pendiente en los canales, si bien lleva consigo una reducción de las dimensiones de las obras, puede este beneficio quedar anulado por la pérdida de altura, o sean kilovatios, si se trata de obtención de fuerza, o zona regable, si se trata de riegos.

El estudio económico de este problema obliga a tener en cuenta en su examen comparativo, la *capitalización* de los beneficios o pérdidas de cada una de las soluciones que pueden presentarse.