



de las crecidas, tiene que contraerse su sección. Se remansa entonces el río aguas arriba en una de las formas de la figura 23, no volviendo a recobrar su nivel normal hasta una distancia bastante grande y aguas abajo.

Este verdadero salto  $S$  (fig. 24) determina a su vez un aumento de velocidad de las crecidas entre los apoyos del puente.

La velocidad alcanzada puede ser bastante para socavar el lecho del río. Si la socavación alcanza la base del cimiento  $AB$  como en  $PQR$ , se derrumba aquél, arrastrando la caída de los arcos o tramos a que servía de apoyo.

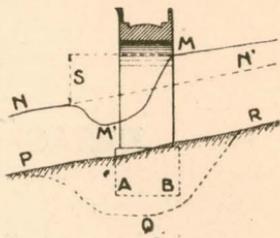


Fig. 24

Tal es la causa más general de los hundimientos de los puentes.

Citaremos un hecho reciente.

El año 1926 se hundió uno de los arcos del puente de Mieres sobre el río Caudal (Asturias) (fig. 25), durante una formidable crecida de aquel río.

Este puente había sido proyectado por el autor hace treinta años, para sustituir a un antiguo puente de madera de 100 m. de longitud, que exigía constantes reparaciones.

Lo habíamos proyectado de hormigón armado, con dos arcos rebajados al  $1/10$  de 35 m. y tres tramos rectos de 10,50 m. de luz en su margen derecha para el desagüe de crecidas, es decir, un desagüe lineal de 101,50 m. mayor que el del puente de madera sobre palizadas de roble, que había resistido durante muchísimos años todas las crecidas de aquel río, que por su nacimiento en las montañas del Pajares, que sufren anualmente copiosas nevadas, estaba sujeto a las crecidas de los deshielos rápidos de aquella cordillera.

Al construir el puente, hace unos veinte años, se creyó conveniente *suprimir los tres tramos rectos*, quedando únicamente los dos arcos de 35 m., *es decir, que se redujo en una tercera parte el desagüe lineal del puente*; se consintió además que las minas de carbón inmediatas vertieran sus escombros al río, formando verdaderos espigones en la margen izquierda, que empujaron el cauce hacia la orilla opuesta.

Esta desviación de la corriente hacia el estribo derecho, y sobre

todo la reducción del desagüe, determinaron la socavación y ruina de aquel estribo, que arrastró la del arco que sobre él se apoyaba (1).

Vemos, pues, que en la redacción de un proyecto de puente el estudio de su desagüe, sobre todo en lechos socavables, merece especialísima atención.



Fig. 25. Puente de Mieres (Asturias)

**Las teorías de la Hidráulica no suelen ser aplicables.** — Hace más de medio siglo, el gran Dupuit demostró que el problema del desagüe de los puentes «entra en el dominio de la imaginación e inventiva y da lugar a un número inmenso de soluciones» (2).

A pesar de ello, muchos ingenieros se han entregado a doctas disertaciones, deduciendo fórmulas para calcular teóricamente el desagüe de los puentes.

Todas ellas nos parecen algún tanto fantásticas.

Las teorías de la Hidráulica, como, por lo demás, todas las teorías de la Mecánica, sólo son aplicables si las hipótesis en que se fundamentan se realizan práctica y exactamente.

(1) Detallamos las causas de este accidente, porque se ha atribuido por algunos a defectos del proyecto. No presume el autor de infalible; por el contrario, en el tomo II ha enumerado los cimientos en que ha sufrido contratiempos, de los que sólo escapan los que dedicados a la crítica, no han conjugado el verbo hacer. Pero en este caso particular, quizá no estuviera hundido el puente de Mieres si se hubiese respetado el desagüe del proyecto.

(2) Lechalas: *Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux*. Introducción al libro de Degrand y Resal, *Ponts en maçonnerie*, tomo I, página 25.

Quizá sean admisibles para canales de sección constante y en muy escasos trozos de ríos, en los que la pendiente, secciones y márgenes se mantengan iguales, y aun entonces sólo cuando el régimen pluviométrico es regular.

Pero estas circunstancias son excepcionales; ni siquiera concurren en los ríos del Norte de Europa, allí donde las lluvias son normales, donde los valles se han encauzado por obras gigantescas que en una lucha de siglos sus densas poblaciones levantaron contra las inundaciones, destructoras de sus propiedades. ¡Cuánto más absurdo sería aún recurrir a la Hidráulica en nuestros ríos de la Península o de Marruecos, sin bosques, ni presas, ni encauzamientos que regularicen su curso, y sometidos además al régimen torrencial de nuestras lluvias!

Bien sé yo que no faltan críticos de gabinete que consideran deficiente un proyecto de puente en cuya Memoria no se intercalen algunas fórmulas, empíricas y arbitrarias siempre, o gráficos y tablas que evidencien un aparatoso estudio del desagüe.

En cambio, salvo casos muy contados, cuando se proyectan líneas de ferrocarril, en los que las obras de fábrica adquieren considerable cuantía en número y coste, se prescinde casi siempre de estos imaginarios cálculos, y sus autores fijan las luces de los puentes por consideraciones de orden *artístico*, por decirlo así, más que por razonamientos científicos (1).

Es, pues, preferible estudiar los factores de orden práctico que permitan, por racionales deducciones, fijar los desagües máximos que han de darse a los puentes.

**Niveles de estiaje y crecidas.** — Para el proyecto de un puente, el dato más útil e indispensable es la fijación en el perfil transversal del cauce de los niveles de estiaje, de aguas medias, de las crecidas periódicas ordinarias y de las máximas y extraordinarias.

El *nivel de estiaje* es necesario para la fijación de las alturas y de los procedimientos de cimentación.

---

(1) Dice Lechalas en el citado libro *Ponts en maçonnerie*, tomo I, página 91: «Al resolver estos problemas, reconoceremos que hay un *arte del Ingeniero*, tanto como una *ciencia del Ingeniero*. Como el arquitecto, debe el Ingeniero esforzarse en satisfacer las reglas del gusto, al mismo tiempo que alcance el objeto de utilidad propuesto; pero debe sobre todo realizar obra imaginativa, si bien recurriendo a sus conocimientos científicos, que le son indispensables.»

La *cota media de las aguas* permite fijar a su vez la altura conveniente para el arranque de los arcos.

Los niveles alcanzados por las crecidas suelen a su vez bastar para el cálculo del desagüe.

Las alturas de estiaje y aguas medias son fáciles de determinar, pues se reproducen anualmente. No así el *nivel de las crecidas*, en cuya apreciación caben errores, a veces considerables.

El nivel de las *crecidas periódicas* no sólo se diferencia de un año a otro, sino que son motivo de dudas, aun entre los naturales del país, cuando la ubicación del puente coincide con un lugar inculto y deshabitado.

Un error de apreciación sobre este dato, confiado a un ayudante que creíamos experto, nos hizo proyectar un puente con cimentación insuficiente, y ocasionó un accidente costoso (1).

La insuficiencia de desagüe determinó un elevado remanso, que al aumentar la velocidad del agua provocó la socavación y la ruina de un estribo.

Hubo que reconstruirlo, aumentando además los tramos necesarios para el desagüe con arreglo al verdadero nivel de las crecidas.

Tiene, pues, especial importancia la fijación exacta del nivel de las crecidas periódicas, y en caso de duda es preferible siempre pecar por exceso.

Pero es aún más difícil determinar el nivel de las *crecidas máximas extraordinarias*.

Sólo ocurren éstas en épocas de tormentas o lluvias excepcionales, que se distancian muchos años y no dejan vestigios o señales, sino cuando coincide la ubicación del puente proyectado con edificios próximos.

Es, pues, necesario hacer una encuesta para señalar su altura con la prudente aproximación.

Fijados todos estos niveles en el perfil transversal elegido para emplazar el puente, se presenta el primer problema: si la obra ha de proyectarse para dar paso a las crecidas ordinarias solamente, o si ha de ofrecer desagüe bastante para la mayor crecida extraordinaria, por muy excepcional que haya sido.

---

(1) Puente sobre el río Henares, en el ferrocarril de vía de 0,60 m. de la línea de Poveda a Torrejón, para la Azucarera de Madrid.

**En cauces firmes y regulares.** — Si se trata de un cauce regular y definido, *en terreno firme*, de forma sensiblemente triangular o trapezoidal (fig. 26), ofrece escasa importancia la cuestión.

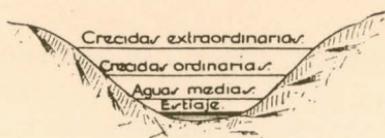


Fig. 26

Elevando la rasante lo necesario, poco influyen en el desagüe las luces que se adopten para los tramos o arcos, pues aunque sean inferiores al ancho máximo de las crecidas, todo será que se produzca un remanso y un aumento de velocidad, que la fortaleza del terreno podrá resistir.

**En valles inundables.** — Pero cuando el puente ha de atravesar un valle sumergible por las inundaciones, como ocurre frecuentemente (fig. 27), este problema se complica singularmente.

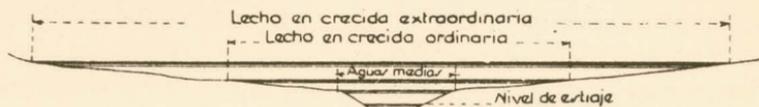


Fig. 27

Somos muchos los Ingenieros que opinamos que, salvo en contadísimos casos, los puentes no deben proyectarse con vistas a desaguar el caudal de las crecidas excepcionales, de aquellas que se reproducen cada veinte o cincuenta años.

Cuando tales catástrofes ocurren, las aguas invaden enormes zonas de terrenos y hasta inundan las poblaciones. Su extenso desbordamiento suspende todo el tránsito. Cuando no se puede circular por caminos y calles, ¿para qué se utilizan los puentes?

En muchos de éstos, algunos construídos por el autor (1), el nivel de las crecidas ha rebasado sus tableros, sin daño alguno, porque entonces el propio desbordamiento de los ríos, al ensanchar la sección de desagüe, reduce la velocidad de la corriente, cuya violencia se amansa automáticamente.

Así es que, sin perjuicio de fijar el nivel de la mayor crecida,

(1) Puente del Reguerón sobre el nuevo cauce del Guadalentín (Murcia); puente sobre el Jarama para el ferrocarril de la Azucarera de Madrid; puente sobre el río Martín, en Te tuán (Marruecos).

cuya altura pueda comprobarse, el dato interesante para el proyecto de un puente es el del nivel que alcanzan las crecidas que se reproducen, si no anualmente, por lo menos con cierta periodicidad; éstas son las que conviene desaguar, para que el tránsito normal no sufra interrupción durante su permanencia.

Si hubiese que construir todos los caminos y los puentes a cubierto de las más formidables inundaciones, aquellas que arrasan comarcas enteras, deberían duplicarse, por lo menos, los presupuestos de estas obras.

**Puentes sumergibles.** — Es más, no faltan Ingenieros, y el autor coincide con ellos, más radicales aún: opinan que en caminos de interés local pueden construirse puentes sumergibles por las crecidas periódicas. Con esta premisa, el puente sólo se construye en la longitud y altura correspondiente al cauce normal de aguas medias, con tramos rectos y apoyos de reducidos espesores y hasta con barandillas plegables que se doblen sobre el tablero, para que la superestructura oponga la menor sección a la fuerza de la corriente y no perturbe su desagüe (1).

Claro es que así construído el puente, no puede utilizarse los días de crecidas. Pero debe tenerse en cuenta que entonces los tráficos locales suelen interrumpirse casi totalmente; cuando diluvia, cuando los ríos se desbordan, la gente no circula por los caminos. ¡Menos circulaban aún cuando no había puentes!

El coste de estos puentes puede reducirse en enormes proporciones.

Según los Ingenieros uruguayos, en algunos casos alcanza la diecisieteava parte del gasto que ocasionaría una obra construída por encima de las crecidas excepcionales.

Por otra parte, sólo dejaría de utilizarse durante unos cuarenta días al año, por ejemplo, y como término medio. ¿No es preferible construir 17 puentes utilizables trescientos veinticinco días al año, que uno solo utilizable trescientos sesenta y cinco días?

No creemos dudosa la contestación, que justifica cumplidamente el criterio industrial y económico con que deben estudiarse estos proyectos.

(1) En el Uruguay se ha generalizado este criterio. (Véase nuestro artículo «Puentes en el Uruguay», *Revista de O. P.*, 13 de febrero de 1924.)

Insistiremos sobre este punto al ocuparnos en el próximo capítulo de las *rasantes* de los puentes.

**Desagüe de los accesos al puente.** — Los puentes empalman con las márgenes por medio de muros y terraplenes que suelen llamarse *de avenidas*, pero que el autor prefiere llamar más propiamente *de acceso*. En cauces regulares y bien definidos se aligeran los muros por medio de arcos formando grupos de alcantarillas o de pontones que contribuyen al desagüe del puente en las crecidas, por lo que suelen llamarse *arcos* o *tramos de avenidas*.

Pero cuando a uno u otro lado del cauce regular del río existen, como es muy frecuente, explanadas o vegas inundables, para utilizar el puente cuando sobrevienen crecidas se precisa prolongarlo en ambas márgenes por medio de largos terraplenes de acceso.

Pueden ser éstos como los puentes:

- 1.º — Sumergibles en crecidas periódicas u ordinarias.
- 2.º — Sumergibles en crecidas extraordinarias.
- 3.º — Insumergibles en la máxima inundación o crecida.

Examinemos cada uno de estos casos:

Cuando se proyecta sumergible el puente, no hay razón que aconseje proceder de manera distinta para sus accesos. Se establecen directamente las calzadas de los caminos o las vías de los ferrocarriles sobre el terreno natural, debidamente regularizado, desaguándose libremente los desbordamientos de los valles sobre el mismo terreno, si fuera uniforme; cuando existan depresiones en el valle, se colocan en ellas los indispensables caños y tajeas, para evitar el encharcamiento de las aguas.

**Badenes.** — Si el puente se proyecta con desagüe para crecidas ordinarias, pueden, sin embargo, establecerse sus accesos sumergibles para estas mismas crecidas, si la longitud y coste de los terraplenes de acceso y sus desagües fueran tan considerables que así lo aconsejaran. Existen muchos puentes que emergen sobre el nivel de las crecidas y cuyos accesos quedan cubiertos por los desbordamientos laterales del río; actúan entonces esos accesos como *grandes badenes* (1).

(1) En el Cap. III daremos ejemplos en esta disposición.

Pero cuando las crecidas periódicas sólo alcanzan alturas inferiores a un metro, próximamente, representa poco gasto y ofrece, en cambio, sensible ventaja construir terraplenes de acceso por encima del nivel de aquellas crecidas, que se desaguan transversalmente por los caños o tajeas distribuidos a lo largo de los terraplenes, lo que permite la rápida evacuación de los desbordamientos.

Sólo funcionan como badenes cuando las crecidas exceden de las que se consideran como ordinarias.

A medida que aumenta el nivel de estas crecidas sobre el valle se encarecen mucho los accesos del puente, no sólo por la mayor altura en los terraplenes, sino por la importancia que adquieren los desagües de los mismos, que ya en vez de tajeas necesitan ser alcantarillas o pontones. Como además los terrenos que constituyen estos valles son generalmente aluviones de escasa consistencia, las soleras de las pequeñas obras de desagüe están expuestas a socavaciones por la corriente que en ellas se produce; deben, pues, cimentarse profundamente, o defender sus lechos en toda su anchura.

Ofrecen estas soluciones, algún tanto híbridas, de accesos sumergibles en crecidas extraordinarias un gran peligro cuando aquéllas sobrevienen: la de que la corriente, al desbordar los terraplenes, caiga en forma de cascada sobre los taludes de aguas abajo (en los que generalmente el nivel del agua es menor que aguas arriba), y que este vertedero desmorone el terraplén y abra en él un boquete, que se agranda rápidamente.

**Diques.**— Así es que cuando los puentes se proyectan para dar paso a las crecidas extraordinarias, parece preferible construir los terraplenes de acceso con igual hipótesis, constituyendo verdaderos *diques insumergibles*.

Pero cuando son muy largos no deben cerrarse en toda su longitud, porque el remanso que producen aguas arriba, y que obliga a sus aguas a vaciarse a lo largo del terraplén, al chocar con la corriente normal del cauce engendra bajo el puente torbellinos que contraen su desagüe.

Deberán, pues, dejarse también pontones de descarga a través de esos diques, cuyas luces habrá que estudiar con cuidadosa par-

simonia, para evitar que el remedio sea, como vulgarmente se dice, peor que la enfermedad.

Obsérvese que en estos valles es frecuente encontrar depresiones acentuadas (fig. 28) que acusan corrientes de agua procedentes unas veces de las vaguadas de las laderas, como en *A*, por ejemplo; otras, como en *B*, de antiguos cauces del propio río, que suelen designarse con el nombre de *madres viejas*.

Por otra parte, la dirección de la corriente en las crecidas no es siempre la del cauce, según vimos al ocuparnos de los emplaza-



Fig. 28

mientos; hay ocasiones en que ya por la influencia de afluentes de las dos márgenes, desigualmente crecidos por las diferentes lluvias de sus cuencas, ya por las defensas o invasiones de lecho que los ribereños efectúan en sus propiedades, se desvía la corriente hacia un punto del terraplén de acceso, contra el que lucha con violencia, rompiéndolo a veces.

Si para evitarse tal contingencia se deja libre paso a las aguas que puedan correr por la madre vieja con grupos de pontones, como se indica en *B* (fig. 28), se corre el riesgo de que el mayor caudal de la crecida se desvíe hacia la madre vieja, como si fuera impulsado *por atávica tendencia* y socave y ensanche aquel cauce, abandonado largos años.

Entonces puede también suceder que calmadas las iras del río y restablecido a placer el régimen en su antiguo lecho, los aluviones aportados por crecidas sucesivas rellenen el cauce donde se había construído el puente, quedando éste inútil y como vergonzante, hasta que se construya otro nuevo puente en el nuevo cauce abierto por la crecida en su madre vieja.

No son exageradas ni fantásticas estas contingencias, que ocurren con frecuencia en muchos de nuestros ríos.

Citaremos dos ejemplos de semejantes traslaciones de cauces, uno de ellos muy reciente.

**Traslaciones de cauces.**— En la carretera de Río Negro a la

de León a Caboalles (León), y sobre el río Orbigo, se terminó el año 1895 un puente, llamado de Carrizo, metálico, de tres tramos de 48-60 y 48 m. de luz (fig. 29 a).

El año 1900, una impetuosa crecida rompió el terraplén de acceso de la margen izquierda y empezó el río a inclinarse hacia el boquete abierto, hasta que se formó en él un cauce nuevo, con abandono del antiguo lecho.

En vez de reparar el terraplén, se prefirió prolongar el puente

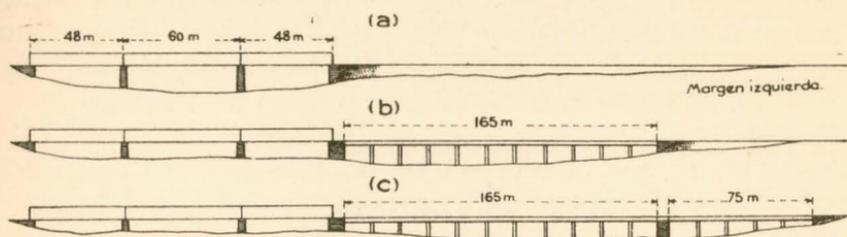


Fig. 29. Puente de Carrizo (León)

de hierro. En el concurso de proyectos celebrado a tal efecto fué preferido el del autor, que consistía en construir sobre este nuevo cauce once tramos de hormigón armado de 15 m. de luz (fig. 29 b).

Pero antes de terminar la construcción de estos tramos, una nueva crecida, cuya corriente principal se inclinó aún más hacia la margen izquierda, nos obligó a alargar el nuevo puente con otros siete tramos de 15 m. (fig. 29 c) (1).

Para evitar mayores traslaciones del cauce y la destrucción amenazadora del pueblo inmediato, fué además preciso establecer en aquella margen y en el resto del terraplén varios espigones oblicuos y fuertes defensas con gaviones de tejido metálico, que desde el año 1912 han bastado para contener el río, que hoy tiene un desagüe lineal de 426 metros.

En la provincia de Sevilla, el río Guadalquivir ocasionó análogo accidente el año 1924 en el puente de la Algaba, llamado de Borbolla (fig. 30 a) (2).

Una violenta crecida, sin duda por efecto de la defensa con espigones de la margen derecha en que está construído un puente metálico de cuatro tramos de 41,80 m. de luz, empujó su

(1) En la tercera parte de este libro describiremos las pilas y tramos de este puente.  
 (2) Detalles de este accidente, en la *Revista de O. P.* de 1924, páginas 150, 175 y 295.

corriente hacia la margen opuesta, en la que había dos grupos de desagüe suplementarios, con nueve pontones de 6 m. cada uno y un largo terraplén de acceso.

La socavación que produjo la corriente en dos pilas de uno de los grupos de pontones, cimentados, sin embargo, a 3 m. de profundidad, derrumbó aquéllas, ocasionando el hundimiento de los nueve arcos de dicho grupo y la muerte de quince vecinos que contemplaban la crecida.

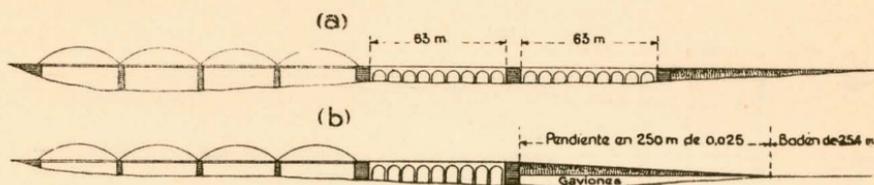


Fig. 30. Puente de I.ª Algaba

Después de estudiarse varias soluciones, la Dirección de O. P. consideró preferible suprimir el grupo de pontones derrumbado y reforzar los del grupo subsistente en la forma que explicamos en el tomo II, página 302.

Se substituyó entonces el terraplén de acceso por un badén horizontal de 254 m. sobre el mismo cauce del río, empalmándolo con el puente por un terraplén en rampa de 0,025 (fig. 29 b). Este terraplén está defendido a su vez con gaviones de tejido metálico, rellenos de piedra, análogos a los descritos en el tomo II, páginas 286 y 300.

**Posibles equivocaciones.** — Vemos, pues, que en valles y cauces susceptibles de traslación, y en ríos caudalosos, aunque puedan preverse los efectos de las crecidas, es muy difícil de evitarlos siempre. Sin llegar al fatalismo musulmán, hemos de confesar que aun muy bien estudiados los desagües, pueden ocasionar éstos sorpresas imprevistas y destrucciones inevitables.

Oponer un dique continuo de terraplén contra un río como el Guadalquivir, o disponer en un cauce movedizo alcantarillas o pontones de somera cimentación, es, como se ha visto, no sólo aleatorio, sino peligroso.

Construir en todo el ancho de cauces análogos una enorme longitud de puente, costosamente cimentado, sería un despilfarro.

El problema es, pues, muy complejo, y merecen compararse las diferentes soluciones que hemos examinado.

Es más interesante el estudio de varios anteproyectos de estas soluciones, que la perfecta redacción de un proyecto único.

Pero aun así el Ingeniero más eminente está expuesto a equivocación y hasta a un fracaso.

**En ríos muy encauzados.** — En las poblaciones y en las zonas de los ríos en que por existir navegación fluvial los cauces han adquirido una sensible regularidad, y cuando se hayan reunido desde muy antiguo datos numerosos sobre el régimen de crecidas, pueden aplicarse algunas fórmulas de la Hidráulica.

El gasto del caudal máximo del río es el dato más necesario para calcular el desagüe del puente, de modo que su construcción no perturbe sensiblemente el régimen fluvial.

Los Servicios de las Divisiones hidráulicas del Estado van acumulando datos de aforos sobre los gastos en los ríos más importantes, cifras de gran utilidad sobre todo para el estudio de las presas y aprovechamientos de agua.

Pero serán muy contados los puentes próximos a las estaciones de aforo.

En los demás habrá que calcular o medir directamente las velocidades medias del agua en la sección transversal del cauce.

**Fórmulas hidráulicas.** — Recordaremos las fórmulas de más frecuente y admisible empleo, que permitirán deducir, si no cifras exactas, al menos una orientación sobre el orden de su magnitud.

Designando por:

$Q$  el gasto en  $m^3$  por segundo.

$\Omega$  la sección mojada del perfil en  $m^2$ , o sea el desagüe superficial.

$V$  la velocidad media en metros por segundo.

$i$  la inclinación o pendiente por metro.

$p$  el perímetro mojado.

$r$  el radio medio =  $\frac{\Omega}{p}$ .

$\alpha$  y  $\gamma$  coeficientes variables con la naturaleza de las paredes.

Pueden aplicarse las conocidas fórmulas:

$$Q = \Omega V$$

$$V = \alpha \sqrt{r}$$

$$\alpha = \frac{87 r}{\sqrt{r + \gamma}} \quad (\text{Bazin}).$$

El coeficiente  $\alpha$  puede deducirse aplicando los valores de  $\gamma$  siguientes:

NATURALEZA DE LAS PAREDES	$\gamma$
Tablazón fina o enlucidos lisos.....	0,06
Tablazón basta, ladrillo, sillería.....	0,16
Mamposterías .....	0,46
Taludes de tierras bien perfilados.....	0,85
Taludes ordinarios.....	1,30
Paredes muy rugosas (piedras, hierbas, etc.)..	1,75

Pero estas fórmulas suponen que la pendiente, la sección transversal y la rugosidad de las paredes sean regulares, lo que a lo sumo puede admitirse en una zona del río que esté perfectamente calibrada.

No pueden aplicarse al lecho ordinario de los cauces, mucho menos a los ríos desbordados.

**Medición de las velocidades.** — Habrá, pues, que medir directamente las velocidades por los procedimientos que todos los libros de Hidráulica contienen (1), y para obtener la velocidad media, aplicarle un coeficiente de 0,80, generalmente admitido, aun escogiendo un trozo de río relativamente uniforme.

Para calcular directamente el gasto máximo habrá que esperar una crecida, pero ésta puede hacerse esperar mucho tiempo.

Supongamos (fig. 31) las alturas de agua  $a a'$  y  $a''$ , abscisas de una curva  $AB$ , de la que sean ordenadas los gastos  $g g' g''$ .

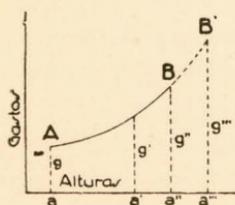


Fig. 31

Para apreciar el gasto correspondiente a una crecida máxima, cuya altura  $a'''$  puede determinarse en el terreno, bastará prolongar la curva  $AB$  hasta  $B''$  y medir la ordenada  $g'''$  del gasto correspondiente.

Pero estos procedimientos sólo darán las velocidades máximas con una relativa aproximación, y tanto valdrá en lechos de aluvión, que son los más frecuentes, fijarlas por una simple observación: la del tamaño de los aluviones que constituyen el lecho del río.

(1) En el *Traité des Ponts*, de Chaix (primera parte, tomo I, pág. 87), se describen con todo detalle.

La dimensión de estos aluviones está en proporción con las velocidades máximas que sufren. En la zona alta de las cuencas, las pendientes son fuertes, las velocidades grandes, y éstas arrastran las arenas y gravillas, cuyo peso no es suficiente para contrarrestarlas; a medida que baja el talveg, su pendiente disminuye y simultáneamente aparecen aluviones de menor peso; así, sucesivamente, hasta las desembocaduras de los ríos, en cuyos lechos sólo quedan arenas más o menos finas, que concluyen por convertirse en fangos en muchas rías, en los que la velocidad casi desaparece.

Existe, pues, una relación exacta entre las velocidades máximas y el tamaño de los aluviones.

De experiencias hechas por Dubuat (1), se deducen las velocidades capaces de socavar un lecho de aluvión, que son las siguientes:

Tamaño del aluvión.....	0,0025	0,01	0,04	0,10	0,17	0,38	0,67
Velocidades de fondo.....	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	3,00	4,00
Velocidades medias .....	0,36	0,70	1,43	2,14	2,81	4,29	5,21

A juicio del autor, las cifras así deducidas ofrecen tanta verosimilitud como las calculadas por fórmulas o por experiencias directas.

Sirven al mismo tiempo para deducir si los aumentos de velocidad producidos por los remansos son capaces de provocar socavaciones en los cimientos.

Con la aproximación propia de tan variables factores y coeficientes puede fijarse el gasto para las alturas de agua que merecen considerarse, y son:

- en el nivel de aguas medias;
- en el nivel límite en que el río puede ser navegable;
- en el nivel de crecidas máximas.

El cálculo del desagüe que ha de darse al puente dependerá de otras consideraciones, entre las que las principales son:

- las contracciones de la corriente por estribos y pilas;
- la altura del remanso correspondiente;
- la naturaleza del lecho y su socavabilidad;
- las condiciones de navegación.

(1) Chaix: *Traité des Ponts*, primera parte, tomo I, página 217.

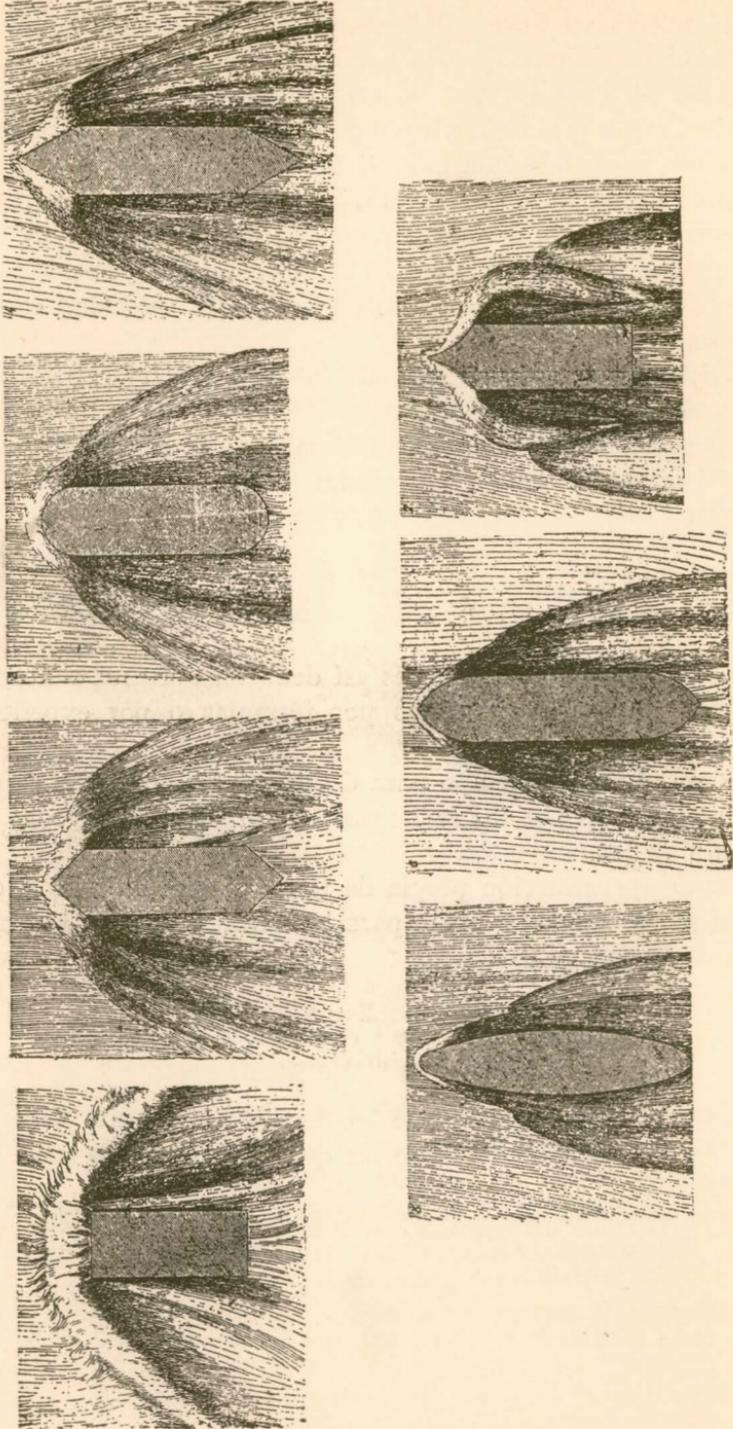


Fig. 32. Efectos de las pilas en una crecida

**Contracciones por los apoyos.** — Cuando los estribos sobresalen sobre las márgenes, desvían los filetes líquidos. Las pilas, a su vez, constituyen obstáculos al desagüe.

En la figura 32 se representan los efectos en planta observados por Gauthey (1), con las diferentes formas de tajamares.

En los rectangulares sin tajamar, la perturbación que ofrecen es máxima. Las formas ojivales y elípticas son las que más favorecen el desagüe.

Pero siempre el nivel del agua se eleva aguas arriba al chocar con los tajamares, y por los costados se desarrollan torbellinos que amortizan la velocidad de los filetes. Después de una serie de ondulaciones, el nivel del río sólo vuelve a normalizarse aguas abajo del puente.

En resumen, las pilas y salientes de estribos producen un aumento de velocidad bajo el puente, que hay que tener en cuenta, aplicando a la sección de desagüe superficial teórica de la obra un *coeficiente de contracción* inferior a la unidad.

Este coeficiente  $m$  depende principalmente de la forma de los tajamares y de las luces de los tramos.

Las fórmulas más conocidas son las de Croizette-Desnoyers, en función en la luz  $A$  del tramo:

En tajamar rectangular .....	$m = 0,70 + 0,029 \sqrt{A}$
En tajamar circular o triángulo regular .....	$m = 0,78 + 0,021 \sqrt{A}$
En tajamar ojival o triángulo muy alargado .	$m = 0,85 + 0,014 \sqrt{A}$

En bóvedas rebajadas, cuyos arranques se aneguen, deben tomarse:  $m = 0,70$ .

Este coeficiente  $m$ , es igual a la relación entre las velocidades  $U$  y  $V$ , antes y después de construído el puente.

En efecto, si  $\Omega$  y  $\omega$  son las secciones de desagüe antes y después de la construcción, tendremos que el gasto  $Q = \Omega U = \omega V = m \Omega V$ .

$$\text{Luego } m = \frac{U}{V}$$

(1) *Traité de la Construction des Ponts* (Paris, 1832), página 305. En la 2.<sup>a</sup> parte de este tomo, *Capítulo, VIII — Pilas*. estudiaremos estos tajamares.

**Cálculo y propagación del remanso.** — El remanso es el peralte del nivel del río, aguas arriba del puente.

No hay que confundirlo con el entumecimiento de las aguas producidas por las pilas.

Su altura puede calcularse con suficiente aproximación por el teorema de Bernouilli simplificado:  $x = \frac{V^2 - U^2}{2g}$  en el que  $x$  es la altura del remanso, o sea el desnivel del agua antes y después del apoyo;  $g$  es la aceleración debida a la gravedad (9,80 aproximadamente), y  $U$  y  $V$  las velocidades de la corriente antes y después de la construcción del puente, que pueden deducirse como anteriormente se explicó.

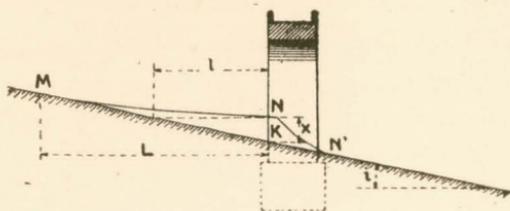


Fig. 33

Cuando el puente se proyecta sobre márgenes cultivadas, o si existen casas o presas aguas arriba, conviene conocer hasta dónde y cómo se propagará el remanso que la obra ha de producir.

Sea  $MN$  el perfil longitudinal de la corriente (fig. 33), que tiene una pendiente o inclinación  $i$ :

$$x = KN \text{ será el remanso antes calculado.}$$

Se puede admitir que la curva del remanso es un arco de círculo  $NM$ , que arranca horizontalmente en  $N$  y es tangente en  $M$  al nivel medio del río antes de la construcción del puente.

Como la inclinación media  $i$  del río es pequeña, puede admitirse que la longitud de río  $L$  afectada por el remanso es el doble de la longitud horizontal  $l$ ;

$$\text{y como: } x = li; \text{ de donde } l = \frac{x}{i},$$

podemos admitir que

$$L = \frac{2x}{i}$$

Los resultados así obtenidos ofrecen una aproximación suficiente para la mayor parte de los casos y hasta puede afirmarse

que los que se obtengan con fórmulas más complicadas no serán más exactos, ya que todos los datos de estos problemas están influidos por multitud de factores y circunstancias irregulares.

**Naturaleza del lecho y socavabilidad.** — Cuando el lecho del cauce es de roca compacta, resiste velocidades que exceden muchas veces de 12 m. por segundo.

Pero en los demás terrenos debe estudiarse el desagüe de manera a que las velocidades máximas del río, después de construído el puente, no produzcan socavaciones en su lecho.

Son estas velocidades máximas las siguientes:

Para lechos arenosos .....	0,30
Para gravas .....	0,60
Lechos de piedra aglomerada ..	1,50
Arcillas duras o rocas flojas ...	1,80

Quando se sospecha que las velocidades exceden de estas cifras, hay que defender el lecho del río, o los cimientos, con gaviones, escolleras, zampeados, inyecciones, etc., según explicamos en el tomo II, páginas 283 y 298.

En casos de duda, y en general en todos los puentes proyectados en lechos de aluvión, que son los que más frecuentemente se presentan, es preferible pecar por exceso, aumentando el desagüe.

Será casi siempre más económico construir algunos tramos más, de manera a no perturbar con el puente el régimen del río, que profundizar los cimientos para impedir la socavación de sus bases.

Hay tendencia a reducir la longitud en los puentes.

En lechos socavables suele ser un error económico. *Lo que no se va en tramos, se va en cimientos.*

Por ello el autor tiene en estos casos una marcada predilección para los puentes largos, o los grupos de pontones, que permiten cimientos baratos (1).

**Exigencias de la navegación.** — Aunque en España y Marruecos son muy limitadas las zonas de los ríos en que existe navegación fluvial, hay propósito de extenderla en el Guadalquivir y en el Ebro.

(1) Véase lo que se dice en el tomo I, páginas 238 y 244.

Por tanto, podrá haber casos en que el estudio de un puente obligue a tener en cuenta la posible navegación bajo sus tramos o arcos o a través de uno de ellos. Para esto último hay que proyectar tramos levadizos o giratorios.

En el puente de San Telmo, sobre el Guadalquivir, que estamos construyendo en Sevilla, así como en la corta de Tablada, en el mismo río y puerto, se han dejado al efecto tramos levadizos de 50 m. de luz, que permiten el paso libre de los mayores barcos que allí atracan (1).

En el río Nervión, y con igual objeto, hay un transbordador aéreo en Santurce, y un tramo giratorio en Bilbao.

Pero la navegación exclusivamente fluvial sólo exige que puedan pasar bajo el puente las embarcaciones del ancho y calado consentido por el régimen del cauce normal, sin velas y hasta sin chimeneas, que también pueden doblarse.

En los puentes de esta clase deberá aumentarse el desagüe, reduciendo en lo que se pueda el número y grueso de las pilas, para que la obra no produzca contracciones, remansos y aumento sensible de velocidad del río, que dificulten la navegación.

Claro es que ésta sólo podrá mantenerse en régimen normal, pues en días de crecidas habrá de suspenderse, porque la fuerza propulsora o la de sirga no pueden luchar contra la rapidez de la corriente.

**En puentes sobre rías.** — En las desembocaduras de muchos ríos en el mar, cuando coinciden con ensenadas de la costa, éstas toman el nombre de *rías*.

El problema del desagüe es aún más complejo, por la enorme extensión que pueden adquirir los cauces en pleamar.

Salvo necesidades especiales de navegación, será bastante desagüe para el puente el necesario para las crecidas máximas del río, no preocupándose de las aguas del mar, cuyo nivel se eleva siempre con lentitud y corriente suave, no afectando sensiblemente a los cimientos.

Hay, efectivamente, algún forcejeo entre las aguas del río que bajan y las de la marea que suben.

---

(1) En la *Revista de O. P.* de 15 de agosto 1926, se dan detalles del tramo levadizo de la corta de Tablada, y en el Capítulo XVIII describiremos el de San Telmo.

Pero si no dejamos al puente más desagüe que el necesario para las mayores crecidas del río, *cuyo nivel nunca podrá superar sensiblemente el de las pleamares máximas*, no habrá necesidad de preocuparse de éstas.

Enormes extensiones de marismas, inundadas por las mareas durante miles de siglos, y que son hoy hermosos terrenos de labor, como ocurre en Holanda, se han ganado al mar mediante malecones de tierra, apenas defendidos por ligeros encachados, que han bastado para impedir la invasión de las mareas.

¿Por qué no han de obtenerse análogas resistencias con malecones transversales, en aquellas rías en que las aguas del mar no sufren los efectos de resaca?

Así hemos discurrido al atravesar, con el trozo 3.º del ferrocarril de Tánger a Fez, las extensas marismas de varios kilómetros de extensión que existen en las desembocaduras de los ríos Mahrar, Haxef y Garifa.

Sólo les hemos dejado los desagües necesarios para los ríos, salvando el resto de las marismas con terraplenes defendidos en algunas zonas, y hasta el nivel de pleamares, con encachados y pequeños bloques de hormigón. Llevan tres años de existencia sin asomo de rotura, a pesar de excepcionales crecidas y temporales de mar.

Así lo propusimos también, en nuestros juveniles años, para el puente de Ribadesella (Asturias), sobre el río Sella, en las proximidades de su desembocadura en el mar. Habíamos proyectado un puente de 100 metros y 200 metros de pedraplén de acceso, que resultaba bastante más barato que el puente de 300 metros, que era la longitud del puente de madera que se trataba de substituir.

La Superioridad no compartió nuestra opinión y se ha construido hace treinta años el puente, también por el autor proyectado, con 300 metros de longitud, con arreglo al tipo sobre pilotes metálicos que describimos en el tomo II, pág. 264 (1).

**Otros factores del desagüe.** — Algunos Ingenieros calculan los desagües comparando las superficies de las cuencas de sus ríos y las pendientes de sus vaguadas (2).

(1) Seguimos, sin embargo, creyendo que allí sobra mucho puente, y, como es metálico y está al borde del mar, ocasiona muy costosa conservación.

(2) En el tomo I, página 243, reseñamos las fórmulas de Lanusse para el desagüe en las pequeñas obras.

Pero los caudales de lluvia caídos en una cuenca, por efecto de la topografía y permeabilidad del suelo, de sus bosques y cultivos, y hasta de su temperatura, sufren tan diferentes resistencias y absorciones, antes de alcanzar el cauce de los ríos, que no parece práctico fiarse de tan inseguras comparaciones.

En cambio, cuando existen puentes inmediatos en el mismo río, es muy conveniente estudiar en ellos el régimen de las grandes crecidas, para mejorar el desagüe de la obra nueva, si en la antigua se advirtieran defectos.

**Conclusiones.** — Las consideraciones generales que acabamos de exponer confirman lo que dijimos al principio de este capítulo sobre la escasa confianza que pueden ofrecer las fórmulas de la Hidráulica, sólo aplicables en ríos muy encauzados, pues todas ellas pierden su exactitud en las crecidas extraordinarias e inundaciones, cuyo régimen está sometido a fluctuaciones enormes, por no reproducirse exactamente las circunstancias que las determinan.

¿Quién elige entre las diferentes fórmulas empíricas y coeficientes que se disputan la preferencia de los técnicos, aquéllas que sean más aplicables a cada ubicación?

Ante tamañas discrepancias de criterio y la inexactitud de las hipótesis admitidas, considera el autor preferible confiarse al ojo clínico del Ingeniero, adquirido por la observación de los puentes inmediatos, si los hubiere, o por experiencia propia, aplicada a cada emplazamiento.

Al estudiar éste simultáneamente: con los niveles y efectos de las crecidas, con el procedimiento de cimentación más adecuado para el lecho del río y el destino de la obra que se proyecta, se establece en un espíritu reflexivo la resultante de todos estos factores, que conduce a la fijación del desagüe que la obra ha de necesitar.

Así hemos procedido siempre, si bien con tendencia a pecar por exceso de luz. Con esta amplitud de miras, reducimos en lo posible las perturbaciones del régimen del río, provocadoras de socavaciones, lo que permite a su vez cimentar a menos profundidad, reduciendo el gasto elevado en esta parte de la obra.

Pasemos a estudiar las *rasantes* que han de darse al puerto.