

basando un límite de antemano fijado para ella ofreciera también, por lo menos, la resistencia deseada. Podría igualmente fundarse la elección y el procedimiento, a la vez, en la impermeabilidad, compacidad y resistencia del hormigón, y eso será, sin duda, lo más conveniente en obras marítimas cuando se disponga de tiempo suficiente para los ensayos y su importancia lo justifique.

Es indudable que, a más de las condiciones de carácter técnico, han de tenerse en cuenta para la elección de materiales y proporciones del hormigón, otras de orden práctico, y muy principalmente las económicas a que ya se han hecho algunas referencias. A ellas habrá necesidad frecuentemente de sacrificar algo la compacidad, sobre todo cuando la resistencia, muy sensible a ella, lo consienta, y aun, en la medida de lo posible, esa misma resistencia, siempre que no haya de padecer la seguridad ni pueda incurrirse en peligros de descomposición.

Inútil parece manifestar que, determinados los materiales y proporciones de las mezclas a emplear por los medios y consideraciones expuestos u otros adecuados, convendrá sean aquéllas, en definitiva, objeto de un ensayo final de comprobación.

Procedimiento casi igual al que acaba de reseñarse para el hormigón podrá ser aplicado al mortero a emplear en mampostorías y enlucidos, aun cuando para lograr la compacidad máxima las cantidades de aglomerantes necesarias, referidas al volumen unitario de arena, serán generalmente más reducidas que en aquél.

La práctica de los ensayos requerirá un laboratorio con los elementos indispensables, y entre ellos, a ser posible, una prensa de suficiente potencia para los de rotura por compresión, a menos que se remitan las probetas a otros laboratorios que dispongan de ella y se presten a verificar oportunamente la rotura. En toda gran obra la existencia de un laboratorio debe considerarse hoy de todo punto indispensable y nada puede justificar su omisión, sobre todo en los casos de corporaciones que, como las Juntas de obras de puertos, disponen generalmente de los recursos necesarios, tienen concentrados los trabajos y en las que suele ser vital para la duración de sus importantes obras que morteros y hormigones no sean una mera concepción de gabinete, sin engrane acaso con la realidad, sino el resultado de pruebas hechas teniendo en cuenta, ante todo, los fines perseguidos y esa misma realidad como base, medio probablemente único

de evitar decepciones, a veces dolorosas y casi siempre muy caras en definitiva.

Por todo lo dicho se verá que el método aquí aconsejado para fijar las proporciones de los hormigones difiere bastante de lo que ha venido preconizándose y practicándose.

Durante mucho tiempo la dosificación se hacía casi a sentimiento, empleando cantidades de aglomerante, mayores o menores, según su clase y el destino de las fábricas, sin tener en cuenta la composición granulométrica de la arena, siendo corriente que el volumen del mortero no excediese de la mitad del aparente de la piedra, cualquiera que fuese en ésta la proporción de huecos.

La introducción del Portland dió lugar a tomar como guía, de un modo hartamente preponderante, la resistencia a la tracción de los morteros, si bien los constructores no tardaron en percatarse de que las mezclas de tal suerte formadas, que frecuentemente requieren cantidades exiguas de aquel cemento, resultaban a veces muy permeables y expuestas en el mar a descomposiciones rápidas.

Eso condujo a elevar la proporción de cemento, considerándose que no debería bajar nunca de 450 a 500 kilogramos de Portland por metro cúbico de arena en las partes sumergidas; pero resultando insuficientes aun estas dosis para oponerse al ataque químico, se ha llegado a las de más de 1 000 kilogramos, con las que se obtiene, a mucha costa por cierto, una gran impermeabilidad que no basta, sin embargo, para obtener seguridad completa contra el riesgo de descomposición, pues en la práctica es muy difícil impedir toda infiltración de agua en la masa.

Asociando el empleo de productos hidráulicos generalmente inmunes al ataque químico, como son las mezclas puzolánicas y los cementos del tipo Zumaya, a dosificaciones que proporcionen compacidad e impermeabilidad muy elevadas, se obtendrá una mejora considerable en los morteros y hormigones, que podrán ser muy duraderos, contrarrestando con éxito de tal suerte las causas que de otro modo conducen a su deterioro.

El método de dosificación de las mezclas antes preconizado es aplicable y recomendable, no sólo para las destinadas a las construcciones marítimas, sino también para todas en general y muy particularmente para las que hayan de emplearse en las sometidas a la acción del agua, como presas, depósitos, acueductos, esclusas, etc.

"José" NICOLÁU
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Cálculo económico de las grandes líneas de transporte de energía eléctrica

Determinación del voltaje y de la sección de los conductores más convenientes económicamente

I.—Deducción de las fórmulas fundamentales

Significación de los diversos símbolos empleados:

A = gastos totales anuales de la transmisión, en pesetas.
a = constante = pesetas por km de línea y kilovoltio.

b = constante = pesetas por km de línea y mm² de sección conductora de los conductores.
c = constante = pesetas por subestación de transformación y kilovoltio, descontados los transformadores.
d = constante = pesetas por subestación de

- transformación y kilovoltio², descontados los transformadores.
- E = tensión compuesta, entre conductores, en kilovoltios, en el origen de la línea.
- E_l = tensión compuesta, entre conductores, en kilovoltios, en la llegada de la línea.
- H = número de horas de servicio de la línea, al año.
- h = número de horas de pérdida equivalente por efecto Joule, al año.
- I = intensidad, en amperios, correspondiente a la potencia máxima transmitida.
- i = densidad de corriente, en amperios por mm² de sección conductora, correspondiente a la potencia máxima transmitida.
- K = kilovatios-hora de pérdida en la transmisión, al año.
- k = precio del kilovatio-hora, en ptas. por kWh.
- K_l = constante = pesetas por km de línea.
- K_{ST} = constante = pesetas por subestación de transformación, descontados los transformadores.
- K_{TK} = constante = pesetas por transformador.
- L = longitud de la línea, en km.
- m = constante = pesetas por transformador y kilovoltio².
- N = potencia máxima transmitida, a la llegada de la línea, en kilovatios.
- N_a = potencia aparente máxima transmitida, a la llegada de la línea, en kilovoltios-amperios.
- P = coste total de instalación de la línea y las dos subestaciones de transformación de los extremos, en pesetas.
- $100 p$ = coeficiente de interés, más amortización, en %.
- r = resistencia óhmica específica de los conductores, en ohmios por km y mm² de sección conductora.
- S = sección de los conductores, en mm², tan sólo del material propiamente conductor.
- T = kilovatios-hora perdidos al año en los transformadores.
- $u = \frac{kH}{pW}$
- $v = \frac{E_s}{E}$
- W = resistencia de aislamiento de un conductor, en kiloohmios por km.
- $\cos \varphi$ = factor de potencia de la carga, en la llegada.

Para simplificar la exposición que sigue no se repetirán, en general, las definiciones de los diferentes símbolos a medida que vayan apareciendo en las fórmulas. Estas definiciones, precisas, pueden tomarse, en cada caso, del índice que se acaba de dar.

* * *

Supondremos dos casos distintos de líneas: 1), línea simple trifásica; 2), línea doble trifásica.

El estudio de las líneas simples trifásicas se hará en la hipótesis de que éstas constan de los siguientes elementos típicos:

a) Una subestación de transformación, al aire libre, en el origen, con dos transformadores trifásicos, cada uno de la mitad de la potencia total transmitida; tres interruptores automáticos en aceite en la alta

tensión (uno de línea y uno para cada transformador); un pararrayos; un sistema de barras ómnibus de alta tensión, y material vario (desconectores, aisladores, etc.).

b) Una línea sencilla trifásica, con conductores de cobre o de aluminio con alma de acero, soportados, mediante cadenas de aisladores de suspensión, de estructuras metálicas, llevando éstas también uno o dos cables de tierra.

c) Una subestación de transformación, al aire libre, en la llegada, con el mismo material y disposición que la subestación del origen.

Análogamente, las líneas dobles trifásicas se estudiarán suponiéndolas compuestas típicamente de los elementos siguientes:

a) Una subestación de transformación, al aire libre, en el origen, con tres transformadores trifásicos, cada uno del tercio de la potencia total transmitida; cinco interruptores automáticos en aceite en la alta tensión (uno en cada línea y uno para cada transformador); dos pararrayos; un sistema de barras ómnibus de alta tensión, y material vario (desconectores, aisladores, etc.).

b) Una línea doble trifásica, con conductores de cobre o de aluminio con alma de acero, soportados, mediante cadenas de aisladores de suspensión, de estructuras metálicas, llevando éstas también uno o dos cables de tierra.

c) Una subestación de transformación al aire libre, en la llegada, con el mismo material y disposición que la subestación del origen.

Tanto en el caso de la línea simple como en el de la línea doble no se considerará como formando parte de la transmisión el material de la baja tensión en las subestaciones de ambos extremos.

* * *

El cálculo económico se presenta, al hacer el estudio eléctrico de una línea de transporte o de interconexión, cuando se trata de determinar qué tensión, en kilovoltios, debe emplearse entre conductores, y qué sección conductora, en mm², han de tener éstos. Ambas cosas pueden fijarse con suficiente precisión por consideraciones económicas.

La línea de transmisión más económica será aquella para la cual los gastos totales anuales, A ptas, resulten mínimos; entendiéndose por línea de transmisión la línea propiamente dicha, con su aislamiento, estructuras y cables de tierra, y las subestaciones de transformación de los extremos. Los gastos totales anuales, a su vez, se componen de dos partes diferentes: a), el interés y amortización del capital empleado en la transmisión; b), valor de los kWh perdidos al año en la misma. El primer sumando tiene la expresión algébrica pP , y el segundo la expresión kK . Por tanto, se trata de buscar el mínimo de la suma, en pesetas:

$$A = pP + kK$$

Veamos, sucesivamente, cuál es la composición de P , coste total de instalación, en pesetas, y de K , kilovatios-hora perdidos al año.

Coste total de instalación

Se compone del coste de la línea propiamente dicha, del coste de las dos subestaciones transforma-

doras, excluidos los transformadores, y del coste de los transformadores.

Coste de la línea propiamente dicha: puede expresarse en la forma siguiente:

$$L(K_L + aE + bS) \quad \text{pesetas.}$$

El paréntesis representa el coste por km de línea, y se compone de tres términos. El primero es una constante, pesetas por km, y corresponde a aquella parte del coste por km, que es prácticamente constante e independiente de la tensión y de la sección de los conductores (una parte del coste de las estructuras y de sus cimentaciones y expropiaciones, y el cable o los cables de tierra). El segundo término, aE , pesetas por km, corresponde a aquella parte del coste por km que es proporcional al voltaje (una parte del coste de las estructuras y de sus cimentaciones y expropiaciones, y el aislamiento, con cadenas de aisladores del tipo de suspensión). El tercer término, bS , pesetas por km, corresponde, por último, a la parte del coste por km que es proporcional a la sección conductora de los conductores (una parte del coste de las estructuras y de sus cimentaciones y expropiaciones, y los conductores que forman la línea trifásica, simple o doble).

Coste de las dos subestaciones transformadoras, excluidos los transformadores: puede dársele la siguiente expresión:

$$2(K_{ST} + cE + dE^2 + f(N_a)) \quad \text{pesetas.}$$

El paréntesis representa el coste de una subestación, componiéndose de cuatro términos. El primero es una constante, pesetas por subestación, y corresponde a aquella parte del coste que es prácticamente constante, independiente de la tensión y de la potencia (una parte del coste del terreno, de las cimentaciones y de la armazón metálica). El segundo término, cE , pesetas por subestación, corresponde a la parte del coste que es proporcional al voltaje (una parte del coste del terreno, de las cimentaciones y de la armazón metálica, el coste del aislamiento, y una parte del coste de los interruptores en aceite, de los pararrayos y del material de instalación). El tercer término, dE^2 , pesetas por subestación, corresponde a aquella parte del coste que es proporcional al cuadrado del voltaje (una parte del coste de los interruptores en aceite y de los pararrayos). El cuarto término, $f(N_a)$, pesetas por subestación, se refiere, por último, a la parte del coste de una subestación que es función de la potencia aparente N_a (una parte del coste de las cimentaciones y armazón metálica; una parte del coste de los interruptores en aceite, de los pararrayos y del material de instalación).

Coste de los transformadores: tiene la expresión siguiente:

$$4(K_{TR} + mE^2 + f_1(N_a)) \quad \text{pesetas} \quad \text{para la línea simple.}$$

$$6(K_{TR} + mE^2 + f_1(N_a)) \quad \text{pesetas} \quad \text{para la línea doble.}$$

El paréntesis da el coste de un transformador, y se compone de tres términos. El primero, una constante, pesetas por transformador, corresponde a la parte de coste que es constante, independiente de la tensión y de la potencia. El segundo término, mE^2 , pesetas por transformador, se refiere a la parte del coste que resulta ser proporcional al cuadrado del voltaje. El

tercer término, por último, $f_1(N_a)$, pesetas por transformador, corresponde a aquella parte restante del coste que es función de la potencia aparente, N_a . Obsérvese que el coste de los transformadores no comprende, en general, una parte que sea simplemente proporcional al voltaje.

Sumando las tres expresiones dadas, se llega, en definitiva, al siguiente coste total de instalación:

Para las líneas sencillas:

$$P = L(K_L + aE + bS) + 2(K_{ST} + cE + dE^2 + f(N_a)) + 4(K_{TR} + mE^2 + f_1(N_a)) \quad \text{pesetas.}$$

Para las líneas dobles:

$$P = L(K_L + aE + bS) + 2(K_{ST} + cE + dE^2 + f(N_a)) + 6(K_{TR} + mE^2 + f_1(N_a)) \quad \text{pesetas.}$$

Kilovatios-hora perdidos al año

Se componen de los kWh perdidos en la línea y los kWh perdidos en los transformadores. Estos últimos, T , son prácticamente independientes de la sección S de los conductores y de la tensión E escogida, dependiendo sólo de la potencia y de su variación en las H horas de servicio anuales. Intervenirán, pues, como constantes en los presentes cálculos. En cuanto a la energía perdida en la línea, consta de dos partes: la energía perdida por efecto Joule en los conductores, y la pérdida por efecto Joule en el aislamiento.

kWh perdidos en los conductores: tienen la expresión siguiente, de un modo aproximado:

Para las líneas sencillas:

$$3r \frac{L}{S} I^2 h \frac{1}{1000} \quad \text{kWh.}$$

Para las líneas dobles:

$$6r \frac{L}{S} I^2 h \frac{1}{1000} \quad \text{kWh.}$$

I es la intensidad en cada conductor que corresponde a la potencia máxima N , suponiendo, en una primera aproximación, que esa intensidad es constante en todos los puntos de la línea. Las horas h , que llamaremos «horas de pérdida equivalente, al año», son un número de horas tal que supuesta la potencia máxima N transmitida de un modo constante durante esas h horas se obtendría la misma pérdida de energía en los conductores por efecto Joule que al transmitir durante las H horas de servicio anuales la potencia real, variable de un momento a otro, y teniendo como valor máximo N .

El valor de I es:

Para las líneas sencillas:

$$I = \frac{N_a}{\sqrt{3E_l}} \quad \text{amperios.}$$

Para las líneas dobles:

$$I = \frac{N_a}{2\sqrt{3E_l}} \quad \text{amperios.}$$

Sustituyendo en la expresión anterior de los kWh perdidos al año, se encuentra para éstos:

En las líneas simples:

$$\frac{N_a^2}{E_l^2} r \frac{L}{S} h \frac{1}{1000} \quad \text{kWh.}$$

En las líneas dobles:

$$\frac{N_a^2}{2E_l^2} r \frac{L}{S} h \frac{1}{1000} \quad \text{kWh.}$$

kWh perdidos en el aislamiento: tienen la expresión siguiente, aproximada:

En las líneas simples:

$$\frac{E^2 L}{W} H \quad \text{kWh.}$$

En las líneas dobles:

$$\frac{2E^2 L}{W} H \quad \text{kWh.}$$

Estos valores son ligeramente por exceso, pues se supone la tensión E en toda la línea, cuando en realidad varía entre E y E_l . No tiene objeto el hacer intervenir esta variación en una expresión que, en su conjunto, tiene un valor muy pequeño, dada la importancia de la resistencia de aislamiento W .

Sumando las fórmulas halladas, y haciendo $E_l = vE$, se llega en definitiva al siguiente número de kilovatios hora perdidos al año:

Líneas sencillas:

$$K = \frac{N_a^2}{v^2 E^2} r \frac{L}{S} h \frac{1}{1000} + \frac{E^2 L}{W} H + T \quad \text{kWh.}$$

Líneas dobles:

$$K = \frac{N_a^2}{2v^2 E^2} r \frac{L}{S} h \frac{1}{1000} + \frac{2E^2 L}{W} H + T \quad \text{kWh.}$$

Sustituyendo los valores de P y de K en A , se obtiene ya, analizado, el gasto total anual, en pesetas:

$$A = pP + kK$$

siendo $100 p$ el % anual de interés y amortización del capital empleado y k el precio en pesetas del kWh.

Este gasto anual, A , ha de ser un *mínimo*, y, por tanto, como las variables independientes son S y E , debe verificarse que

$$\frac{\partial A}{\partial S} = 0 \quad \frac{\partial A}{\partial E} = 0$$

La primera de estas dos ecuaciones, la derivada parcial de A con respecto a S igual a cero, da, una vez resuelta:

Para las líneas sencillas:

$$S = \frac{N_a}{vE} \sqrt{\frac{krh}{1000pb}} \quad \text{mm}^2$$

Para las líneas dobles:

$$S = \frac{N_a}{vE} \sqrt{\frac{krh}{2000pb}} \quad \text{mm}^2$$

A estas igualdades puede dárseles otra forma más conveniente, deduciendo de ellas el valor de la densidad de corriente i , amperios por mm^2 , para la potencia máxima $N = N_a \cos \varphi$, kilovatios. En efecto, en las líneas sencillas:

$$i = \frac{I}{S} = \frac{N_a}{\sqrt{3vE}} \times \frac{1}{S}$$

en las líneas dobles:

$$i = \frac{I}{S} = \frac{N_a}{2\sqrt{3vE}} \times \frac{1}{S}$$

Poniendo los valores de S hallados y efectuando operaciones, se llega al siguiente resultado:

Líneas sencillas:

$$i = \sqrt{\frac{1000pb}{3krh}} \quad \text{amp/mm}^2 \quad [1]$$

Líneas dobles:

$$i = \sqrt{\frac{1000pb}{6krh}} \quad \text{amp/mm}^2 \quad [2]$$

«La densidad de corriente más económica, en amp/mm^2 de sección conductora, es función de p , b , k , r y h , pero es independiente de la tensión E , de la longitud L y de la potencia N .» (Regla de lord Kelvin.)

Si en la segunda de las ecuaciones, $\frac{\partial A}{\partial E} = 0$, se pone, en vez de S , su valor, deducido anteriormente de la primera ecuación, y se simplifica, se obtiene la siguiente ecuación de tercer grado para determinar E :

Líneas sencillas:

$$E^3 + E^2 \frac{\frac{a}{2}L + C}{uL + 2d + 4m} = \frac{N_a L}{v(uL + 2d + 4m)} \sqrt{\frac{krhb}{1000p}} \quad [3]$$

Líneas dobles:

$$E^3 + E^2 \frac{\frac{a}{2}L + C}{2uL + 2d + 6m} = \frac{N_a L}{v(2uL + 2d + 6m)} \sqrt{\frac{krhb}{2000p}} \quad [4]$$

haciendo

$$u = \frac{kH}{pW}$$

«La tensión más económica en el origen entre conductores, en kilovoltios, viene dada por una ecuación de tercer grado (con una raíz real y dos raíces imaginarias), cuyos coeficientes son funciones de a , b , c , d , u , m , k , r , h , p , de la longitud L y de la potencia aparente máxima N_a .»

Las dos importantes fórmulas [1] y [3] resuelven

completamente el problema estudiado en el caso de líneas sencillas, así como, análogamente, las fórmulas [2] y [4] dan la solución para las líneas dobles. Con las [1] o [2] se encuentra la densidad de corriente i amp/mm², más conveniente económicamente en todos los casos. Con las [3] o [4], se encuentra la tensión en el origen en kilovoltios, entre conductores, E , más conveniente económicamente para cada línea, conocida su longitud, L km, y la potencia aparente máxima que ha de transportar, $N_a = \frac{N}{\cos \varphi}$. Calculada la tensión E , se tiene la tensión en la llegada

$$E_l = vE$$

y la intensidad I , dada por las igualdades:

Líneas sencillas:

$$I = \frac{N_a}{\sqrt{3}E_l} \quad \text{amp.}$$

Líneas dobles:

$$I = \frac{N_a}{2\sqrt{3}E_l} \quad \text{amp.}$$

La sección conductora de los conductores resulta ser, por último:

$$S = \frac{I}{i} \quad \text{mm}^2$$

NOTA.—El método de cálculo seguido es en esencia el mismo indicado en 1926 por el electrotécnico alemán Burger, aunque la exposición ha sido aquí hecha con más detalle y mayor precisión. Los valores numéricos para las constantes, que daremos en un artículo siguiente, han sido estudiados con especial cuidado, según las condiciones actuales en España, y no coinciden con los que parece haber tomado Burger, a juzgar por los resultados finales numéricos a que llega. (Véase: *Höchstspannungs Tagung*, Essen, 1926. Oberingenieur Burger: Leistungsübertragung und Spannungsregulierung in Höchstspannungsnetzen.)

Pedro JOSÉ LUCIA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Puente sobre el río Tajo en Alconétar

El día 22 de octubre último se abrió al tránsito público el puente sobre el Tajo, en la carretera de segundo orden de Salamanca a Cáceres y sitio denominado «Barcas de Alconétar».

Consta de doce arcos de medio punto (figura 1.^a)

comprendido entre la confluencia con el río Almonte y la desembocadura de la ribera Araya, y salva la solución de continuidad que ofrecía en este punto la carretera.

El lecho del río está formado por una capa de

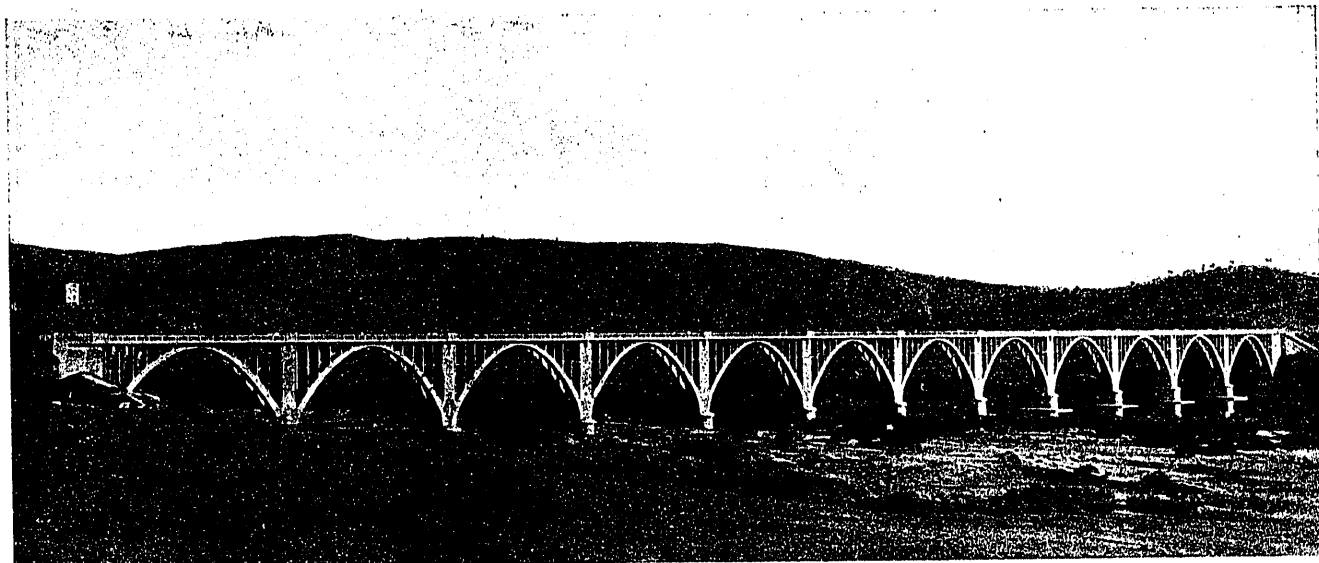


Fig. 1.^a Vista general del puente.

de los modelos oficiales de puentes en arco de hormigón armado para carreteras, con una luz real de 27,20 metros cada uno y once apoyos intermedios de 2,85 m de espesor en la coronación, que originan un desagüe lineal, entre paramentos de estribos, de 358,15 m y uno efectivo de 326,40 m al nivel de arranques. Como este último nivel queda a 2,23 m por bajo del de avenidas ordinarias, se reduce el desagüe libre, a la cota de aquéllas, hasta 322 m, y algo más en las crecidas extraordinarias.

El puente se halla situado en el tramo del río

arena y canto rodado que descansa sobre otra de pizarra azul y de superficie sensiblemente horizontal en la mayor extensión del cauce. Dicha capa de pizarra está al descubierto en el sitio donde el agua alcanza mayor profundidad, lo cual tiene lugar a poca distancia de la margen izquierda, pues es donde se acentúan las socavaciones, por la concavidad que presenta aquélla. Se eleva rápidamente hacia dicha margen para formar el escarpe que sirve de apoyo al estribo y descende, con ligera pendiente, hacia la margen derecha, con excepción del sitio donde va