

14 para el cemento Portland del comercio, de segunda calidad; 45 para mezclas en la proporción de 60 kg de puzolana por 100 de un Portland poco aluminoso; 31 para mezclas de 50 kg de *gaize* cocida por 100 de Portland francés, calidad llamada administrativa, y, finalmente, 33 para cemento de escorias ordinario.

En Ymuiden se ensayaron bloques de hormigón, atravesados por una armadura, con las tres proporciones siguientes, expresadas en volumen: 1,5, 2 y 2 de Portland por 0,5, 1 y 2 de tras por 3 de arena y por 5, 6 y 7 de piedra, respectivamente. Después de diez años de exposición al agua del mar dieron buenos resultados los ensayos de adherencia y, aparte de eso, se comprobó que era excelente el estado del hormigón, que su superficie no presentaba indicios de óxido, que las barras se hallaban en buen estado y, por último, que no pudo descubrirse ninguna acción perjudicial causada por el tras.

Otros experimentos hechos han dado generalmente resultados favorables a las mezclas puzolánicas. Lo positivo es que su adhesión a las armaduras es mayor que en las mezclas de cemento solo.

Por otra parte, el empleo de éstas en el hormigón armado, sin ser aún de uso general, como no lo es tampoco en el macizo, ha recibido ya numerosas aplicaciones en varios países, especialmente en Italia, Japón, Alemania y Holanda, y recientemente han entrado por la misma vía los Estados Unidos de América. Ingenieros de experiencia y autoridad reconocida lo recomiendan, y algunos, como Foerster, que goza en Alemania de autoridad en la materia, afirman que no se puede negar la conveniencia de las adiciones de tras en cantidad de 20 a 30 kg por cada 100 de Portland, aun en las obras ordinarias de hormigón armado no expuestas a los efectos de las influencias marítimas, porque la experimentación y la práctica demuestran que con ello se aumenta la resistencia y se hace más plástico y compacto el hormigón. Otros varios ingenieros alemanes y el Ministerio de la Guerra prusiano participan de la misma opinión, si bien algún técnico alemán no la

comparte aún, alegando la falta de experimentos suficientes.

Para las estructuras marítimas de hormigón armado preconiza Foerster la adición de 40 kg de tras a cada 100 de Portland, proporción que aconsejan igualmente varios autores.

Otros ingenieros de autoridad, como Luiggi, preconizan también el empleo de la puzolana en el hormigón armado, y realmente no puede negarse hoy que ese material, a más de alejar el peligro de descomposiciones en el mar, aumenta la impermeabilidad, plasticidad y elasticidad de la masa y la adherencia al acero, cualidades todas verdaderamente apreciables al tratarse de los hormigones armados.

Por lo demás, los resultados mismos de las construcciones marítimas hechas con ese material, datando algunas de 1909, atestiguan con elocuencia que no existen los inconvenientes supuestos y que, por el contrario, de las puzolanas buenas, debidamente empleadas, sólo ventajas cabe prometerse.

El espesor de la capa de hormigón sobre las armaduras, demasiado exiguo, sin duda, en los primeros tiempos, no suele en la actualidad ser menor de 5 cm, y aun se preconiza el de 7,5 para las partes que hayan de estar en la zona en que fluctúen las aguas, llegando el Pliego norteamericano a prescribir un mínimo de 7,5 cm, en general, y de 10 cm en los ángulos. Este aumento de espesor contribuirá a reducir el peligro de que el metal sea atacado, pero puede también ofrecer el inconveniente de tener que aumentar la sección total de las piezas o de las armaduras por efecto de la menor eficacia para la resistencia, debida a la situación de las últimas al quedar más alejadas de la superficie. En los pilotes y apoyos ello habrá de conducir a replegar aquéllas hacia el centro, siendo de aconsejar en tal caso limitarlas en lo posible en la parte superior al nivel del agua y reducir el espesor del hormigón en la que haya de quedar constantemente sumergida. Por todo ello parece convendrá que el límite mínimo del recubrimiento difiera poco de 5 cm, siempre que se empleen los aglomerantes puzolánicos.

José NICOLÁU

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos¹

Cálculo económico de las grandes líneas de transporte de energía eléctrica¹

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

II.—Aplicación de las fórmulas fundamentales

Es preciso, primeramente, para aplicar las fórmulas halladas, dar valores numéricos a todas las constantes que en ellas intervienen:

a , pesetas por km de línea y kilovoltio.

Esta constante se puede descomponer en la suma de otras dos, a' y a'' , correspondiendo la primera al coste de los aisladores y la segunda a la parte del coste de las estructuras, que es proporcional al voltaje.

Suponiendo una distancia media entre estructuras

de 175 m, con los precios actuales de los aisladores de suspensión, y teniendo en cuenta la mayor altura de las estructuras y distancia entre conductores al aumentar el voltaje, con el consiguiente aumento de peso y de cimentaciones, hemos calculado la constante a con los valores siguientes:

Líneas sencillas:

$$a = a' + a'' = 24,5 + 11,5 = 36 \text{ ptas. por km y kilovoltio.}$$

Líneas dobles:

$$a = a' + a'' = 49,0 + 16,0 = 65 \text{ ptas. por km y kilovoltio.}$$

¹ Véase el número anterior, página 135.

b , pesetas por km de línea y mm^2 de sección conductora S de los conductores.

Esta constante puede descomponerse, asimismo, en otras dos, b' y b'' , de las que la primera se debe a los conductores mismos y la segunda a las estructuras.

Con los precios actuales de los cables de cobre y de aluminio reforzado, incluido su montaje, teniendo presente el número de conductores y la influencia de su sección en el peso y cimentaciones de las estructuras, se encuentran los valores dados a continuación:

Líneas sencillas:

Cobre	$b = b' + b'' = 3 \times 28 + 36 = 120$ pesetas por km y mm^2 .
Aluminio reforzado.	$b = b' + b'' = 3 \times 15 + 30 = 75$ pesetas por km y mm^2 .

Líneas dobles:

Cobre	$b = b' + b'' = 6 \times 28 + 62 = 230$ pesetas por km y mm^2 .
Aluminio reforzado.	$b = b' + b'' = 6 \times 15 + 52 = 142$ pesetas por km y mm^2 .

c , pesetas por subestación de transformación y kilovoltio, descontados los transformadores.

Las subestaciones de transformación consideradas constan, para las líneas sencillas, aparte de los transformadores, de tres interruptores automáticos en aceite, un pararrayos, un sistema de barras ómnibus y material vario, todo ello para instalación a la intemperie. Para las líneas dobles, la composición se ha supuesto análoga, pero con cinco interruptores y dos pararrayos.

La constante c se descompone en otras tres: una procedente de los interruptores; otra, de los pararrayos, y otra, del resto del material. Habiendo determinado, para diversas potencias (capacidades de ruptura) y altas tensiones, los precios de los interruptores, pararrayos y material de instalación, se ha podido comprobar que estos precios son, aproximadamente, funciones cuadráticas las dos primeras y lineal la tercera de las tensiones, hallándose, como promedio, los siguientes valores para los coeficientes de los términos de primer grado:

c' = 38	pesetas por interruptor y kilovoltio.
c'' = 136	» pararrayos y »
c''' = 200	» subestación y »

Resulta, pues, para valor de la constante c :

En las líneas sencillas:

$$c = 3c' + c'' + c''' = 450 \text{ pesetas por subestación y kilovoltio.}$$

En las líneas dobles:

$$c = 5c' + 2c'' + c''' = 662 \text{ pesetas por subestación y kilovoltio.}$$

d , pesetas por subestación de transformación y kilovoltio², descontados los transformadores.

Los coeficientes de los términos de segundo grado, en las funciones que dan los precios de los interruptores, pararrayos y material de instalación, al variar las tensiones son, como promedio:

d' = 4	pesetas por interruptor y kilovolt ² .	
d'' = 1,80	» pararrayos »	(función solo
d''' = 0,00	» subestación »	lineal).

La constante d resulta, por tanto, con el valor siguiente:

En las líneas sencillas:

$$d = 3d' + d'' + d''' = 13,80 \text{ pesetas por subestación y kilovoltio}^2.$$

En las líneas dobles:

$$d = 5d' + 2d'' + d''' = 23,60 \text{ pesetas por subestación y kilovoltio}^2.$$

m , pesetas por transformador y kilovoltio².

Estudiados los precios de transformadores trifásicos de gran potencia y altas tensiones, en función de las tensiones, se ha encontrado que la ley de variación es parabólica, sin ningún término en primer grado, siendo el coeficiente del término cuadrático, aproximadamente:

$$m = 5,5 \text{ pesetas por transformador y kilovoltio}^2.$$

r , ohmios por km y mm^2 de sección conductora.

La resistencia óhmica específica de los cables de cobre, a 25° C, es

$$r = 18,5 \text{ ohmios por km y } \text{mm}^2.$$

En los cables de aluminio reforzado, la resistencia óhmica específica, a 25° C, considerando como conductora propiamente dicha tan sólo la sección de aluminio, puede tomarse

$$r = 29,4 \text{ ohmios por km y } \text{mm}^2.$$

H , horas de servicio de la línea al año.

Puede ser muy variable este dato, de unas líneas a otras. En todo caso, y para tener una base, supondremos que se trata de aplicar las fórmulas halladas, con valores numéricos, a líneas que prestan servicio durante, aproximadamente,

$$H = 6\,000 \text{ horas anuales.}$$

Si el valor de H , en la línea cuyo cálculo económico se desea hacer, fuera distinto de éste, habría de ponerse el número correspondiente, en vez de 6 000, en el símbolo H de las fórmulas algébricas generales, [3] y [4].

h , horas de pérdida equivalente al año.

Suponiendo, durante las H horas de servicio anuales, una curva de consumo de forma análoga a la que existe ordinariamente para los grandes consumos de luz y fuerza, siendo el máximo de esa curva la potencia máxima a la llegada de la línea, N , resulta, de un modo aproximado, hecha la integración:

$$h = 0,50H.$$

En consecuencia, conocido H , queda determinado h y puede ponerse su valor numérico en las fórmulas generales [1], [2], [3] y [4].

Si se hace la hipótesis, como anteriormente, de que $H = 6\,000$, resulta

$$h = 3\,000 \text{ horas anuales}$$

W , kiloohmios de resistencia de aislamiento por kilómetro de conductor.

Admitiendo hasta una pérdida de 0,001 amp por km a 100 000 voltios, se obtiene:

$$W = 58\,000 \text{ kilohmios por km.}$$

$100p$, coeficiente de interés más amortización, en %.

Con los valores actuales del interés al capital, y agregando lo necesario para la amortización de las instalaciones en un plazo prudencial, puede estimarse, en números redondos,

$$100p = 10\%$$

k , pesetas de precio del kWh.

En estos cálculos parece lógico poner para precio del kWh de pérdidas el precio de coste, lo que cuesta el producirlo en el origen de la línea de que se trate. Por término medio puede suponerse en España, en esas condiciones:

$$k = 0,04 \text{ pesetas el kWh.}$$

$v = \frac{E_1}{E}$. Puede suponerse, por término medio y en primera aproximación, aunque variable en las diversas líneas,

$$v = \frac{E_1}{E} = 0,875$$

Las fórmulas [1], [2], [3] y [4], antes deducidas, son completamente generales, aplicables, por tanto, a cualquier caso que pueda presentarse, si las subestaciones de transformación tienen la disposición su-puesta. Si el cálculo económico de una línea se desea hacer con todo rigor, habrán de ponerse como valores de las constantes los deducidos, numéricamente, para el caso especial de que se trate. A falta de datos más precisos, pueden aceptarse, en todos los casos, para las constantes a , b , c , d , m , r y W los valores numéricos antes calculados. En cuanto a las restantes constantes, H , h , $100p$, k y v , pueden variar algo sus valores de una línea a otra, según las condiciones especiales de cada transporte de energía, siendo necesario, si se desea alguna precisión en el cálculo, determinar su cuantía en cada caso concreto. Ahora bien: como en estos estudios económicos no se puede pretender alcanzar sino una exactitud muy relativa, en muchas ocasiones será suficiente, sobre todo en estudios preliminares, el empleo de las fórmulas generales, poniendo en ellas como valores numéricos de todas las constantes, incluso las H , h , $100p$, k y v , los aquí determinados anteriormente. Los resultados así obtenidos no diferirán mucho de los que se hubiesen encontrado con constantes especialmente calculadas para la línea especial que se considere.

Sustituyendo, pues, valores numéricos en las fórmulas generales [1], [2], [3] y [4], éstas se convierten en las siguientes, valederas con las limitaciones que acaban de especificarse:

Líneas sencillas, conductores de cobre,

$$i = 1,34 \text{ amp/mm}^2 \text{ de cobre} \quad [5]$$

$$E^3 + E^2 \frac{18L + 450}{0,0414L + 49,60} = \frac{59N_aL}{0,0414L + 49,60} \quad [6]$$

Líneas sencillas, conductores de aluminio reforzado,

$$i = 0,84 \text{ amp/mm}^2 \text{ de aluminio} \quad [7]$$

$$E^3 + E^2 \frac{18L + 450}{0,0414L + 49,60} = \frac{58,8N_aL}{0,0414L + 49,60} \quad [8]$$

Líneas dobles, conductores de cobre,

$$i = 1,31 \text{ amp/mm}^2 \text{ de cobre} \quad [9]$$

$$E^3 + E^2 \frac{32,5L + 662}{0,0828L + 80,20} = \frac{57,7N_aL}{0,0828L + 80,20} \quad [10]$$

Líneas dobles, conductores de aluminio reforzado,

$$i = 0,82 \text{ amp/mm}^2 \text{ de aluminio} \quad [11]$$

$$E^3 + E^2 \frac{32,5L + 662}{0,0828L + 80,20} = \frac{57,2N_aL}{0,0828L + 80,20} \quad [12]$$

Como se observará, las ecuaciones [6] y [8] son prácticamente idénticas y pueden reemplazarse por una sola ecuación, ocurriendo lo propio con las ecuaciones [10] y [12]. Redondeando, además, algunas cifras, para simplificar los cálculos, se llega en definitiva a las siguientes fórmulas:

Líneas sencillas:

$$E^3 + E^2 \frac{18L + 450}{0,04L + 50} = \frac{59N_aL}{0,04L + 50} \quad [13]$$

con cables de cobre

$$i = 1,3 \text{ amp/mm}^2 \text{ de cobre} \quad [14]$$

con cables de aluminio reforzado

$$i = 0,8 \text{ amp/mm}^2 \text{ de aluminio} \quad [15]$$

Líneas dobles:

$$E^3 + E^2 \frac{33L + 662}{0,08L + 80} = \frac{57N_aL}{0,08L + 80} \quad [16]$$

con cables de cobre

$$i = 1,3 \text{ amp/mm}^2 \text{ de cobre} \quad [14]$$

con cables de aluminio reforzado

$$i = 0,8 \text{ amp/mm}^2 \text{ de aluminio} \quad [15]$$

Vamos a aplicar a un par de ejemplos estas fórmulas numéricas, [13], [14], [15] y [16], para mostrar la manera de operar con ellas.

Ejemplo 1.º—Se proyecta una línea de 100 km de longitud, para transportar 10 000 kW máximos por un solo circuito trifásico, siendo el factor de potencia

a la llegada $\cos \varphi = 0,9$. Se desea conocer la tensión y la sección de los conductores más convenientes económicamente.

Los datos son:

$$N = 10\,000 \text{ kW} \quad N_a = \frac{10\,000}{0,9} = 11\,100 \text{ kVA} \quad L = 100 \text{ km.}$$

La ecuación [13] nos da, puestos los valores de N_a y L :

$$E^3 + 41,6E^2 = 1,21 \times 10^6$$

Resuelta esta ecuación se encuentra como raíz real

$$E = 94 \text{ kilovoltios.}$$

Habiéndose supuesto, en estos cálculos económicos, $E_l = vE = 0,875 E$, la tensión en la llegada más conveniente resulta ser

$$E_l = 0,875 \times 94 = 82 \text{ kilovoltios.}$$

La sección de los conductores más recomendable económicamente, será:

$$S = \frac{I}{i} = \frac{N_a}{\sqrt{3E_l i}} = \frac{11\,100}{\sqrt{3 \times 82 \times 1,3}} = 60 \text{ mm}^2 \text{ de cobre;}$$

con cables de aluminio reforzado,

$$S = \frac{I}{i} = \frac{N_a}{\sqrt{3E_l i}} = \frac{11\,100}{\sqrt{3 \times 82 \times 0,8}} = 98 \text{ mm}^2 \text{ de aluminio}$$

Ejemplo 2.º — Proyectada una línea de 250 km de

longitud, para transportar 50 000 kW por dos circuitos trifásicos, siendo el factor de potencia a la llegada $\cos \varphi = 0,9$, se desea calcular la tensión y la sección de los conductores más convenientes económicamente.

Los datos son:

$$N = 50\,000 \text{ kW} \quad N_a = \frac{50\,000}{0,9} = 55\,500 \text{ kVA} \quad L = 250 \text{ km.}$$

La ecuación [16] da, puestos los valores de N_a y L :

$$E^3 + 89,1E^2 = 7,91 \times 10^6$$

Resuelta la ecuación, se encuentra:

$$E = 174 \text{ kilovoltios}$$

y la tensión en la llegada:

$$E_l = 0,875 \times 174 = 152 \text{ kilovoltios.}$$

La sección de los conductores más económica es: Con cables de cobre,

$$S = \frac{I}{i} = \frac{N_a}{2\sqrt{3E_l i}} = \frac{55\,500}{2 \times \sqrt{3 \times 152 \times 1,3}} = 81 \text{ mm}^2;$$

con cables de aluminio reforzado,

$$S = \frac{I}{i} = \frac{N_a}{2\sqrt{3E_l i}} = \frac{55\,500}{2 \times \sqrt{3 \times 152 \times 0,8}} = 132 \text{ mm}^2.$$

Los cables de cobre de 81 mm² son en este caso insuficientes para prevenir el efecto corona, siendo necesario emplear los de aluminio reforzado, de mucho mayor diámetro total.

Pedro JOSÉ LUCIA
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

EL VIADUCTO DE TERUEL

Los inconvenientes que para el tránsito presenta el primer tramo de la carretera de Teruel a Sagunto, con un descenso rápido para cruzar la rambla de San Julián y una subida de longitud aproximada de medio km e inclinación superior al 13 por 100, unidos a la existencia, a la misma altura de la población y del otro lado de la rambla, de una planicie bastante extensa para que pueda constituir el futuro ensanche de Teruel, que las condiciones del terreno hacen por cualquiera otra parte impracticable, me hicieron pensar, desde hace bastantes años, en la conveniencia de construir un viaducto que, al unir la meseta indicada con la ciudad, hiciese posible la expansión de ésta, transformase la primera parte de la carretera en un trazado de condiciones excelentes y estableciera en Teruel la antigua salida hacia Valencia, que indica el nombre de la calle que sale frente al lugar del viaducto y que sustituyó a la puerta del mismo nombre que existió en las murallas.

De aquí nació la propuesta de inclusión en plan de obras de la variante de la carretera de Teruel a Sagunto y la orden de su estudio dada, como director general de Obras públicas, por el que tanto tra-

bajó por el progreso de Teruel y su provincia, don Carlos Castel y González-Amezúa.

Tenía ya tanteadas algunas soluciones, basadas en modelos de distintas clases, pero ninguna se adaptaba de un modo tan perfecto a las condiciones del terreno como la adoptada, que me fué sujerida por el entonces jefe de Obras públicas de la provincia, D. Arturo Monfort, que acababa de hacer estudios en Valencia, sobre puentes en arco de hormigón armado, y me proporcionó una monografía del proyectado y construido por Mörsch sobre el Sitter, en el cantón de Appenzell, que me sirvió de base para el primitivo proyecto, con arreglo al cual se verificó la subasta, y se adjudicó la construcción al ingeniero especializado en esta clase de trabajos, D. Mariano Lufiña.

Necesidad observada al replantear la obra de un aumento de luz en los arcos laterales, cumplimiento de prescripciones contenidas en la aprobación del proyecto, como son las de reducción de longitud del cañón y la de que, para mejor aspecto, se diese a las pilas un pequeño talud, y la conveniencia de adaptar la disposición del tablero a la de los formu-