

ARTERIA DE UNION DEL CUARTO DEPOSITO (CHAMARTIN) CON LOS SEGUNDO Y TERCERO EDIFICIO-OFICINAS, GARCIA MORATO, QUE FORMA PARTE DE LAS INSTALACIONES DEL CANAL DE ISABEL II

Por EMILIO LOPEZ BERGES DE LOS SANTOS,
Ingeniero de Caminos.

Concluye con este artículo el interesante trabajo iniciado en nuestro número anterior bajo este mismo epígrafe, y comprende la exposición del método de cálculo empleado para el estudio de las tuberías y la conclusión del trabajo, con algunos pronósticos sobre el abastecimiento de Madrid.

II

CALCULO DE LAS TUBERIAS

Método de cálculo.

Para el estudio de la presión transversal del tubo se ha seguido el método de Müller-Breslau, haciendo isostática la estructura, cortándola, como se indica en la figura 14, por su generatriz superior y uniendo los bordes de la fisura con el centro mediante bielas rígidas, aplicando al extremo de éstas la reacción hiperestática correspondiente, cuyas tres componentes son: X , esfuerzo normal; Y , esfuerzo cortante, y Z , momento flector, y cuyos valores, según sabemos, son en general:

$$X = \frac{\int_0^1 M_{om} I y \, dl}{\int_0^1 I y^2 \, dl}, \quad Z = \frac{\int_0^1 M_{om} I \, dl}{\int_0^1 I \, dl}$$

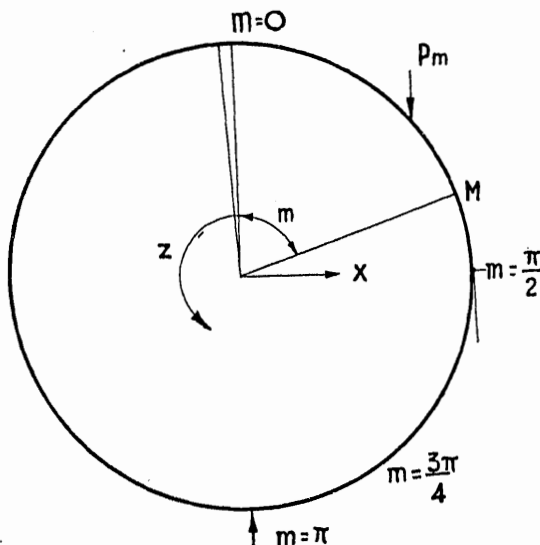


Figura 14.

y para nuestro caso, simplificando:

$$X = \frac{2}{\pi r} \int_0^\pi M_{om} \cos m \, dm, \quad Z = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi M_{om} \, dm,$$

siendo r el radio medio del tubo y M_{om} el momento isostático para el punto m . En cuanto a la componente Y , se anula por simetría.

En un punto cualquiera del tubo definido por el ángulo m tendremos:

$$\text{Momento flector} = M_m = M_{om} - X r \cos m - Z.$$

$$\text{Esfuerzo normal} = N_m = N_{om} + X \cos m.$$

Teniendo en cuenta estas expresiones, podremos calcular las leyes de variación de M_m y N_m y sus valores para los distintos puntos del tubo, según los sistemas de sollicitación que actúan sobre el mismo, una vez determinados los valores de M_{om} y de N_{om} .

Se han tenido en cuenta las siguientes sollicitaciones:

- I. Efecto del peso propio del tubo.
- II. Efecto del peso del agua contenida en el tubo.
- III. Efecto de la presión del agua (carga de agua o piezométrica).
- IV. Efecto de la reacción en los apoyos.

Aplicando a las tuberías de 1400 mm. y 1080 milímetros de diámetro interior las fórmulas mencionadas, teniendo en cuenta las distintas sollicitaciones citadas y suponiendo una presión máxima del agua de 5 Kg./cm.², se obtienen los siguientes resultados:

Tubería de 1400 mm.

I. Peso propio:

$$M_m = 135 - 135 m \text{ sen } m - 67,5 \cos m;$$

$$N_m = 1,8 m \text{ sen } m - 0,9 \cos m.$$

II. Peso del agua:

$$M_m = 183,75 - 91,875 \cos m - 183,75 m \operatorname{sen} m;$$

$$N_m = -4,9 + 1,225 \cos m + 2,45 m \operatorname{sen} m.$$

IV. Reacción del empuje:

$$\frac{3\pi}{4} \leq m \leq \pi;$$

$$M_m = 780 m \operatorname{sen} m - 1447,84 \operatorname{sen} m + 323 \cos m + 31,94;$$

$$N_m = -10,4 m \operatorname{sen} m + 19,28 \operatorname{sen} m - 4,37 \cos m.$$

IV':

$$0 \leq m \leq \frac{3\pi}{4};$$

$$M_m = 62 \cos m + 31,94;$$

$$N_m = 0,827 \cos m.$$

Sumando las expresiones anteriores:

$$\frac{3\pi}{4} \leq m \leq \pi;$$

$$M_m = +350,69 + 461,25 m \operatorname{sen} m + 168,625 \cos m - 1447,84 \operatorname{sen} m;$$

$$N_m = -4,9 - 6,15 m \operatorname{sen} m - 4,045 \cos m + 19,23 \operatorname{sen} m.$$

$$0 \leq m \leq \frac{3\pi}{4};$$

$$M_m = 350,69 - 318,75 m \operatorname{sen} m - 221,375 \cos m;$$

$$N_m = -4,9 + 4,25 m \operatorname{sen} m + 1,152 \cos m.$$

Presión interior:

$$T = pr_i = -5 \times 70 = -350 \text{ Kg.}$$

$$M = pr_i e = 5 \times 70 \times 0,13 = +45,50 \text{ cm./Kg.}$$

Peso propio + peso agua + reacción apoyo para:

m	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$	π
M_m	+129,33	+17,4	-150,00	-23,8	+182,07
N_m	-3,75	-1,75	+1,77	+1,347	-0,45

cm./Kg.

Luego esfuerzos totales del tubo en servicios:

$$M_n = 174,83 + 62,90 - 104,50 + 21,70 + 227,57 \text{ cm./Kg.}$$

$$N_n = 353,75 - 351,73 - 348,23 - 348,653 - 350,45 \text{ Kg.}$$

Observando los resultados, vemos que la tracción es casi constante y su valor es prácticamente el correspondiente a la presión interna.

Tomaremos para el cálculo de la sección el mayor valor obtenido para N_m , es decir, $T = 354$ kilogramos/cm.².

Los momentos resultan pequeños, y para el caso más desfavorable, $m = \pi$; la excentricidad tiene por valor $\frac{227,57}{350,45} = 0,649 \text{ cm.}$

Generatriz interior del tubo: ($m = \pi$):

$$T = 351 \text{ Kg.}^2$$

$$M = 228 \text{ cm./Kg.}$$

Determinación de las cargas de trabajo en el hierro y en el hormigón en el tubo en servicio:

La disposición de las armaduras es la indicada en los planos, resultando: área de hierro para la espira exterior = 16ϕ de 12 mm. por m. 1, o sea $\frac{16 \times 1,13 \text{ cm.}^2}{100}$ por cm. = $0,2 \text{ cm.}^2/\text{cm.}$

Área del hierro de la chapa = $0,3 \text{ cm.}^2/\text{cm.}$

En un punto del tubo próximo a $\frac{3\pi}{4}$ (extremo de la cama) el momento se anula y la sección está sometida únicamente a una fuerza N de tracción.

Suponiendo que la tracción sólo la resiste el hierro, tendremos:

$$A = \text{carga de trabajo de la armadura} = \frac{T}{S} = \frac{354}{0,2 + 0,3} = 710 \text{ Kg./cm.}^2$$

$$H = \text{carga de trabajo del hormigón} = \frac{T}{h + 505};$$

$$h = \text{sección del hormigón} = 10 \text{ cm.}^2;$$

luego:

$$\text{Carga de trabajo del hormigón} = \frac{354}{10 + 50 \times 0,5} = 10,2 \text{ Kg./cm.}^2$$

Respecto a las cargas admisibles por tracción en los hormigones hay pocos trabajos modernos; sin embargo, se puede señalar el de Mr. A. Guerrin, publicado en la revista *Travaux*, de 1942, en cuya página 116 el autor dice: "La resistencia a tracción de los hormigones puede expresarse por la fórmula:

$$t_t = (2 \sqrt{0,67 D + 74 - 12}) \text{ Kg./cm.}^2,$$

siendo D la dosificación de cemento en kilogramos por metro cúbico".

Como en la fabricación de los tubos centrifugados se emplea una dosificación de 500 Kg. en adelante y la relación agua-cemento es automáticamente la más favorable, así como la compacidad, creemos puede aceptarse el valor que resulte de la fórmula

anterior, ya que M. Guerrin la ha comprobado en sus experiencias con la rotura de más de 200 tubos.

Por consiguiente, la carga de rotura a tracción podremos fijarla en:

$$t_t = 2 \sqrt{0,67 \times 500 + 74} - 12 = 28,44 \text{ Kg./cm.}^2,$$

aun cuando esta cifra parece algo alta con relación a las que suelen figurar en los libros, está, sin embargo, en armonía con los resultados obtenidos por M. Guerrin en sus experiencias.

Cargas en la sección correspondiente a la generatriz inferior:

$$T = 351 \quad \cdot \quad M = 228 \quad \cdot \quad (m = \pi);$$

$$A = \text{carga de trabajo de la armadura} = \frac{351}{0,5} = 700 \text{ Kg./cm.}^2$$

$$H = \text{carga de trabajo del hormigón} = \frac{351}{10 + 50 \times 0,50} = 10 \text{ Kg./cm.}^2;$$

$$t = \text{tracción producida por el momento} = \frac{228 \times v}{I}. \quad [1]$$

Determinaremos v e I :

Suponiendo el trozo de sección del tubo indicado en la figura 15, tendremos:

Sección de la armadura por centímetro cuadrado $= 0,2 + 0,3 = 0,5 \text{ cm.}^2$.

Sección de hormigón equivalente $= n \times 0,5 = 15 \times 0,5$.

Sección total $= 10 \times 1 + 15 \times 0,5 = 17,5 \text{ cm.}^2$.

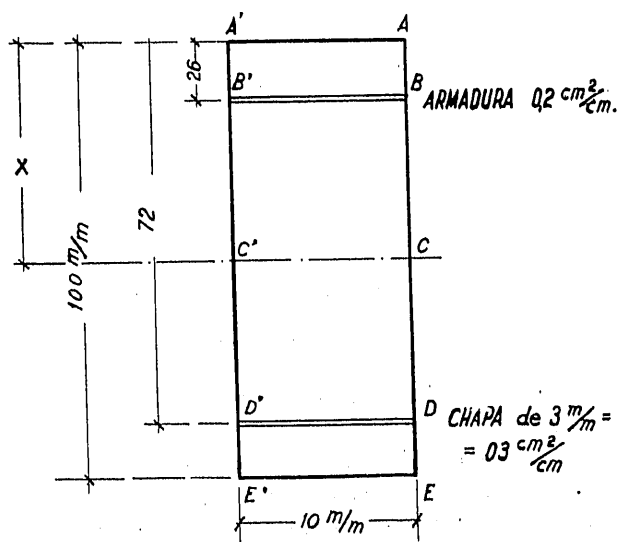


Figura 15.

Determinaremos la fibra neutra de la sección: bastará tomar momentos respecto a la arista exterior del hormigón; de donde tendremos:

$$v \times 17,5 \text{ cm.}^2 = 10 \text{ cm.}^2 \times \frac{10}{2} \text{ cm.} + 15 (0,2 \text{ cm.}^2 \times \times 2,6 \text{ cm.} + 0,3 \text{ cm.}^2 \times 7,2 \text{ cm.});$$

$$v = 5,15 \text{ cm.}$$

El momento de inercia respecto al eje neutro de la sección será, por tanto:

$$I = \frac{A A' x^3}{3} + \frac{A A' (10 - x)^3}{3} + 15 (0,3 \times C D^2 + + 0,2 C B^2) = \frac{1}{3} [5,15^3 + (10 - 5,15)^3] + 15 [0,3 \text{ cm.}^2 (7,2 - - 5,15)^2 + 0,2 \text{ cm.}^2 (5,15 - 2,6)^2] = 121,96 \text{ cm.}^4.$$

Luego, sustituyendo la fórmula [1], tendremos:

$$t = \pm \frac{228 \times 5,15}{121,96} = \pm 9,6 \text{ Kg./cm.}^2.$$

La fibra más cargada, por tanto, del hormigón en los tubos de 1,40 m. experimentará una tracción de $10 + 9,6 = 19,6 \text{ Kg./cm.}^2$, muy inferior a la señalada para carga de rotura por tracción:

Tubería de 1080 mm. — De un modo análogo a como operamos con la de 1400, tendremos:

I. Peso propio:

$$M_m = 82,13 - 82,13 m \text{ sen } m - 41,065 \text{ cos } m;$$

$$N_m = 1,40 m \text{ sen } m - 0,70 \text{ cos } m.$$

II. Peso del agua:

$$M_m = 85,29 - 42,65 \text{ cos } m - 85,29 m \text{ sen } m;$$

$$N_m = 2,92 + 0,73 \text{ cos } m + 1,46 m \text{ sen } m.$$

IV. Reacción de los apoyos:

$$\frac{3\pi}{4} \leq m \leq \pi;$$

$$M_m = +16,772 + 409,09 m \text{ sen } m + 172 \text{ cos } m - - 752,27 \text{ sen } m.$$

$$N_m = -7 m \text{ sen } m - 2,944 \text{ cos } m + 12,992 \text{ sen } m.$$

IV' :

$$0 \leq m \leq \frac{3\pi}{4};$$

$$M_m = -32,55 \text{ cos } m + 16,77;$$

$$N_m = 0,556 \text{ cos } m.$$

Sumando las expresiones anteriores, tendremos:

Peso propio + peso agua + reacción apoyo:

$$\frac{3\pi}{4} \leq m \leq \pi;$$

$$M_m = 184,192 + 241,67 m \text{ sen } m + 88,285 \cos m - 752,27 \text{ sen } m;$$

$$N_m = 2,92 - 4,14 m \text{ sen } m - 2,914 \cos m + 12,992 \text{ sen } m;$$

$$0 \leq m \leq \frac{3\pi}{4};$$

$$M_m = +184,19 - 167,42 m \text{ sen } m - 120,265 \cos m;$$

$$N_m = -2,92 + 2,86 m \text{ sen } m + 0,586 \cos m.$$

Para:

m	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$	π
M_m	+63,93	+6,17	-78,79	-7,53	+95,91
N_m	-2,34	-0,92	+1,57	+1,429	-0,006

cm./Kg.

Presión interior:

$$T = -pr_i = 5 \times 54 = -270 \text{ Kg.}$$

$$M = pr_i e = 270 \times 0,135 = +36,45 \text{ cm./Kg.}$$

de donde:

Esfuerzos totales del tubo en servicio:

m	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$	π
M_m	+100,38	+42,62	-42,31	+28,92	+132,36
N_m	-272,34	-270,92	-268,43	-268,571	-270,006

Kg.

$$T = 272 \text{ Kgs. para } m = \pi$$

$$\text{Excentricidad} = e = \frac{132,36}{270,006} = 0,490 \text{ cm.}$$

$$T = 270 \text{ Kg.}$$

$$M = 132 \text{ cm./Kg.}$$

Área de hierro para la espira exterior:

$$20 \phi \text{ de } 10 \text{ mm. por m. l.} = \frac{20 \times 0,79 \text{ cm.}^2}{100} \text{ por cm.} = 0,158 \text{ cm.}^2/\text{cm.}$$

$$\text{Área de hierro de la chapa de } 2,1 \text{ mm.} = 0,31 \text{ cm.}^2/\text{cm.}$$

$$\text{Sección total de la armadura} = 0,368 \text{ cm.}^2/\text{cm.}$$

$$A = \text{carga de trabajo del hierro} = \frac{272}{0,158 + 0,210} = \frac{272}{0,368} = 739 \text{ Kg./cm.}^2;$$

$$H = \text{carga de trabajo del hormigón} = \frac{272}{9 + 50 \times 0,368} = \frac{272}{27,4} = 9,93 \text{ Kg./cm.}^2.$$

Sección correspondiente a la generatriz del tubo:

$$T = 270 \text{ Kgs. } \rightarrow M = 132 \text{ cm./Kg. } \rightarrow m = \pi.$$

Esfuerzos producidos por la tracción:

$$A = \text{carga de trabajo de la armadura} = \frac{270}{0,368} = 733 \text{ Kg./cm.}^2;$$

$$H = \text{carga de trabajo del hormigón} = \frac{270}{27,4} = 9,85 \text{ Kg./cm.}^2.$$

$$\text{Sección del hormigón equivalente} = n \times 0,368 = 15 \times 0,368 = 5,52 \text{ cm.}^2.$$

$$\text{Sección total} = 9 \times 1 + 5,52 = 14,52 \text{ cm.}^2.$$

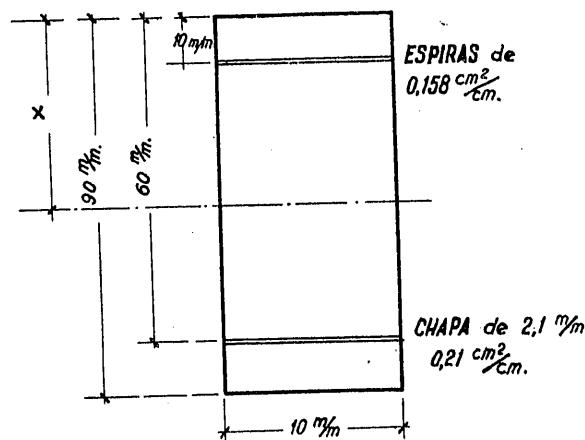


Figura 16.

Para determinar la fibra neutra de la sección bastará tener momentos respecto a la arista exterior del hormigón; tendremos:

$$14,52 \times v = 9 \times \frac{9}{2} + 15 (0,158 \times 2 + 0,210 \times 6);$$

$$v = 4,42 \text{ cm.}$$

De un modo análogo al caso de la tubería de 1400 milímetros:

$$I = \frac{1}{3} [4,42^3 + (9 - 4,42)^3] + 15 [0,21 (6 - 4,42)^2 + 0,158 (4,42 - 1)^2] = 96,39 \text{ cm.}^4;$$

$$t = \pm \frac{132 \times 4,42}{96,39} = \pm 5,87 \text{ Kg./cm.}^2.$$

Luego la fibra más cargada del hormigón en el tubo de 1080 mm. experimentará una tracción de $9,85 + 5,87 = 15,72 \text{ Kg./cm.}^2$.

Conviene hacer notar que, según el artículo 30 de nuestra Instrucción, para tener una resistencia a la tracción de 19 Kg./cm.^2 basta con que el hormigón en probeta cilíndrica, y a los veintiocho días, alcance la resistencia de 225 Kg./cm.^2 , que se rebasa ampliamente cuando la dosificación es de 500 kilogramos y, además, el hormigón se vibra o se centrifuga.

Flexión longitudinal. — El tubo lo consideramos como una viga de sección circular en voladizo, cortándolo en el centro del vano:

$$\text{Luz de cálculo} = 77,5 \text{ cm.}$$

$$\text{Sección del hormigón} = \pi 80^2 - \pi 70^2 = 4712 \text{ cm.}^2;$$

$$\text{Sección de la armadura} = 40 \Phi \text{ de } 8 \text{ mm. } \vdash 0,3 \times 2 \pi \times 72,8 \text{ (chapa)} = 20 \vdash 137,22 = 157,3 \text{ cm.}^2.$$

$$\text{Cuantía} = q = \frac{157,3}{4712} = 0,033 \approx 0,030.$$

M = Momento considerado = Momento debido al peso propio $\vdash$ peso del líquido $\vdash$ Momento debido al manguito = $M' \vdash M''$.

$$M' = \frac{1}{2} p l^2 \quad p = p. \text{ propio } \vdash p. \text{ agua} = 26,7 \text{ Kg./cm.}$$

$$M' = \frac{1}{2} 26,7 \times 77,5^2 = 80 183,437 \text{ cm./Kg.}$$

$$M'' = \text{peso manguito} \times 77,5.$$

$$1068 \times 77,5 = 82770 \text{ cm./Kg.}$$

$$M = 80 183,437 \vdash 82770 = 162 954 \text{ cm./Kg.}$$

Aplicando las tablas de hornigón armado de A. Peña (pág. 154), llamando e = esfuerzo del tubo y R = radio medio del mismo, tendremos para $r = 15 \gg q = 0,030 \gg e = 10 \text{ cm.} \gg R = 75 \text{ cm.}$:

Carga de trabajo del hormigón:

$$H = \frac{M}{e R^2} \cdot \frac{1 - \cos m}{\text{tg } m \text{ sen}^2 m} = \frac{162 954}{10 \times 75^2} 0,281 = 2,90 \times 0,281 = 0,81 \text{ Kg./cm.}^2.$$

Carga de trabajo de la armadura:

$$A = \frac{M r}{e R^2} \cdot \frac{1 + \cos m}{\text{tg } m \text{ sen}^2 m} = \frac{15 \times 162 954}{10 \times 75^2} \times 0,593 = 15 \times 2,90 \times 0,593 = 25,79 \text{ Kg./cm.}^2.$$

Luego esta flexión puede prácticamente despreciarse.

Lo mismo podemos decir de la tubería de 1080 milímetros, ya que se apoya análogamente a la tubería de 1400 mm.

Conclusión.

Con la puesta en servicio de la "Unión del Cuarto Depósito con los existentes", obra descrita en los apartados anteriores de este artículo, se incrementa el consumo diario de agua de Madrid en unos 60.000 metros cúbicos, pudiendo decirse que el total medio

diario de la capital es de unos 400 000 m.³, equivalente a 4,60 m.³/seg. Ahora bien: con los tres embalses del Lozoya, Puentes Viejas, El Villar y suponiendo totalmente terminado el de Ríosequillo, y en una época de penuria de aportación del río como la del año hidráulico 48-49, sólo se puede regular el río Lozoya a razón de 4,760 m.³/seg., según se deduce de las curvas de caudales acumulados correspondientes. Para 1960, de acuerdo con las estadísticas municipales, Madrid alcanzará dos millones de habitantes, siendo necesario para aquella fecha 6,94 metros cúbicos/seg., y para 1970, con dos millones y medio de habitantes, 9,2 m.³/seg. Para reducir este déficit entre 6,94, 9,2 y 4,76, es necesario el aprovechamiento de los caudales del río Jarama y del Sorbe, que son las cuencas más inmediatas a las del río Lozoya.

Las obras preliminares del canal del Jarama, como son el camino de servicio del mismo y la línea de energía eléctrica a todo lo largo del trazado, están prácticamente terminadas, y es de esperar, para el bien de Madrid, que cuanto antes salgan a concurso las obras del canal propiamente dichas, cuya sección es capaz de conducir no sólo los caudales del mencionado Jarama, sino también los del Sorbe.

Si queremos que la capital de España siga enorgulleciéndose de su abastecimiento de aguas y no sean de temer fuertes restricciones en un futuro próximo, no hay tiempo que perder, ya que la construcción de las obras de este acueducto, con un 50 por 100 casi de su trazado en túnel y con un presupuesto de cerca de 200 millones de pesetas, requiere para su construcción, por lo menos, un período de cinco o seis años. Es decir, que para que llegue a los madrileños una sola gota del Jarama se precisa que pase, por lo menos, aquel lapso de tiempo.

Por último, queremos hacer constar, para tranquilidad de nuestros lectores, que el resultado de los análisis químicos y bacteriológicos de las aguas del Jarama no desdice lo más mínimo en relación con las mundialmente famosas del Lozoya, cosa que lógicamente tenía que ocurrir por tratarse de caudales procedentes de la misma sierra, con idéntica orientación y altitudes similares, e incluso las futuras captaciones en el pantano de El Vado (canal del Jarama), construido por la Delegación de los Servicios Hidráulicos del Tajo, y el del pozo de los Ramos (río Sorbe), en estudio, tienen sus cuencas más desérticas que las de Puentes Viejas, del mencionado Lozoya.