

DATOS PARA EL CÁLCULO DE SECCIONES TUBULARES DE HORMIGÓN ARMADO

POR JOSÉ BRUGAROLAS, INGENIERO DE CAMINOS

Recientemente, con motivo del estudio de un acueducto, he tenido que someter al cálculo secciones tubulares de hormigón armado sometidas a flexión simple. Y he encontrado, sorprendente que, tratándose de un caso de flexión bastante usual, haya verdadera escasez de tablas y gráficos que permitan realizar rápidamente los tanteos necesarios para fijar las secciones metálicas y para determinar las cargas de trabajo de hormigón y armadura.

El único caso estudiado en las obras españolas es el correspondiente a armadura, repartida de un modo uniforme en todo el perímetro. Con él, aunque se resuelve en muchas ocasiones el problema planteado, lo hace siempre con un aprovechamiento muy deficiente de la sección metálica.

El caso real de flexión de tubos exige una armadura longitudinal uniformemente repartida en todo el perímetro, la cual se complementa con otra armadura destinada especialmente a absorber las tensiones producidas por la flexión. La primera armadura se fija, por consideraciones constructivas y para evitar la aparición de fisuras en el hormigón (por retracción, temperatura, etc.), en un mínimo de 0,002 de la sección de éste. La segunda armadura o armadura de flexión depende directamente de la importancia de las tensiones que se producen, siendo lógico disponerla únicamente en la zona estirada.

La armadura que llamamos de flexión no debe, por otra parte, concentrarse en un determinado lugar de la sección, como se hace en las vigas ordinarias, pues en tal caso se concentrarían, asimismo, las tensiones, con la consecuencia obligada de aparición de fisuras y, por lo tanto, filtraciones.

Con este pequeño preámbulo, paso a la descripción del gráfico adjunto, que ha sido formado sobre la base de una cuantía metálica repartida uniformemente y otra cuantía metálica repartida según la ley: $q' = q_1 \cos^2 \theta$ en el semicírculo sometido a tracción.

La sección tubular así constituida está definida por las siguientes dimensiones y magnitudes:

Radio medio, r (en metros).

Grueso de la pared, g (en metros).

Relación entre los coeficientes de elasticidad de la armadura y del hormigón, $E_a : E_h = n$. (Este valor es, en los tubos, variable entre 8 y 12.)

Cuantía aritmética de la armadura uniformemente repartida, q'' .

Cuantía mecánica de la armadura anterior o proporción virtual de acero, $Q = q \times n$.

Cuantía aritmética variable de la armadura de flexión, $q' = q_1 \cos^2 \theta$.

Cuantía mecánica de la armadura anterior o proporción virtual de acero:

$$Q' = q' \times n = q_1 \cos^2 \theta \times n = Q_1 \cos^2 \theta$$

Cálculo de los elementos mecánicos de la sección.

La posición de la fibra neutra se supone definida por el ángulo θ .

Superficie virtual de la sección:

$$S = 2 \omega r g + 2 \pi r g \times Q + 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} r g Q_1 \cos^2 \theta d\theta = \\ = r g (2 \omega + 2 \pi Q + \frac{\pi}{2} Q_1).$$

Momento de la sección con respecto al diámetro horizontal:

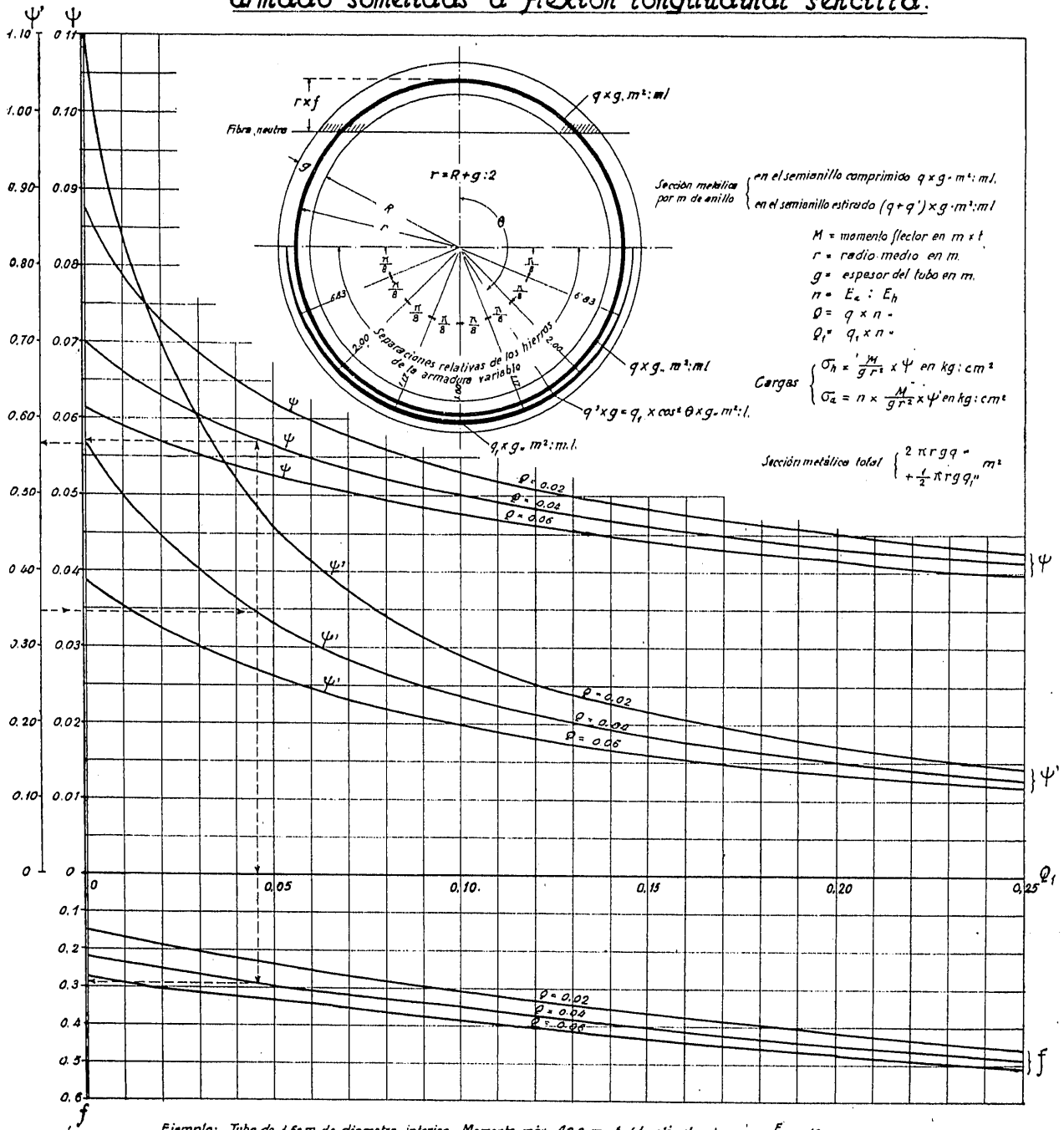
$$M_s = 2 \int_0^{\omega} g r d\theta \times r \cos \theta + 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} g r d\theta \times Q_1 \cos^2 \theta \times \\ \times r \cos \theta = r^2 g (2 \sin \omega - \frac{4}{3} Q_1).$$

Ordenada con respecto al diámetro de la fibra neutra:

$$r \cos \omega = \frac{M_s}{S} = \frac{r^2 g (2 \sin \omega - \frac{4}{3} Q_1)}{r g (2 \omega + 2 \pi Q + \frac{\pi}{2} Q_1)}$$

o bien:

Gráfico para el cálculo de secciones tubulares de hormigón armado sometidas a flexión longitudinal sencilla.



Ejemplo: Tubo de 1,60 m. de diámetro inferior. Momento máx. 40,0 m x l (tonelámetros); $n = \frac{E_a}{E_h} = 10$
 $g =$ espesor del tubo 0,17 m; radio medio, $r = 1,60 : 2 + 0,17 : 2 + 0,015$ (enlucido) = 0,90 m.
 Para $G_a = 1000 \text{ kg} : \text{cm}^2$ es $\psi' = G_a \times \frac{n}{M} : \frac{1}{(g^2 r^3)} = 1000 \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{400 : (0,17^2 \times 0,90^3)} = 100 \times \frac{1}{292} = 0,345$.
 $q = Q : n = 0,0040$
 $\{ q_1 = 0,045 \quad q_2 = Q : n = 0,0045 \quad G_h = \frac{M}{g^2 r^3} \times \psi = 292 \times 0,057 = 16,5 \text{ kg} : \text{cm}^2$ Profundidad de la fibra neutra,
 $r \times f = 0,90 \times 0,29 = 0,26 \text{ m.}$ (también son posibles los pares de valores $\{ \begin{matrix} \varphi = 0,020 & \varphi = 0,060 \\ \varphi = 0,078 & \varphi = 0,012 \end{matrix} \}$)

Armaduras:

Uniforme, de $q \times g = 0.004 \times 0.17 = 0.00068 \text{ m}^3 \text{ por m}$. Se compone con ϕ de 8 a 7.5 cm. En total, $2\gamma \times 0.90 \times 0.17 \times 0.004 = 0.0033 \text{ m}^3 (75-\phi)$ en todo el anillo. Variable (en el semianillo estirado), con máximo de $q \times g = 0.0045 \times 0.17 = 0.00076 \text{ m}^3 \text{ por m}$. Se compone con ϕ de 8 a 6.6 en la generatriz mas baja; ϕ de 8 a 6.6 $\times 1.17 = 7.7 \text{ cm}$ en la generatriz α $157^\circ 30'$; ϕ de 8 a 6.6 $\times 2.00 = 13.2 \text{ cm}$ en la generatriz α 135° ; ϕ de 8 a 6.6 $\times 0.83 = 45.0 \text{ cm}$ en la generatriz α $112^\circ 30'$. En total, $\frac{1}{2} \gamma \times 0.90 \times 0.17 \times 0.0045 = 0.00108 \text{ m}^3 (21-\phi)$. Si se prescinde de la armadura variable, conservando la uniforme, el momento resistente de la sección es (con $G_a = 1000 \text{ kgs./cm}^2$), $M = G_a \times \frac{1}{\gamma} \times g \times r^2 \times \frac{1}{\phi} = 1000 \times \frac{1}{1.17} \times 0.17 \times 0.90^2 \times \frac{1}{0.333} = 24.4 \text{ m.t.}$ La carga del hormigón es, $G_b = \frac{24.4}{0.71755} \times \psi = \frac{24.4}{0.71755} \times 0.07 = 12.5 \text{ kgs./cm}^2$. La armadura constante equilibra 24.4 m.t. con $75-\phi$. La armadura variable equilibra $40.0 - 24.4 = 15.6 \text{ m.t.}$ con $21-\phi$. Esta es pues $\frac{15.6}{24.4} = 21$ veces más eficaz que aquella.

$$\cos \omega = \frac{2 \operatorname{sen} \omega - \frac{4}{3} Q_1}{2 \omega + 2 \pi Q + \frac{\pi}{2} Q_1} \quad (1)$$

cuya ecuación determina la posición de la fibra neutra para cada par de valores Q y Q_1 .

Momento de inercia de la sección con relación al diámetro:

$$\begin{aligned} I_d &= 2 \int_0^{\omega} grd \Theta \times r^2 \cos^2 \Theta + \frac{1}{2} 2 \pi rg \times Q \times r^2 + \\ &+ 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} grd \Theta \times Q_1 \cos^2 \Theta \times r^2 \cos^2 \Theta = \\ &= gr^3 \left(\frac{1}{2} \operatorname{sen} 2 \omega + \omega + \pi Q + \frac{3}{8} \pi Q_1 \right). \end{aligned}$$

Momento de inercia con respecto al centro de gravedad de la sección:

$$\begin{aligned} I &= I_d - S \times r^2 \cos^2 \omega = gr^3 \left(\omega - \frac{1}{2} \operatorname{sen} 2 \omega + \pi Q + \right. \\ &\quad \left. + Q_1 \times \left(\frac{3}{8} \pi + \frac{4}{3} \cos \omega \right) \right); \end{aligned}$$

y, por consiguiente, carga de trabajo del hormigón:

$$\sigma_h = \frac{M}{I} \times r (1 - \cos \omega) = \frac{M}{gr^3} \times$$

$$\begin{aligned} &\times \frac{1 - \cos \omega}{\omega - \frac{1}{2} \operatorname{sen} 2 \omega + \pi Q + Q_1 \left(\frac{3}{8} \pi + \frac{4}{3} \cos \omega \right)} = \\ &= \frac{M}{gr^3} \times \psi \quad (2) \end{aligned}$$

Carga de trabajo del acero:

$$\begin{aligned} \sigma_a &= n \times \sigma_h \times \frac{r (1 + \cos \omega)}{r (1 - \cos \omega)} = n \times \frac{M}{gr^3} \times \\ &\times \left(\psi \times \frac{1 + \cos \omega}{1 - \cos \omega} \right) = n \frac{M}{gr^3} \times \psi' \quad (3) \end{aligned}$$

con lo que queda resuelta la cuestión.

En el gráfico se han reunido los valores de ψ , ψ' y $1 - \cos \omega = f$, correspondientes a $Q = 0,02$, $0,04$ y $0,06$ y Q_1 variable entre 0 y $0,25$. Los valores de Q son los usuales recomendados por el profesor Saliger para las armaduras de retracción en tuberías. En el mismo gráfico se indican los elementos de cálculo necesarios para repartir la armadura de flexión. Además, se ha incluido un ejemplo resuelto para facilitar el uso.

Termino consignando mi agradecimiento al ingeniero D. Carlos Conradi por haber repasado los cálculos y deseando que el trabajo realizado facilite el de los compañeros que tengan que proyectar tubos sometidos a flexión longitudinal. Este es el afán que me guió al emprender aquél.

• NOTA BIBLIOGRÁFICA •

Catálogo Oficial de la producción industrial de España. 1938. Volumen I. Un tomo de 27×21 centímetros, con 477 páginas y dos índices alfabéticos: uno, por razones sociales, y otro, por productos. Publicación del Ministerio de Industria y Comercio.

Este Catálogo Oficial contiene las industrias que se hallan dotadas de Certificado de Productor nacional, y es, por lo tanto, de máximo interés para

conocer las obligaciones de los consumidores y evitar las sanciones que se imponen cuando no se emplean los productos nacionales en los casos en que es obligatorio.

Se echan de menos ciertas razones sociales, pero, sin duda, se debe a que figuraban en zona roja el año 1938, por lo que seguramente se incluirán en el Volumen II, que cerrará la edición 1938-40, que será revisada y ampliada en la edición 1945.