

METODO ABREVIADO PARA LA DETERMINACION DE CARGAS DE APLASTAMIENTO SOBRE TUBOS DE AMIANTO-CEMENTO ENTERRADOS (*)

Por JUAN JOSE LEGARDA ZARAGÜETA
Ingeniero Industrial - Uralita, S. A.

En el desarrollo de su actividad profesional muchos técnicos deben hacer frente a laboriosos cálculos que podrían sintetizarse en ábacos de sencillo manejo. Tal es el caso de las tuberías enterradas objeto del presente trabajo, para las cuales se presenta un método de cálculo abreviado de las cargas de aplastamiento para diversas condiciones.

1. Introducción.

El continuo desarrollo económico mundial y la consiguiente elevación del nivel de vida han producido unas exigencias progresivas en la calidad de las infraestructuras sanitarias de los distintos países.

Por otra parte, el espectacular aumento del coste de la mano de obra y la necesidad de realizar grandes obras en cortos plazos de ejecución obligan a utilizar materiales de fácil y rápido montaje.

Todo esto ha influido decisivamente en que la tendencia actual en el terreno de los abastecimientos de agua a poblaciones y más aún en el de los saneamientos de sus aguas residuales, se oriente hacia la utilización de elementos tubulares de gran longitud y pequeños espesores constituidos por materiales de alta calidad.

La fabricación industrial de estos tubos y el control de calidad a que se ven sometidos permiten garantizar unas características de resistencia mecánica muy estrictas a partir de las cuales se definen varias clases o series de tubería de distinto comportamiento frente a cargas de aplastamiento, a fin de permitir seleccionar en cada caso la tubería adecuada que resulte más económica.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de septiembre de 1974.

Por todo ello se impone la necesidad de determinar lo más exactamente posible las cargas de aplastamiento producidas por el terreno, el tráfico o cualquier otro tipo de sollicitación sobre los tubos enterrados.

A continuación damos unas ligeras ideas sobre el cálculo de cargas externas sobre un tubo enterrado y proponemos un método abreviado para la determinación de las mismas.

2. Determinación de las cargas externas.

Las cargas externas que pueden actuar sobre un tubo enterrado son las siguientes:

- Cargas del terreno.
- Cargas del tráfico.
- Cargas adicionales estáticas de superficie.

2.1. Cargas del terreno.

Los cálculos que desarrollaremos siguen la teoría de Marston (The Theory of External loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments, 1930).

Definiremos dos tipos de condiciones de enterramiento:

- Condición de zanja.
- Condición de zanja ancha o terraplén.

2.1.1. Tubería colocada en condición de zanja (figura 1).

Se dice que una tubería está en condiciones de zanja cuando la carga ejercida por el terreno sobre el tubo está disminuida por la intervención de las fuerzas de rozamiento del relleno con las paredes de la zanja.

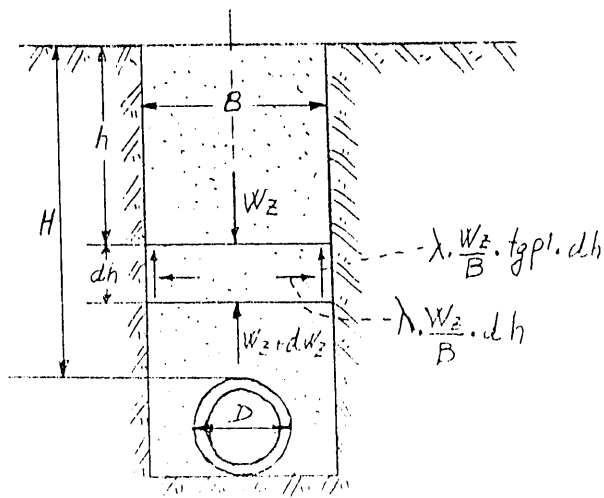


Figura 1.

El equilibrio de las fuerzas verticales exige que:

$$W_z + dW_z + 2\lambda \cdot \frac{W_z}{B} \cdot \text{tg } \rho' \cdot dh = W_z + B \cdot dh \cdot \gamma$$

donde:

- W_z = carga vertical de tierra sobre la tubería (Kg/ml).
- γ = peso específico (Kg/m³).
- H = altura de recubrimiento.
- B = anchura de la zanja.
- λ = coeficiente de empuje activo.
- ρ' = ángulo de rozamiento de las paredes de la zanja con el relleno.
- D = diámetro exterior del tubo.

Solucionando esta ecuación diferencial resulta:

$$W_z = \frac{1 - e^{-2\lambda \cdot \text{tg } \rho' H/B}}{2\lambda \text{tg } \rho' H/B} \cdot \gamma \cdot H \cdot B$$

Para tubos semirrígidos el autor Wetzorke propone como más exacta la siguiente expresión:

$$W_z = \frac{1 - e^{-2\lambda \cdot \text{tg } \rho' H/B}}{2\lambda \text{tg } \rho' H/B} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{B + D}{2} \quad (1)$$

2.1.2. Tubería colocada en condición de zanja ancha o terraplén (figs. 2 y 3).

Se dice que una tubería está en condiciones de zanja ancha cuando la anchura de la zanja es grande comparada a la altura de recubrimiento. Su estudio es análogo al de una tubería tendida sobre el terreno bajo un terraplén.

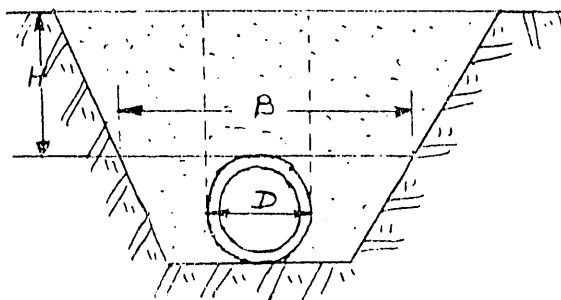


Figura 2.

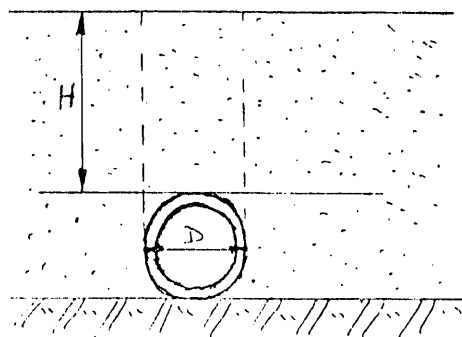


Figura 3.

En ambos casos:

$$W_a = m \cdot \gamma \cdot H \cdot D \quad (2)$$

donde:

W_a = carga vertical sobre la tubería (Kg/m.l.).

$m = \frac{5 + 3n}{(1 + n)(3 + n)}$: considera el efecto de carga que se produce sobre el tubo según asiente más o menos que el terreno.

$$n = \frac{Es}{Er} \left(\frac{r}{e} \right)^3 \text{ criterio de elasticidad de Voelmy.}$$

siendo:

- Es = módulo de elasticidad del suelo.
- Er = módulo de elasticidad del tubo.
- r = radio medio del tubo.
- e = espesor del tubo.

2.1.3. Altura límite (H_{lim}).

Es la altura de recubrimiento límite entre las condiciones de zanja y zanja ancha.

Su valor lo obtendremos igualando las fórmulas (1) y (2) e iterando:

$$\frac{1 - e^{-2 \lambda \cdot \tan \rho' \cdot H_{lim} \cdot B}}{2 \lambda \cdot \tan \rho' \cdot H_{lim} / B} \cdot \gamma \cdot H_{lim} \cdot \frac{B + D}{2} = H_{lim} \cdot \gamma \cdot H_{lim} \cdot D$$

Si:

$H = H_{lim}$ = condiciones de zanja.

$H = H_{lim}$ = condiciones de zanja ancha.

2.1.4. Sobrecarga debida al tráfico (fig. 4).

Seguiremos la teoría desarrollada por Boussinesq para el semiespacio elástico isótropo.

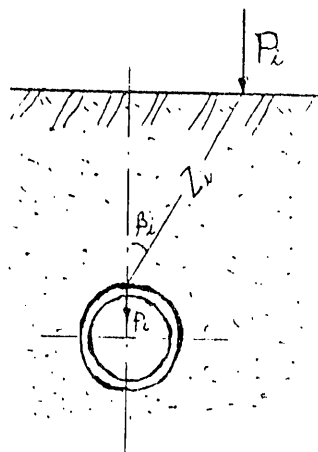


Figura 4.

La componente vertical en la parte superior del tubo de una carga aislada y estática P_i tiene el siguiente valor:

$$p_i = \frac{3 \cdot P_i}{2 \pi Z_i^2} \cdot \cos^3 \beta_i \text{ (Kg/m}^2\text{)}$$

En el caso de un camión existirán varias fuerzas aisladas cuyo efecto será:

$$p = \sum p_i$$

Admitiendo un reparto uniforme sobre el tubo:

$$P = p \cdot D \text{ (Kg/ml)}$$

Teniendo en cuenta que las cargas son dinámicas introduciremos un factor de choque $\varphi = 1 + 0,3/H$, con lo que resulta:

$$P = p \cdot D \cdot \varphi \text{ (Kg/ml)}$$

3. Método abreviado de cálculo de cargas de aplastamiento.

Si bien los métodos desarrollados son de sencilla concepción, su cálculo práctico es laborioso y complicado.

A fin de poder realizar con comodidad este cálculo lo integramos en un programa de ordenador que nos ha permitido, por una parte, realizar exploraciones exhaustivas y, por otra, evitar las simplificaciones introducidas en el desarrollo teórico que hemos expuesto. Por ejemplo, en el cálculo de sobrecarga debidas al tráfico hemos podido utilizar la complicada integral de Hoil-Newmark aplicada a la teoría de Boussinesq.

El problema aparece al intentar sintetizar todos los resultados obtenidos del ordenador en forma de cuadros o ábacos de fácil manejo, ya que estos resultados son función del tipo de terreno, diámetro del tubo y anchura y profundidad de la zanja.

Para solucionar el problema hemos seguido el siguiente método:

3.1. Carga del terreno (Abacos 1, 2 y 3).

3.1.1. Condición de zanja.

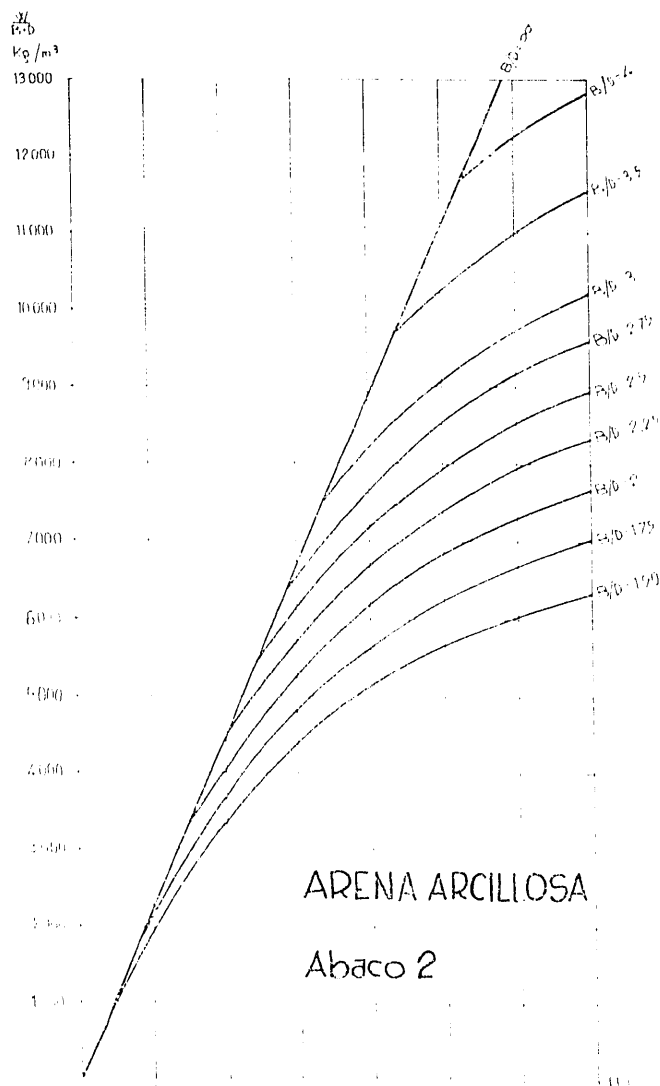
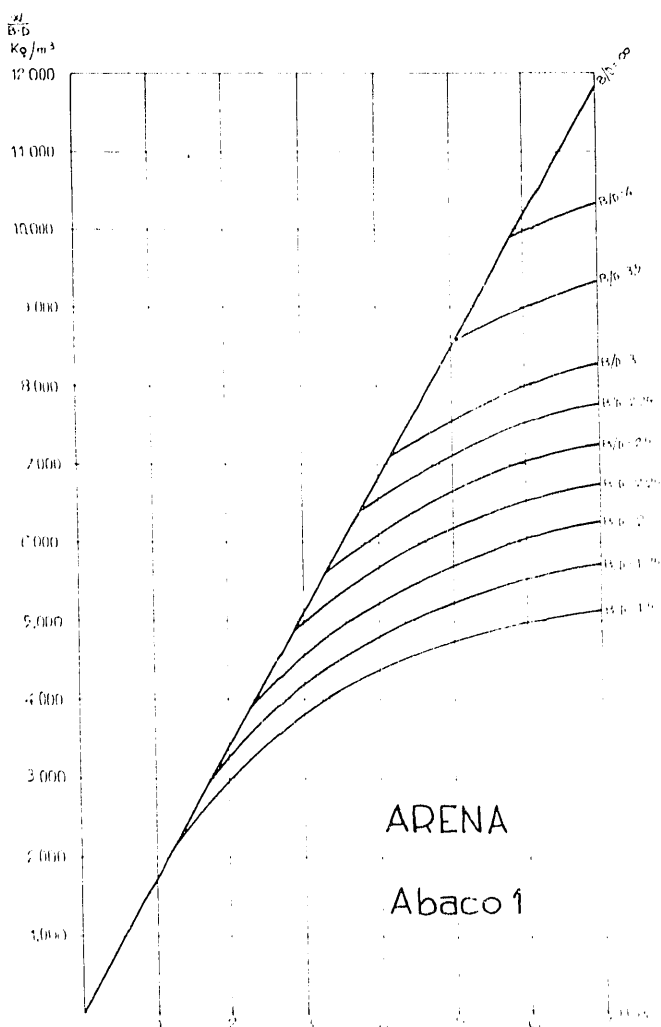
Hemos visto que:

$$W_z = \frac{1 - e^{-2 \lambda \cdot \tan \rho' \cdot H \cdot B}}{2 \lambda \cdot \tan \rho' \cdot H / B} \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{B + D}{2}$$

o también:

$$W_z = \frac{1 - e^{-2 \lambda \cdot \tan \rho' \cdot H / B}}{B \cdot D} \cdot \gamma \cdot H / B \cdot \frac{B/D + 1}{2}$$

Si fijamos el tipo de terreno los términos λ , ρ' y γ quedarán constantes y entonces el se-



segundo miembro de la ecuación será tan solo función de H/B y B/D :

$$\frac{W_z}{B \cdot D} = f(H/B, B/D)$$

Dando valores constantes a la relación B/D obtendremos una familia de curvas que serán función únicamente de H/B :

$$\frac{W_z}{B \cdot D} = f[H/B, (B/D)_1] = f_1(H/B)$$

$$\frac{W_z}{B \cdot D} = f[H/B, (B/D)_2] = f_2(H/B)$$

$$\frac{W_z}{B \cdot D} = f[H/B, (B/D)_n] = f_n(H/B)$$

Con este sistema podremos representar con un ábaco según cada tipo de terreno todos los resultados para distintos diámetros, anchuras y profundidades de zanja, donde $\frac{W_z}{B \cdot D}$ serán las ordenadas y H/B las abscisas.

En los ábacos 1, 2 y 3 hemos considerado los tres tipos de terreno más representativos: arena, arena-arcillosa y arcilla.

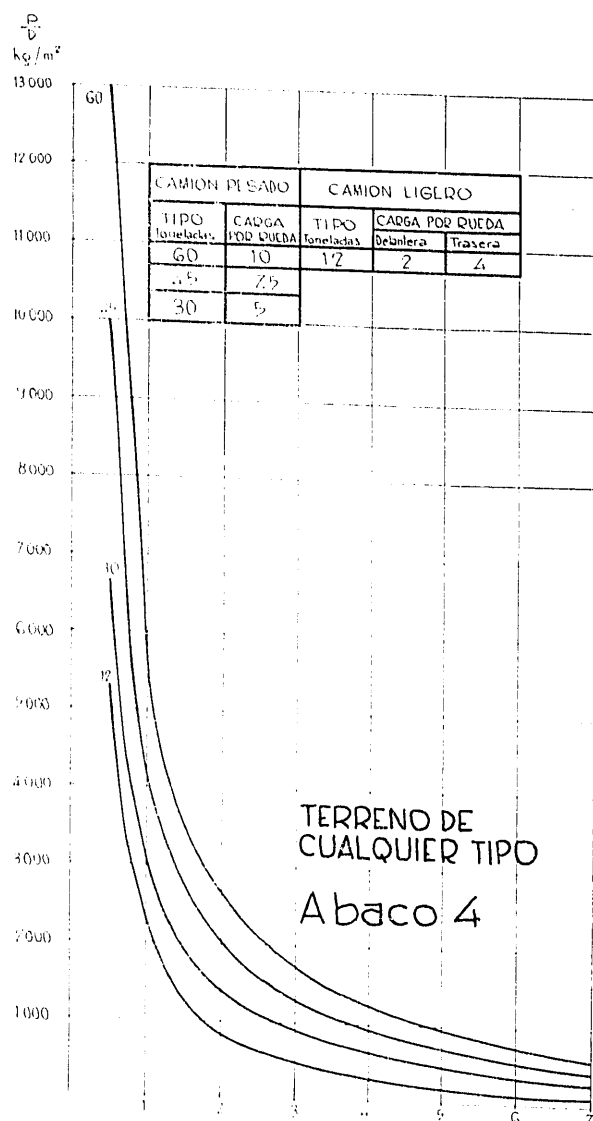
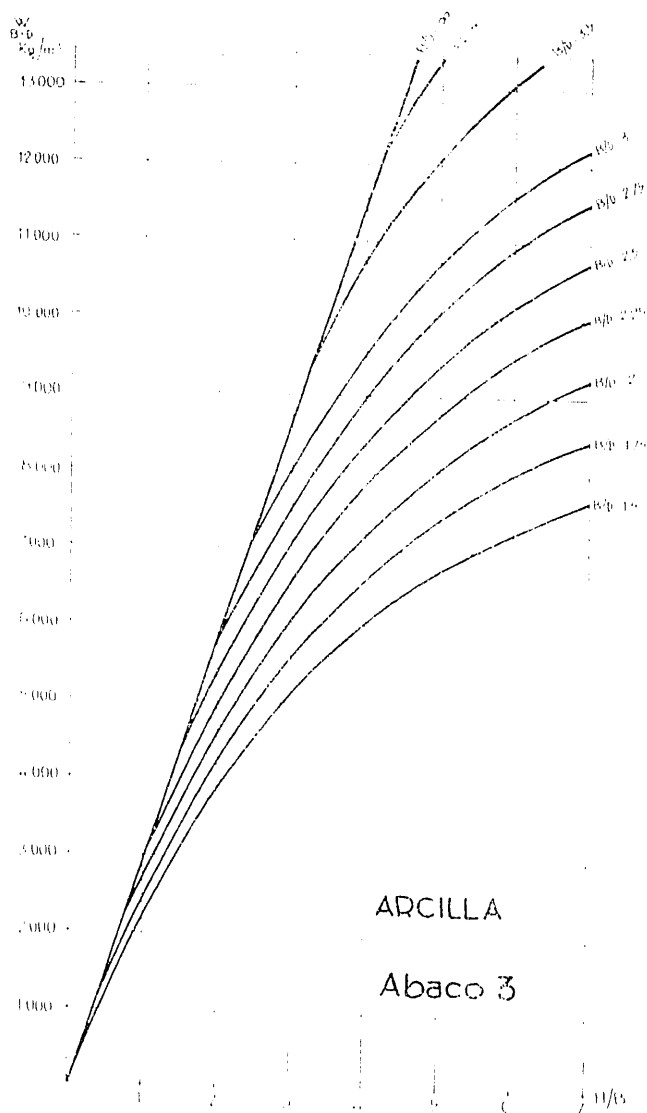
3.1.2. Condición de zanja ancha (Abacos 1, 2 y 3).

Según hemos visto:

$$W_{at} = m \cdot \gamma \cdot H \cdot D$$

o también:

$$\frac{W_{at}}{B \cdot D} = m \cdot \gamma \cdot \frac{H}{B}$$



En este caso resulta que para una clase de terreno dada el segundo término de la ecuación depende de H/B y además de m . Sin embargo, el valor de m es prácticamente constante para un solo tipo de terreno, pues depende de la relación r_e que apenas varía para los distintos diámetros, por lo que cabe aceptar que:

$$\frac{W_n}{B \cdot D} = f'(H/B)$$

La función f' es lineal y puede ser representada en los mismos ábacos anteriores, ya que tiene las mismas ordenadas y abscisas.

3.2. Sobrecarga debida al tráfico (Abaco 4).

Hemos obtenido de una forma aproximada que:

$$P = p \cdot D \cdot \varphi$$

o también:

$$P/D = p \cdot \varphi$$

El segundo término de la anterior ecuación depende de p y φ . El término p es función de la altura de recubrimiento H y del tipo de camión. El factor φ depende tan solo de H . Podremos representar una familia de curvas $P/D = f'(H)$ en la que cada una de ellas corresponderá a un tipo de camión.

3.3. Proceso de cálculo.

- a) Calcular las relaciones H/B y B/D .
- b) Seleccionar uno de los ábacos (1, 2 ó 3) de carga de tierra según el tipo de terreno.
- c) Entrar en abscisas con el valor H/B sobre la curva B/D correspondiente y tomar el valor $\frac{W}{B \cdot D}$ sobre el eje de ordenadas.
- d) Calcular W multiplicando el valor anterior por $B \cdot D$.
- e) En el ábaco (4) de sobrecarga de tráfico entrar en abscisas con el valor H sobre la curva del camión tipo considerado y obtener en el eje de ordenadas el valor P/D .
- f) Obtener P multiplicando el valor anterior por D .
- g) La carga total sobre el tubo será:

$$W_{\text{total}} = W + P \text{ (Kg/ml)}$$

Conclusiones.

Los resultados obtenidos por el método abreviado originan unas desviaciones sobre los resultados obtenidos por el ordenador inferiores al 5 por 100 incluso para alturas de recubrimiento de hasta siete metros.

Creemos que estos errores son más que aceptables, ya que en los datos de partida (características del terreno, dimensiones geométricas de la zanja, etc.) se cometen normalmente errores superiores.

Si consideramos finalmente que métodos abreviados semejantes aparecidos en algunas publicaciones y catálogos extranjeros dan errores de hasta un 100 por 100 para alturas de recubrimiento superiores a tres metros llegamos a la conclusión de que los errores producidos por el método expuesto son mínimos, por lo que podrá utilizarse con confianza en la mayoría de los casos prácticos.