

Anejo VII.Cálculo estructural

Proyecto básico de emisario submarino para la ampliación de la
desaladora Al-Gubrah (Omán)

GARCÍA GARCÍA, Bruno



ÍNDICE

1. Cálculo estructural	2
1.1. Cálculo de la presión vertical debido a la carga de tierras	3
1.2. Cálculo de la presión del terreno	5
1.3. Cálculo de la presión hidrostática	5
1.4. Cálculo de la presión hidrostática crítica.....	6
1.5. Cálculo de la deformación.....	7
1.6. Calculo del radio mínimo de doblado	7
1.7. Resultados	8



1. Cálculo estructural

Cualquier tubería destinada al transporte de agua a presión, ya sea en el ámbito urbano, como marino, se encuentra expuesta a acciones tanto externas, por el entorno en que se encuentre, como internas, a causa de la presión del fluido transportado.

En el apartado de cálculo estructural, para garantizar un correcto funcionamiento a lo largo de su vida útil, se realizan los cálculos para las comprobaciones y verificaciones exigibles a la tubería de acuerdo a la *“Guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión”* que basa las comprobaciones necesarias en lo especificado en la norma UNE 53331:1997 IN.

Para realizar las comprobaciones mencionadas se tiene en cuenta que un tramo de la tubería se proyecta para estar enterrada, tramo considerado más desfavorable debido a la acción conjunta de las tierras con el agua.

La comprobación de la estabilidad dimensional sirve para determinar el margen de seguridad entre la carga crítica y la carga realmente existente. Se realiza teniendo en cuenta las influencias de la presión del terreno, presión exterior del agua y la acción simultánea de ambas presiones.

De acuerdo a la UNE 53331:1997 IN la comprobación mencionada, se considera favorable si la relación entre la carga crítica y la real (coeficiente de seguridad al aplastamiento) es mayor que 2.5, según la siguiente expresión:

$$\eta_1 = \frac{Crit\ q_{vt}}{q_{vt}} \geq 2.5$$

De la misma forma, se considera favorable si la relación entre la carga crítica y la real (coeficiente de seguridad al aplastamiento por acción del agua) es mayor que 2.5, según la siguiente expresión:

$$\eta_2 = \frac{Crit\ p_e}{qp_e} \geq 2.5$$

La acción simultánea de las tierras y el agua, se considera favorable el coeficiente de seguridad al aplastamiento si es mayor o igual a 2.5 según la siguiente expresión:

$$\eta_3 = \frac{1}{\frac{Crit\ q_{vt}}{q_{vt}} + \frac{Crit\ p_e}{qp_e}} \geq 2.5$$



1.1. Cálculo de la presión vertical debido a la carga de tierras

Para poder llevar a cabo la comprobación del coeficiente de seguridad al aplastamiento por las tierras ($\eta_1 \geq 2.5$), es necesario calcular la carga vertical crítica q_{vt} y la carga vertical actuante q_v .

La determinación de la presión vertical de tierras a largo plazo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_v = m \cdot C_z \cdot \gamma \cdot H$$

Donde:

q_v : es la presión vertical sobre el tubo debido a la carga de tierras, en KN/m²

γ : es el peso específico del terreno $\gamma = 20$ KN/m³

H : es la diferencia de cota entre la corona de la tubería y el terreno. $H=1.5$ m

C_z : es el coeficiente de carga de las tierras en zanja o bajo terraplén, para un ángulo de zanja $\beta = 26,57^\circ$, ángulo de rozamiento interno $\rho=35^\circ$ (grupo de suelo 1)

$$C_z = 1 \quad \text{Para} \quad 0 \leq \beta < \rho$$

m : es el factor de concentración de la presión vertical

$$m = \frac{m_m \cdot V_s + \frac{(m_{m-1}) \cdot m_0 V_0}{1 - m_0}}{V_s + \frac{(m_{m-1}) \cdot V_0}{1 - m_0}}$$

Para el cálculo de m , es necesario definir primero los diferentes términos de la expresión.

- V_0

$$V_0 = \frac{(1 - K_2) \cdot P_j}{P_j - 0.25}$$

- m_0

$$m_0 = \frac{4 \cdot K_2}{3 + K_2}$$



*Donde K2 se obtiene de la tabla 2 de la norma y Pj se considera 1.

- m_m

$$m_m = \frac{\frac{H}{Dn}}{\frac{3.5}{Pj} + \frac{2.2 \cdot E_1}{E_4(Pj - 0.25)} + \frac{H}{Dn} \left(\frac{0.62}{Pj} + \frac{1.6 \cdot E_1}{E_4(Pj - 0.25)} \right)}$$

*Donde Dn es el diámetro nominal de la tubería, E_1 y E_4 son módulos de compresión del suelo.

- V_s

$$V_s = \frac{S_t \cdot Pj}{|Cv| \cdot E_2}$$

* S_t es la rigidez del tubo a largo plazo, se puede obtener, sabiendo que e es el espesor, R_m el radio medio y E_T el módulo de elasticidad del material del tubo, según la expresión:

$$S_t = \frac{E_T}{12} \left(\frac{e}{R_m} \right)^3$$

* $|Cv|$ corresponde al valor absoluto del coeficiente de deformación vertical del tubo, que se obtiene con la siguiente expresión:

$$|Cv| = C_{v1} + C_{v2} \cdot \delta$$

- C_{v1} y C_{v2} , factores de deformación vertical debido a q_v y q_{vt} , respectivamente, obtenidos de la tabla 7 (factores de deformación) de la norma.
- δ corresponde al coeficiente de reacción del relleno de la cama del tubo. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{C_{h1}}{Vt_s - C_{h2}}$$

Donde intervienen los factores de deformación horizontal, C_{h1} y C_{h2} debidos a q_v y q_{ht} , respectivamente. También interviene el coeficiente de rigidez del sistema tubo-suelo Vt_s y tiene por expresión:

$$Vt_s = \frac{S_t}{S_{sh}}$$



Cuyo cálculo consiste en la relación entre la, obtenida anteriormente, rigidez del tubo a largo plazo S_t , y la rigidez horizontal del relleno hasta la clave del tubo, S_{sh} en N/ mm² que se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$S_{sh} = 0,6 \cdot E_2 \cdot \xi$$

Donde ξ es el factor de corrección calculado por la siguiente expresión:

$$\xi = \frac{1,662 + 0,639 \left(\frac{B}{Dn} - 1 \right)}{\left(\frac{B}{Dn} - 1 \right) + \left(1,662 + 0,639 \left(\frac{B}{Dn} - 1 \right) \right) \cdot \frac{E_2}{E_3}}$$

1.2. Cálculo de la presión del terreno

La presión de aplastamiento crítica ($Crit q_{vt}$) se calcula, a corto y/o largo plazo, según la ecuación:

$$Crit q_{vt} = 2\sqrt{S_t \cdot S_{sh}}$$

Donde S_t y S_{sh} son valores ya definidos anteriormente.

1.3. Cálculo de la presión hidrostática

La presión hidrostática es la presión exterior del agua, referida al eje del tubo, en N/mm², y que se calcula según la ecuación:

$$Pe = \gamma_a \cdot \left(H_a + \frac{D_n}{2} \right) \cdot 10^{-3}$$

Donde:

γ_a : Es el peso específico del agua.



H_a : Es la diferencia de cota entre la superficie del agua y la corona de la tubería.

1.4. Cálculo de la presión hidrostática crítica

En caso de poder despreciar la carga del suelo respecto a la presión exterior del agua, la presión de aplastamiento crítica se calcula por:

$$Crit p_e = \alpha_D \cdot S_t$$

Donde:

S_t se ha calculado anteriormente.

$\alpha_D = f(V_{ts}, R_m/e)$: es el coeficiente de penetración que se determina en la figura 1:

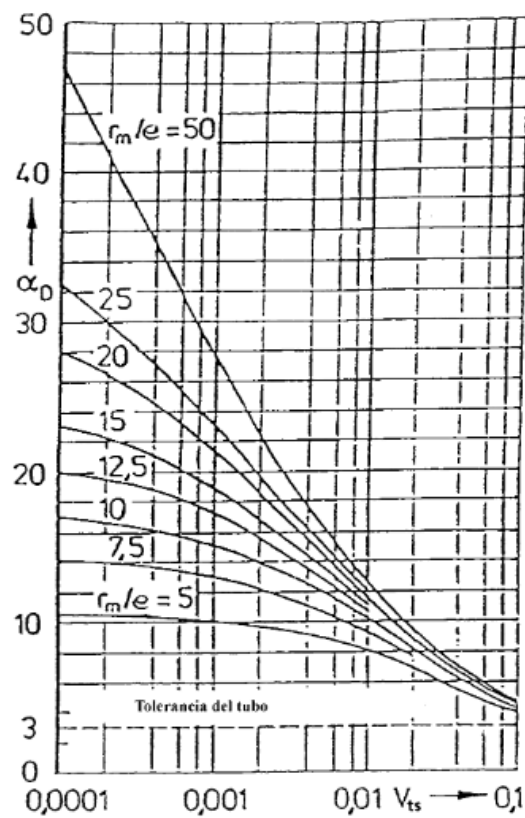


Figura 1: Coeficiente de deformación



1.5. Cálculo de la deformación

Con la distribución de cargas en la periferia del tubo, se calcula la variación del diámetro vertical, como consecuencia de las cargas externas, debiendo ser una deformación máxima a largo plazo menor o igual al 5%, según la siguiente ecuación:

$$\Delta D_v = |C_v| \frac{q_{vt} - q_h}{S_t} \cdot 2 \cdot Rm$$

Donde:

q_h : es la presión lateral del relleno sobre el tubo, en kN/ m², que se calcula mediante:

$$q_h = n \cdot C_z \cdot K_2 \cdot H$$

*Donde n es el factor de concentración de la presión lateral del suelo, y se calcula mediante la ecuación:

$$n = \frac{4 - m_1}{3}$$

El resultado de la comprobación de la deformación de la tubería a largo plazo queda reflejado en la tabla de resultados en el apartado de resultados.

1.6. Cálculo del radio mínimo de doblado

A lo largo del proceso constructivo, concretamente en el proceso de hundimiento, la tubería está sometida a unas exigencias de flexibilidad que pueden dañar la tubería provocando un pandeo excesivo en esta. Para evitar esta situación, en este apartado se realiza el cálculo del radio mínimo que debe tener el arco de circunferencia para no sufrir daños. Este apartado considera como referencia el libro *"Marine wastewater outfalls and treatment systems"* mencionado anteriormente.

El radio se calcula teniendo en cuenta en el proceso de doblado, la parte interior del tubo está sometida a compresión, y la exterior a tracción, de forma que el radio calculado es respecto al eje de la tubería. Este cálculo se realiza bajo la hipótesis de que la intensidad de los esfuerzos a los que está sometida la tubería es igual en la zona comprimida que en la zona traccionada. La tensión máxima se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_s = \frac{D}{2R_{min}}$$



Donde:

ε_s Equivale a la tensión máxima

D es el diámetro exterior de la tubería

R_{min} es el diámetro mínimo de doblado.

La relación de radio de curvatura es:

$$a = \frac{R_{min}}{D}$$

Cuya relación con la tensión máxima equivale a:

$$\varepsilon_s = \frac{1}{2a}$$

Teniendo en cuenta una serie de relaciones a partir de la tensión crítica, la guía consultada concluye que, la relación de curvatura permisible es:

$$a_{perm} = SF * \frac{DR - 1}{1.12}$$

Donde:

SF corresponde a un coeficiente de seguridad 1.5 o 2 que se aplica a la relación de curvatura crítica para obtener la relación de curvatura permisible.

El resultado del cálculo del radio mínimo de doblado queda reflejado en la tabla de resultados en el apartado de resultados.

1.7. Resultados

De acuerdo a la UNE 53331:1997 IN, y según lo explicado anteriormente en este apartado, la comprobaciones de seguridad ante la presión de la carga de tierras y del agua, se consideran favorables si el coeficiente a aplastamiento es mayor o igual a 2.5 según las ecuaciones:

$$\eta_1 = \frac{Crit q_{vt}}{q_{vt}} \geq 2,5$$

$$\eta_2 = \frac{Crit p_e}{qp_e} \geq 2,5$$

Y

$$\eta_3 = \frac{1}{\frac{Crit q_{vt}}{q_{vt}} + \frac{Crit p_e}{qp_e}} \geq 2,5$$



Quedando los resultados parciales y finales reflejados en las siguientes tablas:

Ø1200

η_1	17,6524949
η_2	3,2773699
η_3	2,76417244

Tabla 1: Resultados para Ø1200

δ_v	5,06%
------------	-------

Rmin	53,8795518
------	------------

Ø900

η_2	3,29642553
----------	------------

Tabla 2: Resultados para Ø900

Rmin	40,4401993
------	------------

Ø500

η_2	3,32495939
----------	------------

Tabla 3: Resultados para Ø500

Rmin	22,4803665
------	------------

Id	Valor
Dn (m)	1,2
e (m)	0,0459
rm (m)	1,1541
Ytubo (kN/d3)	9,5
H (m)	1,5
B	6,4
β	26,57
Et (N/mm2)	150
Cz90	0,93
Cz	0,97933444
Ytierras (kN/m3)	20
m	0,95255646
m1	0,95255646
mm	1,045
Pj	1
E1	2,5
E2	1,2

Id	Valor
ICvl	0,04034672
Cv1	-0,1053
Cv2	0,064
Ch1	0,0956
Ch2	-0,0658
δ	1,01489495
Vts	0,02839694
Ssh	0,6962688
ξ	0,96704
qv (KN/m2)	13,2934167
n	1,01581451
qh	0,59689329
Crit qvt	0,23466197
Pe	0,21115
Yagua	10,25
Ha	20
Crit Pe	0,69201665
ad	35



E3	0,8
E4	0,6
mo	0,47058824
K2	0,4
Vo	0,8
Vs	0,40837485
St	0,0197719

Tabla 4: Datos de cálculo para Ø1200

η_1	17,6524949
η_2	3,2773699
η_3	2,76417244
Adv	59,8023189
δv	5,06%
qht	12,8856375

Id	Valor
Dn (m)	0,9
e (m)	0,0344
rm (m)	0,8656
Ytubo (kN/d3)	9,5
H (m)	1,5
Et (N/mm2)	150
St	0,01974206
Pe	0,2096125
Yagua	10,25
Ha	20
Crit Pe	0,690972
ad	35
η_2	3,29642553

Tabla 5: Datos de cálculo para Ø900

Id	Valor
Dn (m)	0,5
e (m)	0,0191
rm (m)	0,4809
Ytubo (kN/d3)	9,5
H (m)	1,5
Et (N/mm2)	150
St	0,0197182
Pe	0,2075625
Yagua	10,25
Ha	20
Crit Pe	0,69013688
ad	35
η_2	3,32495939

Tabla 7: Datos de cálculo para Ø500

Rmin	53,8795518
DR	26,1437908
acrit	44,8996265
ϵ_s	0,01113595

Tabla 8: Datos para Rmin de Ø1200

Rmin	40,4401993
DR	26,1627907
acrit	44,9335548
ϵ_s	0,01112754

Tabla 7: Datos para Rmin de Ø900

Rmin	22,4803665
DR	26,1780105
acrit	44,960733
ϵ_s	0,01112082

Tabla 7: Datos para Rmin de Ø500