ANEJO Nº 8

CÁLCULOS MECÁNICOS

INDICE

1. INTRODUCCIÓN....1
2. CÁLCULO MECÁNICO DE LA TUBERÍA....2
2.1. TUBERÍA DE FUNDICIÓN....2
3. CÁLCULO DE LOS MACIZOS DE ANCLAJE....6
4. MACIZO DE ANCLAJE EN OBRA DE CONEXIÓN CON ADUCCIÓN DN800 11

APÉNDICES

APÉNDICE 1. CÁLCULO MECÁNICO TUBERÍA
APÉNDICE 2. MACIZOS DE ANCLAJE

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se incluye como Apéndice nº 1 el cálculo mecánico de la tubería de fundición dúctil, seleccionada para las conexiones de la estación elevadora con el sifón de Colmenar y la red de distribución municipal de Tres Cantos.

En el Apéndice nº 2 se adjunta las dimensiones de los macizos calculados según las hipótesis indicadas en la presente memoria. No obstante, el Contratista deberá justificar a la Dirección de la obra el cálculo de los macizos de anclaje que resulten finalmente necesarios según el trazado de las conducciones y presiones a las que estarán solicitados.

2. CÁLCULO MECÁNICO DE LA TUBERÍA

2.1. TUBERÍA DE FUNDICIÓN

El cálculo de las presiones de los tubos de función propuestos se basa en la norma UNE-EN 545. Según esta normativa las principales comprobaciones que deben hacerse en los tubos de fundición instalados en zanja son las siguientes:

- Hipótesis I. Presión interna (estado tensional)

En la hipótesis de actuación única de la presión interna del agua, debe comprobarse que dicha presión (para un determinado valor de DN y espesor e del tubo) produce un estado tensional inferior al admisible, supuesto el coeficiente de seguridad que se indica a continuación. Dicha comprobación puede hacerse mediante las siguientes expresiones:

$$DP \leq \frac{2 \bullet e \bullet R_m}{C_1 \bullet D_m} \qquad MDP \leq \frac{2 \bullet e \bullet Rm}{C_2 \bullet D_m}$$

Donde:

DP y MDP: presión de diseño y máxima de diseño, N/mm^2.
e: espesor de la pared del tubo:
D_m: diámetro medio del tubo en mm: D_m = OD - e.
OD: diámetro exterior del tubo, en mm.
R_m: resistencia mínima a la tracción 420 N/mm^2.
C_1: coeficiente de seguridad para DP. C_1 = 3
C_2: coeficiente de seguridad para MDP. C_2 = 2,5

- Hipótesis II. Acciones externas (deformaciones)

Debe comprobarse que, actuando únicamente las acciones externas (terreno, sobrecargas móviles o fijas y otras si existen), la deformación máxima debida a la flexión transversal no supera la admisible.

La ovalización máxima admisible para todas las clases de presión es el menor de los valores entre el calculado a partir del límite de tensión de flexión de la pared del tubo (λ_1) y el correspondiente al límite del revestimiento (λ_2).

La ovalización admisible limitada por la resistencia a la flexión de la fundición dúctil viene dada por la siguiente fórmula:

$$\lambda_1 = 100 \bullet \left[\frac{R_f \bullet (DE - e_{nom})}{SF \bullet E \bullet e_{nom} \bullet DF} \right]$$

Siendo:

λ_1= Ovalización admisible (%).

Rf= Resistencia la flexión del material de la pared del tubo (Rf=500 MPa).

E= Módulo de elasticidad del material (E=170.000 MPa).

DE= Diámetro exterior nominal del tubo (mm).

e_{nom}= Espesor nominal del tubo (mm).

$$e_{nom} = e_{\min} + (1{,}3 + 0{,}001 \bullet DN)$$

e_{min} espesor mínimo de la pared del tubo según UNE-EN 545

SF= Factor de seguridad (SF=1,5)

DF= Factor de deformación (DF=3,5)

En cuanto a la ovalización admisible limitada por los revestimientos internos de los tubos, para todas las clases de presión se establecen unos valores del 3 % para DN 80 a

DN 300 y del 4% para DN 800 o superiores. Los tamaños DN 350 a DN 700 siguen una interpolación lineal entre los límites del 3% y el 4%.

DN (mm)	λ_2 : Ovalización (%)
300	3,00
350	3,10
400	3,20
450	3,30
500	3,40
600	3,60
700	3,80
800	4,00

Las deformaciones producidas en el tubo por las cargas externas se calcularán mediante la fórmula de Spangler de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{100 \bullet K_a \bullet (W_e + W_t)}{8 \bullet S_c + 0{,}061 \bullet E'}$$

Siendo:

δ: deformación vertical del tubo debido a cargas externas, en %.

K_a: factor de apoyo en función del ángulo de apoyo 2α.

W_e: carga debida al peso de las tierras, en kN/m^2:

$$W_E = \gamma \bullet H$$

W_t: carga debida al tráfico, en KN/m^2:

$$W_T = 40 \bullet (1 - 2 \bullet 10^{-4} \bullet DN) \bullet \frac{\beta}{H}$$

DN: diámetro nominal del tubo, en mm.

S_c: rigidez circunferencial del tubo, en kN/m^2.

E': módulo de reacción del suelo, kN/m^2.

En nuestro caso se ha realizado el cálculo mecánico de las tuberías de fundición de DN 600 mm y DN 800 mm clase 40 para los siguientes casos extremos en cada diámetro:

- Altura de cobertura de 1,0 con carga de tráfico de vehículos pesados (casos A.1).
- Altura de cobertura de 3,0 m con carga de tráfico de vehículos pesados (casos A.3).
- Altura de cobertura de 5,0 m con carga de tráfico de vehículos pesados (casos A.5).

A continuación se incluye una tabla resumen donde se comprueba que en todos los casos se cumplen con las prescripciones exigidas en la norma UNE-EN 545 (los cálculos detallados se encuentran en el Apéndice nº 1):

	Hipótesis I. Presión interna			***Hipótesis II. Deformaciones***	
Caso de Estudio	*Comprobación*	*Coef. Seguridad Exigido*	*Coef. Seguridad Obtenido*	*Deformación Admisible (%)*	*Deformación Obtenida (%)*
A.1.600	*DP*	*3,00*	*5,169*	*3,24*	*2,24*
	MDP	*2,50*	*5,307*		
A.3.600	*DP*	*3,00*	*5,169*	*3,24*	*2,39*
	MDP	*2,50*	*5,307*		
A.1.800	*DP*	*3,00*	*4,080*	*3,32*	*2,02*
	MDP	*2,50*	*3,918*		
A.5.800	*DP*	*3,00*	*4,080*	*3,32*	*3,16*
	MDP	*2,50*	*3,918*		

3. CÁLCULO DE LOS MACIZOS DE ANCLAJE

En el Apéndice nº 2 se adjunta las dimensiones de los macizos calculados según las hipótesis indicadas en la presente memoria. No obstante, el Contratista deberá justificar a la Dirección de la obra el cálculo de los macizos de anclaje que resulten finalmente necesarios según el trazado de las conducciones y presiones a las que estarán solicitados.

Todos los elementos de la conducción que puedan estar sometidos a empujes por efecto de la presión hidráulica, tales como codos, derivaciones, conos de reducción y válvulas de seccionamiento o de regulación, deberán anclarse a un macizo de hormigón armado que contrarreste el empuje y asegure la inmovilidad de los mismos.

Se han considerado los siguientes tipos de macizos de anclaje:

a) Macizo de anclaje en codos horizontales.

b) Macizo de anclaje en codos en alzado.

El dimensionamiento de los macizos se ha realizado calculando la estabilidad de los mismos para un valor de 16,00 kg/cm^2 considerada máxima presión de diseño (MDP).

El macizo de anclaje se dispondrá por debajo del componente a anclar, excavando en el fondo de la zanja de la conducción y hormigonando contra el terreno. La geometría de los macizos se ha considerado con forma de un paralelepípedo recto de altura H y base cuadradas de lado L, equivalente al doble de la altura H.

- **Solicitaciones**

Siendo MDP el valor de la máxima presión de diseño, en las conducciones diseñadasn de agua regenerada, asciende a 16 kg/cm^2, el empuje hidráulico para los distintos componentes se obtiene aplicando las siguientes fórmulas:

Codo:

$$E = MDP \bullet \left(\pi \bullet \frac{ID^2}{4} \right) \bullet 2 \bullet sen\left(\frac{\theta}{2} \right)$$

ID=Diámetro interior de la conducción
θ=Ángulo de desviación

Derivación:

$$E = MDP \bullet \left(\pi \bullet \frac{IDD^2}{4} \right)$$

IDD=Diámetro interior de la derivación

Cono de reducción:

$$E = MDP \bullet (\pi \bullet (ID_1^{\ 2} - ID_2^{\ 2}) / 4)$$

ID1=Diámetro mayor de la reducción
ID2=Diámetro menor de la reducción

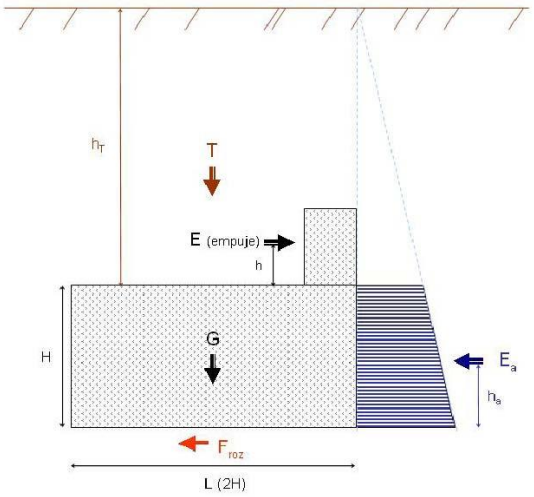
Válvula:

$$E = MDP \bullet \left(\pi \bullet \frac{ID^2}{4} \right)$$

ID= Diámetro interior de la conducción

- **Hipótesis de cálculo**

Las fuerzas que se oponen al empuje son la fuerza de rozamiento en la base del macizo debido al peso propio del macizo y peso del relleno que gravita sobre el mismo así como la colaboración del empuje activo del terreno en la pared lateral del macizo. El esquema general de las fuerzas actuando en el macizo son las indicadas en la figura siguiente:



El procedimiento de cálculo utilizado para unas dimensiones del paralelepípedo de anclaje garantiza unos coeficientes de seguridad a deslizamiento y vuelco determinados, y comprobando después que las tensiones transmitidas al terreno son admisibles.

El coeficiente de seguridad al deslizamiento será al menos de 1,50 mientras el coeficiente de seguridad a vuelco es de 1,80 para el empuje máximo en el anclaje.

$$C_{sd} = \frac{F_{estabilizadoras}}{F_{desestabilzadoras}} \geq 1{,}50$$

$$C_{sv} = \frac{M_{estabilizadoras}}{M_{desestabilzadoras}} \geq 1{,}80$$

Una vez dimensionado el macizo frente al deslizamiento y vuelco se comprobará que el terreno admite las presiones resultantes y que no superan las admisibles del terreno que se consideran mayores a 10 t/m^2.

De acuerdo con el Código Técnico de la Edificación CTE-SE-C, para realizar esta nueva comprobación, se calculará el área equivalente de la base del macizo como L_1*xL_2*, siendo:

L1*=L-2e

L2*=L

Siendo:

L= Lado del macizo de anclaje
e=Excentricidad en la dirección del empuje

La tensión final se obtendrá descontando al resultado obtenido de la aplicación del CTE, la presión del terreno desalojado durante su excavación, $\sigma_{ex}=\gamma x(ht+H)$, es decir:

$$\sigma = \frac{(G+T)}{L_1^* \times L_2^*} - \gamma \times (h_T + H) \leq 10\ t/m^2$$

Las dimensiones y armado de los macizos de anclaje para codos horizontales, presión de cálculo de 1,6 MPa y ángulos normalizados de 11º 15´, 22º 30´, 45º y 90º se han considerado las calculadas en las Normas para Redes de Abastecimiento de CYII Gestión (Versión 2012).

En el Apéndice 2, con las consideraciones indicadas en las Normas para el Abastecimiento de Agua de CYII (2012) se ha calculado los siguientes macizos de anclaje:

1) Codos horizontales para tubería de DN 600 mm y DN 800 mm, presión de cálculo de 1,6 MPa, formados por dos codos normalizados embridados para tres desviaciones angulares: 33º 75´, 56º 25´y 67º 50´

2) Codo horizontal para tubería doble de DN 600 mm y DN 800 mm, presión de cálculo de 1,6 MPa, formado por dos codos normalizados embridados para una desviación angular: 33º 75´.

3) Codos convexos que dispondrán de un volumen de hormigón Vg, tal que:

$$V_g = S_f \bullet \frac{T_y}{\rho_c}$$

Siendo:

T_y= Componente vertical del empuje

S_f= Coeficiente de seguridad de valor 1,5

ρ_c=Densidad del hormigón

4) Codos cóncavos en los que se dispondrá de una zapata de cimentación que transmite el empuje al terreno con una tensión admisible menor a 10 tn/m^2.

5) Conducciones instaladas en pendiente superior al 20% (11,31º). El esfuerzo de deslizamiento se equilibra con macizos de anclaje. El esfuerzo de deslizamiento a soportar por el macizo se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F_{deslizamiento} = P_{tubería} \times (sen\alpha - tg\varphi \times \cos\alpha)$$

Siendo

P, el peso del tramo de conducción situado entre dos macizos de anclaje.

α, es el ángulo formado por la conducción y la horizontal.

φ, es el ángulo de rozamiento entre la conducción y el terreno.

4. MACIZO DE ANCLAJE EN OBRA DE CONEXIÓN CON ADUCCIÓN DN800

Fuera de la arqueta de seccionamiento donde se realiza la conexión con la aducción DN 800 mm se diseña un macizo de anclaje que permite absorber el empuje debido al cierre de la válvula de seccionamiento o del codo convexo de 22,50º.

El macizo recubre la conducción, tiene unas dimensiones en planta de 3,50x3,50 m y altura variable entre 3,08 m y 3,78 m.

A continuación calculamos los coeficientes de seguridad al deslizamiento y al vuelco así como la tensión media y máxima a la que el macizo transmite al terreno.

1) Los empujes que solicitan el macizo son:

P máxima=773,00-714,60 =58,40 m.c.a.

$$E_{SECCIONAMIENTO} = 58{,}4 \times \frac{\pi \times 0{,}8^2}{4} = 29{,}355 \text{ ton.}$$

$$E_{CODO} = 2 \times 58{,}4 \times \frac{\pi \times 0{,}6^2}{4} \times Seno(11{,}25^o) = 6{,}442 \text{ ton.}$$

$$E_{CODO\ HORIZONTAL} = 2 \times 58{,}4 \times \frac{\pi \times 0{,}6^2}{4} \times Seno(11{,}25^o) \times Seno(22{,}50^o) = 2{,}465 \text{ ton.}$$

$$E_{CODO\ VERTICAL} = 2 \times 58{,}4 \times \frac{\pi \times 0{,}6^2}{4} \times Seno(11{,}25^o) \times Coseno(22{,}50^o) = 5{,}952 \text{ ton.}$$

2) El macizo tiene un peso (G):

$$G = (3{,}50 \times 3{,}50 \times 3{,}08 + 2{,}00 \times 3{,}50 \times 0{,}62 + 0{,}5 \times 1{,}50 \times 3{,}50 \times 0{,}62) \times 2{,}3 - 1{,}002$$

=99,502 ton

3) Coeficiente de seguridad al deslizamiento

$$C_{sd} = \frac{tg\phi \bullet R_V + E_A}{R_H} \geq 1{,}50$$

Siendo,

Csd= Coeficiente de seguridad al deslizamiento > 1,50

R_V= Reacción vertical (peso del macizo+peso del relleno que gravita)

E_A= Empuje activo del terreno

R_H= Reacción horizontal

ϕ= Ángulo de rozamiento del terreno= 27,00 º

tg 27º= 0,510

$$E_A = 0{,}50 \times 0{,}376 \times 1{,}80 \times 3{,}50 \times 2{,}60^2 = 8{,}006\ ton$$

$$C_{sd} = \frac{0{,}510 \bullet 99{,}502 + 8{,}006}{29{,}355} = 2{,}001$$

4) Coeficiente de seguridad al vuelco

$$C_{SV} = \frac{M_{estabilizadores}}{M_{volcadores}} = \frac{(G+T) \bullet H + E_A \bullet h_a}{E \bullet h} \geq 1{,}80$$

Momentos volcadores:

$$M_{VOLCADOR} = Empuje \times h = 29{,}355 \times (714{,}60 - 712{,}00) = 76{,}323\ ton_x m$$

Momentos estabilizadores:

$$M_{ESTABILIZADOR} = G \times H + E_A \times h_a = 99{,}502 \times 1{,}50 + 8{,}006 \times 0{,}866 = 156{,}186\ ton_x m$$

$$C_{SV} = \frac{M_{estabilizador}}{M_{volcador}} = \frac{156{,}186}{76{,}323} = 2{,}046$$

5) Excentricidad en la dirección del empuje y tensión admisible en el terreno

$$e = \frac{M_0}{N_0}$$

Si e < L/6 Se tienen compresiones en toda la sección

Si e >L/6 Se tienen compresiones en parte de la sección

$$M_0 = E \bullet H - \gamma \bullet A \bullet K_A \bullet \frac{H^3}{6} =$$

M_O=29,355X2,60-1,80$_X$3,50$_X$0,376$_X$1/6$_X$2,60^3=69,384 Tonxm

N_0=99,502 Tonxm

$$e = \frac{M_0}{N_0} = \frac{69{,}384}{99{,}502} = 0{,}697\ m\ > \frac{L}{6}$$

$$Si\ e > L/6 \qquad \sigma_{MEDIO} = \frac{G}{B \bullet A} \qquad Siendo\ B = 3 \bullet \left(\frac{L}{2} - e\right) \qquad \sigma_{MÁXIMA} = 2 \bullet \sigma_{MEDIA}$$

σ_{media}=9,00 ton/m^2

$\sigma_{máxima}$=18,00 ton/m^2

APÉNDICE 1. CÁLCULOS MECÁNICOS TUBERÍA

CÁLCULO TUBERÍA DE FUNDICIÓN DÚCTIL (UNE-EN 545)

DN	Diámetro nominal	600 mm	
e	Espesor mínimo de la pared del tubo	8,9 mm	
OD	Diámetro exterior del tubo	635 mm	
DP	Presión de diseño	78,58 m.c.a.	0,770084 MPa
MDP	Presión máxima de diseño	91,83 m.c.a.	0,899934 MPa
C	Clase de presión	40	
PFA	Presión de funcionamiento admisible	40 bar	0,392 MPa
PMA	Presión máxima admisible	48 bar	0,4704 MPa
PEA	Presión de prueba en obra admisible	53 bar	0,5194 MPa
2α	Ángulo de apoyo	120 °	
H=	Altura de tierras	1,00 m	
β=	Coeficiente de carga de tráfico	1,5	
E'	Módulo de reacción del suelo	1.000 kN/m^2	

1. Estado tensional por presión hidráulica positiva

Dm	Diámetro medio del tubo	626,1 mm
Rm	Resistencia mínima a la tracción	420 MPa
C1	Coficiente de seguridad para DP	3,0
C2	Coficiente de seguridad para MDP	2,5

$$DP \le PFA = \frac{2 \bullet e \bullet R_m}{D_m \bullet C_1} \qquad MDP \le PMA = \frac{2 \bullet e \bullet R_m}{D_m \bullet C_2}$$

			Coeficiente de seguridad obtenido
PFA	3,9802 MPa	Válido;DP<PFA	5,169
PMA	4,7762 MPa	Válido;MDP<PMA	5,307

2. Estado deformacional por acciones externas

2.1. Ovalización máxima admisible por límite de tensión de flexión λ_1= 3,24%

$$\lambda = 100 \bullet \left[\frac{R_f \bullet (DE - e_{nom})}{SF \bullet E \bullet e_{nom} \bullet DF} \right]$$

λ= Ovalización admisible (%)
Rf= Resistencia a la flexión del material de la pared del tubo (Rf=500 MPa)
DE= Diámetro exterior nominal del tubo (mm)
e_{nom} Espesor nominal de la pared del tubo (mm).

$$e_{nom} = e_{\min} + (1{,}3 + 0{,}001 \bullet DN)$$

SF Factor de seguridad (SF=1,5)
E= Módulo de elasticidad del material (E=170.000 MPa)
DF= Factor de deformación (DF=3,5)

2.2. Ovalización máxima admisible por límite del revestimiento λ_2= 3,60%

DN (mm)	Ovalización (%)
300	3,00%
350	3,10%
400	3,20%
450	3,30%
500	3,40%
600	3,60%
700	3,80%
800	4,00%

2.3. Deformación bajo cargas externas δ= 2,24% Válido

$$\delta = \frac{100 \bullet K_a \bullet (W_e + W_t)}{8 \bullet S_c + (0{,}061 \bullet E')}$$

δ= Ovalización producida en el tubo debida a cargas externas (%)

Ka= Factor de apoyo 0,09

Ángulo de apoyo (2α)	Ka
20	0,110
45	0,105
60	0,102
120	0,090
180	0,083

We= Carga debida al peso de las tierras (kN/m^2) 20,00

$$We = \gamma \bullet H$$

γ= Peso específico del relleno (kN/m^3)

H= Altura de tierras sobre la clave del tubo (m)

Wt= Carga debida al tráfico (kN/m^2) 52,80

$$W_t = 40 \bullet (1 - 0{,}0002 \bullet DN) \bullet \frac{\beta}{H}$$

β= Coeficiente de carga de tráfico

Tipo de tráfico	β
Zonas con cargas rodantes particularmente elevadas	2,00
Carreteras sin prohibición de tráficos de vehículos pesados	1,50
Carreteras con prohibición de tráficos de vehículos pesados	0,75
Zonas rurales (casos no incluidos en los anteriores)	0,50

DN= Diámetro nominal del tubo (mm)

Sc= Rigidez circunferencial específica (kN/m^2) 28,87

$$S_C = 1.000 \bullet \frac{E}{12} \bullet \left(\frac{e_{stiff}}{D}\right)^3$$

e stiff= Espesor nominal de la pared del tubo para el cálculo de la rigidez circunferencial (mm) 7,95

$$e_{stiff} = e_{\min} + 0{,}5 \bullet (1{,}3 + 0{,}001 \bullet DN)$$

D= Diámetro medio del tubo (mm) 627,05

$$D = DE - e_{stiff}$$

E'= Módulo de reacción del suelo (kN/m^2) 1.000

Tipo de compactación del terreno	E' (kN/m^2)
Sin compactar	0
Mala	1.000
Media	2.000
Buena	5.000

CÁLCULO TUBERÍA DE FUNDICIÓN DÚCTIL (UNE-EN 545)

DN	Diámetro nominal	**600 mm**	
e	Espesor mínimo de la pared del tubo	**8,9 mm**	
OD	Diámetro exterior del tubo	**635 mm**	
DP	Presión de diseño	**78,58 m.c.a.**	0,770084 MPa
MDP	Presión máxima de diseño	**91,83 m.c.a.**	0,899934 MPa
C	Clase de presión	**40**	
PFA	Presión de funcionamiento admisible	40 bar	0,392 MPa
PMA	Presión máxima admisible	48 bar	0,4704 MPa
PEA	Presión de prueba en obra admisible	53 bar	0,5194 MPa
2α	Ángulo de apoyo	**120 °**	
H=	Altura de tierras	**3,00 m**	
β=	Coeficiente de carga de tráfico	**1,5**	
E´	Módulo de reacción del suelo	**1.000 kN/m²**	

1. Estado tensional por presión hidráulica positiva

Dm	Diámetro medio del tubo	626,1 mm
Rm	Resistencia mínima a la tracción	420 MPa
C1	Coficiente de seguridad para DP	3,0
C2	Coficiente de seguridad para MDP	2,5

$$DP \le PFA = \frac{2 \bullet e \bullet R_m}{D_m \bullet C_1} \qquad MDP \le PMA = \frac{2 \bullet e \bullet R_m}{D_m \bullet C_2}$$

			Coeficiente de seguridad obtenido
PFA	3,9802 MPa	Válido;DP<PFA	5,169
PMA	4,7762 MPa	Válido;MDP<PMA	5,307

2. Estado deformacional por acciones externas

2.1. Ovalización máxima admisible por límite de tensión de flexión λ_1= 3,24%

$$\lambda = 100 \bullet \left[\frac{R_f \bullet (DE - e_{nom})}{SF \bullet E \bullet e_{nom} \bullet DF} \right]$$

λ= Ovalización admisible (%)
Rf= Resistencia a la flexión del material de la pared del tubo (Rf=500 MPa)
DE= Diámetro exterior nominal del tubo (mm)
e_{nom} Espesor nominal de la pared del tubo (mm).

$$e_{nom} = e_{\min} + (1,3 + 0,001 \bullet DN)$$

SF Factor de seguridad (SF=1,5)
E= Módulo de elasticidad del material (E=170.000 MPa)
DF= Factor de deformación (DF=3,5)

2.2. Ovalización máxima admisible por límite del revestimiento λ_2= 3,60%

DN (mm)	Ovalización (%)
300	3,00%
350	3,10%
400	3,20%
450	3,30%
500	3,40%
600	3,60%
700	3,80%
800	4,00%

2.3. Deformación bajo cargas externas δ= 2,39% Válido

$$\delta = \frac{100 \bullet K_a \bullet (W_e + W_t)}{8 \bullet S_c + (0{,}061 \bullet E')}$$

δ= Ovalización producida en el tubo debida a cargas externas (%)

Ka= Factor de apoyo 0,09

Ángulo de apoyo (2α)	Ka
20	0,110
45	0,105
60	0,102
120	0,090
180	0,083

We= Carga debida al peso de las tierras (kN/m^2) 60,00

$$We = \gamma \bullet H$$

γ= Peso específico del relleno (kN/m^3)

H= Altura de tierras sobre la clave del tubo (m)

Wt= Carga debida al tráfico (kN/m^2) 17,60

$$W_t = 40 \bullet (1 - 0{,}0002 \bullet DN) \bullet \frac{\beta}{H}$$

β= Coeficiente de carga de tráfico

Tipo de tráfico	β
Zonas con cargas rodantes particularmente elevadas	2,00
Carreteras sin prohibición de tráficos de vehículos pesados	1,50
Carreteras con prohibición de tráficos de vehículos pesados	0,75
Zonas rurales (casos no incluidos en los anteriores)	0,50

DN= Diámetro nominal del tubo (mm)

Sc= Rigidez circunferencial específica (kN/m^2) 28,87

$$S_C = 1.000 \bullet \frac{E}{12} \bullet \left(\frac{e_{stiff}}{D}\right)^3$$

e stiff= Espesor nominal de la pared del tubo para el cálculo de la rigidez circunferencial (mm) 7,95

$$e_{stiff} = e_{\min} + 0{,}5 \bullet (1{,}3 + 0{,}001 \bullet DN)$$

D= Diámetro medio del tubo (mm) 627,05

$$D = DE - e_{stiff}$$

E´= Módulo de reacción del suelo (kN/m^2) 1.000

Tipo de compactación del terreno	E´ (kN/m^2)
Sin compactar	0
Mala	1.000
Media	2.000
Buena	5.000

CÁLCULO TUBERÍA DE FUNDICIÓN DÚCTIL (UNE-EN 545)

DN	Diámetro nominal	800 mm	
e	Espesor mínimo de la pared del tubo	11,9 mm	
OD	Diámetro exterior del tubo	842 mm	
DP	Presión de diseño	100,4 m.c.a.	0,98392 MPa
MDP	Presión máxima de diseño	125,46 m.c.a.	1,229508 MPa
C	Clase de presión	40	
PFA	Presión de funcionamiento admisible	40 bar	0,392 MPa
PMA	Presión máxima admisible	48 bar	0,4704 MPa
PEA	Presión de prueba en obra admisible	53 bar	0,5194 MPa
2α	Ángulo de apoyo	120 °	
H=	Altura de tierras	1,00 m	
β=	Coeficiente de carga de tráfico	1,5	
E'	Módulo de reacción del suelo	1.000 kN/m^2	

1. Estado tensional por presión hidráulica positiva

Dm	Diámetro medio del tubo	830,1 mm
Rm	Resistencia mínima a la tracción	420 MPa
C1	Coficiente de seguridad para DP	3,0
C2	Coficiente de seguridad para MDP	2,5

$$DP \le PFA = \frac{2 \bullet e \bullet R_m}{D_m \bullet C_1} \qquad MDP \le PMA = \frac{2 \bullet e \bullet R_m}{D_m \bullet C_2}$$

			Coeficiente de seguridad obtenido
PFA	4,0140 MPa	Válido;DP<PFA	4,080
PMA	4,8168 MPa	Válido;MDP<PMA	3,918

2. Estado deformacional por acciones externas

2.1. Ovalización máxima admisible por límite de tensión de flexión λ_1= 3,32%

$$\lambda = 100 \bullet \left[\frac{R_f \bullet (DE - e_{nom})}{SF \bullet E \bullet e_{nom} \bullet DF} \right]$$

λ= Ovalización admisible (%)
Rf= Resistencia a la flexión del material de la pared del tubo (Rf=500 MPa)
DE= Diámetro exterior nominal del tubo (mm)
e_{nom} Espesor nominal de la pared del tubo (mm).

$$e_{nom} = e_{\min} + (1,3 + 0,001 \bullet DN)$$

SF Factor de seguridad (SF=1,5)
E= Módulo de elasticidad del material (E=170.000 MPa)
DF= Factor de deformación (DF=3,5)

2.2. Ovalización máxima admisible por límite del revestimiento λ_2= 4,00%

DN (mm)	Ovalización (%)
300	3,00%
350	3,10%
400	3,20%
450	3,30%
500	3,40%
600	3,60%
700	3,80%
800	4,00%

2.3. Deformación bajo cargas externas δ= 2,02% Válido

$$\delta = \frac{100 \bullet K_a \bullet (W_e + W_t)}{8 \bullet S_c + (0{,}061 \bullet E')}$$

δ= Ovalización producida en el tubo debida a cargas externas (%)

Ka= Factor de apoyo 0,09

Ángulo de apoyo (2α)	Ka
20	0,110
45	0,105
60	0,102
120	0,090
180	0,083

We= Carga debida al peso de las tierras (kN/m^2) 20,00

$$We = \gamma \bullet H$$

γ= Peso específico del relleno (kN/m^3)

H= Altura de tierras sobre la clave del tubo (m)

Wt= Carga debida al tráfico (kN/m^2) 50,40

$$W_t = 40 \bullet (1 - 0{,}0002 \bullet DN) \bullet \frac{\beta}{H}$$

β= Coeficiente de carga de tráfico

Tipo de tráfico	β
Zonas con cargas rodantes particularmente elevadas	2,00
Carreteras sin prohibición de tráficos de vehículos pesados	1,50
Carreteras con prohibición de tráficos de vehículos pesados	0,75
Zonas rurales (casos no incluidos en los anteriores)	0,50

DN= Diámetro nominal del tubo (mm)

Sc= Rigidez circunferencial específica (kN/m^2) 31,52

$$S_C = 1.000 \bullet \frac{E}{12} \bullet \left(\frac{e_{stiff}}{D} \right)^3$$

e stiff= Espesor nominal de la pared del tubo para el cálculo de la rigidez circunferencial (mm) 10,85

$$e_{stiff} = e_{\min} + 0{,}5 \bullet (1{,}3 + 0{,}001 \bullet DN)$$

D= Diámetro medio del tubo (mm) 831,15

$$D = DE - e_{stiff}$$

E´= Módulo de reacción del suelo (kN/m^2) 1.000

Tipo de compactación del terreno	E´ (kN/m^2)
Sin compactar	0
Mala	1.000
Media	2.000
Buena	5.000

CÁLCULO TUBERÍA DE FUNDICIÓN DÚCTIL (UNE-EN 545)

DN	Diámetro nominal	800 mm	
e	Espesor mínimo de la pared del tubo	11,9 mm	
OD	Diámetro exterior del tubo	842 mm	
DP	Presión de diseño	100,4 m.c.a.	0,98392 MPa
MDP	Presión máxima de diseño	125,46 m.c.a.	1,229508 MPa
C	Clase de presión	40	
PFA	Presión de funcionamiento admisible	40 bar	0,392 MPa
PMA	Presión máxima admisible	48 bar	0,4704 MPa
PEA	Presión de prueba en obra admisible	53 bar	0,5194 MPa
2α	Ángulo de apoyo	120 °	
H=	Altura de tierras	5,00 m	
β=	Coeficiente de carga de tráfico	1,5	
E´	Módulo de reacción del suelo	1.000 kN/m^2	

1. Estado tensional por presión hidráulica positiva

Dm	Diámetro medio del tubo	830,1 mm
Rm	Resistencia mínima a la tracción	420 MPa
C1	Coficiente de seguridad para DP	3,0
C2	Coficiente de seguridad para MDP	2,5

$$DP \le PFA = \frac{2 \bullet e \bullet R_m}{D_m \bullet C_1} \qquad MDP \le PMA = \frac{2 \bullet e \bullet R_m}{D_m \bullet C_2}$$

			Coeficiente de seguridad obtenido
PFA	4,0140 MPa	Válido;DP<PFA	4,080
PMA	4,8168 MPa	Válido;MDP<PMA	3,918

2. Estado deformacional por acciones externas

2.1. Ovalización máxima admisible por límite de tensión de flexión λ_1= 3,32%

$$\lambda = 100 \bullet \left[\frac{R_f \bullet (DE - e_{nom})}{SF \bullet E \bullet e_{nom} \bullet DF} \right]$$

λ= Ovalización admisible (%)
Rf= Resistencia a la flexión del material de la pared del tubo (Rf=500 MPa)
DE= Diámetro exterior nominal del tubo (mm)
e_{nom} Espesor nominal de la pared del tubo (mm).

$$e_{nom} = e_{\min} + (1,3 + 0,001 \bullet DN)$$

SF Factor de seguridad (SF=1,5)
E= Módulo de elasticidad del material (E=170.000 MPa)
DF= Factor de deformación (DF=3,5)

2.2. Ovalización máxima admisible por límite del revestimiento λ_2= 4,00%

DN (mm)	Ovalización (%)
300	3,00%
350	3,10%
400	3,20%
450	3,30%
500	3,40%
600	3,60%
700	3,80%
800	4,00%

2.3. Deformación bajo cargas externas δ= 3,16% Válido

$$\delta = \frac{100 \bullet K_a \bullet (W_e + W_t)}{8 \bullet S_c + (0{,}061 \bullet E')}$$

δ= Ovalización producida en el tubo debida a cargas externas (%)

Ka= Factor de apoyo 0,09

Ángulo de apoyo (2α)	Ka
20	0,110
45	0,105
60	0,102
120	0,090
180	0,083

We= Carga debida al peso de las tierras (kN/m²) 100,00

$$We = \gamma \bullet H$$

γ= Peso específico del relleno (kN/m³)

H= Altura de tierras sobre la clave del tubo (m)

Wt= Carga debida al tráfico (kN/m²) 10,08

$$W_t = 40 \bullet (1 - 0{,}0002 \bullet DN) \bullet \frac{\beta}{H}$$

β= Coeficiente de carga de tráfico

Tipo de tráfico	β
Zonas con cargas rodantes particularmente elevadas	2,00
Carreteras sin prohibición de tráficos de vehículos pesados	1,50
Carreteras con prohibición de tráficos de vehículos pesados	0,75
Zonas rurales (casos no incluidos en los anteriores)	0,50

DN= Diámetro nominal del tubo (mm)

Sc= Rigidez circunferencial específica (kN/m²) 31,52

$$S_C = 1.000 \bullet \frac{E}{12} \bullet \left(\frac{e_{stiff}}{D}\right)^3$$

e stiff= Espesor nominal de la pared del tubo para el cálculo de la rigidez circunferencial (mm) 10,85

$$e_{stiff} = e_{\min} + 0{,}5 \bullet (1{,}3 + 0{,}001 \bullet DN)$$

D= Diámetro medio del tubo (mm) 831,15

$$D = DE - e_{stiff}$$

E'= Módulo de reacción del suelo (kN/m²) 1.000

Tipo de compactación del terreno	E' (kN/m²)
Sin compactar	0
Mala	1.000
Media	2.000
Buena	5.000

APÉNDICE 2. MACIZOS DE ANCLAJE

CÁLCULO MACIZOS DE ANCLAJE EN CODOS HORIZONTALES

1) Empuje

$$E = 2 \bullet P \bullet (\Pi \bullet \frac{D^2}{4}) \bullet sen\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

P= Presión máxima de diseño
D= Diámetro interior de la conducción
θ= Ángulo de desviación

2) Estabilidad

2.1. Coeficiente seguridad frente al deslizamiento

$$C_{sd} = \frac{tg\,\phi \bullet R_V + E_A}{R_H} = \frac{\mu \bullet (G + T) + E_A}{E} \geq 1{,}50$$

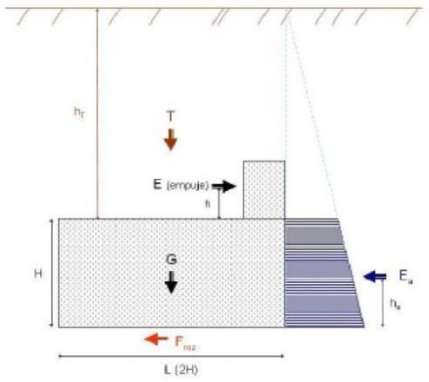
C_{sd}= Coeficiente de seguridad al deslizamiento > 1,5
R_V= Reacción vertical (peso del macizo+peso del relleno que gravita)
E_A= Empuje activo del terreno
R_H= Reacción horizontal
ϕ= Ángulo de rozamiento del terreno= 27,00 ° tg ϕ= 0,510

$$K_A = tg^2(45 - \frac{\phi}{2}) = ,376$$

$$E_A = \frac{1}{2} \bullet \gamma \bullet (H_1^2 - h_t^2) \bullet A \bullet tg^2(45 - \frac{\phi}{2})$$ Resultante total

$$E_{A1} = Ka \bullet \gamma \bullet A \bullet h_t \bullet H$$ Resultante aplicada a H/2 sobre base macizo

$$E_{A2} = 0{,}50 \bullet Ka \bullet \gamma \bullet A \bullet H^2$$ Resultante aplicada a H/3 sobre base macizo



γ= Peso específico del suelo=1,80 ton/m^3
H_1= Distancia nivel suelo a base bloque (H+ht)
ht= Distancia nivel suelo a parte superior bloque
A= Ancho bloque de hormigón en contacto con el suelo

2.2. Coeficiente seguridad al vuelco

$$C_{SV} = \frac{M_{estabilizadores}}{M_{volcadores}} = \frac{(G+T) \bullet H + E_A \bullet h_a}{E \bullet (h+H)} \geq 1{,}80$$

CÁLCULO MACIZOS DE ANCLAJE EN CODOS HORIZONTALES

3) Tensión admisible del terreno

3.1. Excentricidad en la dirección del empuje y tensión final (CTE-SE-C)

$$e = \frac{M_0}{N_0}$$

< L/6 Compresiones en toda la sección

> L/6 Compresiones en parte de sección

$$N_0 = T + G$$

$$M_0 = E \bullet (H + h) - \gamma \bullet A \bullet K_A \bullet \left[h_t \bullet \frac{H^2}{2} + \frac{H^3}{6} \right]$$

$$\sigma_{FINAL} = \frac{(G+T)}{L_1 \bullet L_2} - \gamma \bullet (h_T + H) \leq 10\ t/m^2)$$

Donde:

L1= L-2 . e
L2= L

3.2. Esfuerzos en la base

$$Si\ e < L/6 \quad \cdots\cdots \quad \sigma_{MEDIO} = \frac{G+T}{L \bullet A} \quad \cdots\cdots \quad \sigma = \frac{R_v}{A \bullet L} \pm \frac{R_H \bullet h_e \bullet L/2}{\frac{1}{12} \bullet A \bullet L^3} = \frac{R_v}{A \bullet L} \pm \frac{6 \bullet R_H \bullet h_e}{A \bullet L^2}$$

$$Si\ e > L/6 \quad \cdots\cdots \quad \sigma_{MEDIO} = \frac{G+T}{B \bullet A} \quad \cdots\cdots \quad Siendo\ B = 3 \bullet \left(\frac{L}{2} - e \right) \quad \cdots\cdots \quad \sigma_{MÁXIMA} = 2 \bullet \sigma_{MEDIA}$$

Donde:

Rv= Reacción vertical (G+T)
R_H= Reacción horizontal
A= Ancho de la base del macizo de hormigón
L= Largo de la base del macizo de hormigón
he= Distancia del eje de la tubería a la base del macizo

CÁLCULO MACIZOS DE ANCLAJE EN CODOS HORIZONTALES

CODOS COMPUESTOS CON EXTREMOS EMBRIDADOS (TIPO 2)																	
MDP	16,00 MPa			Dimensiones macizo			Alturas de aplicación acciones				Estabilidad		Tensión final (CYII)		Tensiones		
DN (mm)	ID (mm)	°	E(t)	L(m)	H (m)	Vol (m^3)	h_T (m)	h (m)	ha_1 (m)	ha_2 (m)	Csd	Csv	Excentricidad (m)	σ final (t/m^2)	σ_{medio} (t/m^2)	σ_{minima} (t/m^2)	σ_{maxima} (t/m^2)
600	600	33,75	26,78	3,10	1,55	14,90	1,90	0,60	0,78	0,517	1,60	1,91	0,767	7,62	9,22	0,00	18,44
600	600	56,25	43,49	3,70	1,85	25,33	1,90	0,60	0,93	0,617	1,53	1,93	0,912	8,38	10,09	0,00	20,18
600	600	67,50	51,26	4,00	2,00	32,00	1,90	0,60	1,00	0,667	1,58	2,03	0,930	7,98	10,00	0,00	20,00
800	800	33,75	47,61	3,90	1,95	29,66	2,10	0,70	0,98	0,650	1,68	2,05	0,894	7,97	10,18	0,00	20,35
800	800	56,25	77,32	4,70	2,35	51,91	2,10	0,70	1,18	0,783	1,65	2,13	1,038	8,44	10,96	0,00	21,93
800	800	67,50	91,13	5,10	2,55	66,33	2,10	0,70	1,28	0,850	1,73	2,27	1,049	8,01	10,92	0,00	21,84

CODOS DOBLES (TIPO 3)																		
MDP	16,00 MPa				Dimensiones macizo			Alturas de aplicación acciones				Estabilidad		Tensión final (CYII)		Tensiones		
DN (mm)	ID1 (mm)	ID2 (mm)	°	E(t)	L(m)	H (m)	Vol (m^3)	h_T (m)	h (m)	ha_1 (m)	ha_2 (m)	Csd	Csv	excentricidad (m)	σ final (t/m^2)	σ_{medio} (t/m^2)	σ_{minima} (t/m^2)	σ_{maxima} (t/m^2)
800 y 600	800	600	33,75	74,40	4,70	2,35	51,91	2,10	0,70	1,18	0,783	1,72	2,21	1,118	9,515	11,68	0,00	23,37

CÁLCULO MACIZOS DE ANCLAJE EN ELEMENTOS VERTICALES

Codos convexos										
MDP	16,00 MPa			Dimensiones macizo				Armaduras		
DN (mm)	ID (mm)	º	E(t)	A(m)	H (m)	L (m)	$V_{hormigón}$ (m^3)	S1(cm^2)	S2(cm^2)	S1*(cm^2)
600	600	11,25	9,04	1,40	0,96	3,00	5,90	5 ϕ16 (10,05)	4 ϕ16 (8,04)	1 ϕ16 (2,01)
600	600	22,50	18,00	1,40	2,36	3,00	11,74	6 ϕ 20 (18,85)	5 ϕ16 (10,05)	1 ϕ 20 (3,14)
800	800	11,25	16,08	1,60	1,72	3,00	10,49	6 ϕ 20 (18,85)	6 ϕ16 (12,06)	2 ϕ 20 (6,28)
800	800	22,50	32,00	1,60	3,89	3,00	20,87	7 ϕ 20 (21,99)	6 ϕ16 (12,06)	3 ϕ 20 (6,28)

Codos cóncavos							
MDP	16,00 MPa						
DN (mm)	ID (mm)	º	E(t)	L(m)	A (m)	S (m^2)	σ (ton/m^2)
600	600	11,25	9,04	1,20	1,40	1,68	5,38
600	600	22,50	18,00	1,30	1,40	1,82	9,89
600	600	45,00	35,31	2,55	1,40	3,57	9,89
800	800	11,25	16,08	1,20	1,60	1,92	8,37
800	800	22,50	32,00	2,00	1,60	3,20	10,00
800	800	45,00	62,77	3,95	1,60	6,32	9,93

Anclaje de tramos de 12 m de longitud con pendiente >20%								
MDP	16,00 MPa			Macizo			Armaduras	
DN (mm)	ID (mm)	º	$F_{deslizamiento}$ (t)	L(m)	H (m)	Vol (m3)	S1 (cm2)	S2 (cm2)
600	600	15,00	0,48	0,80	0,40	0,26	3 ϕ12 (3,39)	3 ϕ12 (3,39)
600	600	30,00	1,88	1,20	0,60	0,86	3 ϕ12 (3,39)	3 ϕ12 (3,39)
800	800	15,00	0,82	0,90	0,45	0,36	3 ϕ12 (3,39)	3 ϕ12 (3,39)
800	800	30,00	3,20	1,40	0,70	1,37	4 ϕ12 (4,52)	4 ϕ12 (4,52)