NOKSEL ESPAÑA, S.A.

HEAD QUARTER / MADRID
Av. Mediterráneo 5, 1ºG
28007 Madrid – ESPAÑA
Tel: (+0034) 91 535 17 90,
Fax: (+0034)91 534 69 42
Mail: nokselspain@noksespain.com

FACTORY / LORCA
Autovía del Mediterráneo, km 644
Avda. Río Narcea, s/n, Parcela X-1
Pol. Ind. Saprelorca, buzón nº216
30817 Lorca (Murcia) – ESPAÑA
Tel: (+0034) 968 925 002

CÁLCULO MECÁNICO DE LA TUBERÍA

"PROYECTO DE TUBERIAS DE ACERO HELICOSOLDADO PARA LA COMUNIDAD DE REGANTES DE CASTRONUÑO"

El objeto del presente documento es la presentación de las tuberías de acero helicosoldado y su análisis y comprobación para el caso concreto del proyecto de **"PROYECTO DE TUBERIAS DE ACERO HELICOSOLDADO PARA LA COMUNIDAD DE REGANTES DE CASTRONUÑO"**. Uno de los elementos principales de la infraestructura hidráulica de una comunidad de regantes, si no el principal, será la red de conducciones, lo que implica que las tuberías deben ser valoradas conjuntamente con el proyecto en su globalidad, no como un elemento independiente, aislado, o fácilmente sustituible y que pueda ser el principal objeto de ahorro del proyecto por su gran medición.

Las condiciones de suministro, de puesta en obra, la garantía de durabilidad, las garantías en el montaje, las necesarias e inevitables piezas especiales proyectadas, la realidad en cuanto al manejo de la red en su explotación (modificaciones, ampliaciones, reparaciones), costes directos e indirectos asociados a su montaje y rapidez de ejecución hacen de la tubería de acero la mejor opción posible.

Se realiza el cálculo mecánico para justificar los espesores de tubería propuestos en el proyecto en función del grado de acero seleccionado y comprobando el comportamiento de la tubería bajo unas hipótesis de carga que se irán describiendo en cada apartado para poder plantear la más desfavorable. Se sigue como base para el cálculo mecánico la Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión, publicada por el CEDEX en el año 2003. Ésta guía basa el cálculo de este tipo de tuberías en la guía M11 Steel Pipe – A Guide for Design and Installation publicada por la AWWA (American Water Works Association), normas de reconocido prestigio y uso internacional.

En conducciones muy largas se puede ir ajustando el espesor de la conducción a las presiones o circunstancias que para cada tramo tiene que soportar la tubería.

Las longitudes de los tubos de acero no están normalizadas y quedarán determinadas por el largo óptimo en función del trazado de la conducción y los costes de transporte para el suministro de los tubos en obra. Se considerarán 13,5m como el largo óptimo para el transporte pudiendo variar este largo según las necesidades concretas.
En cuanto a las uniones éstas podrán ser soldadas (a tope / abocardado cilíndrico / abocardado esférico) o con bridas (normalmente cuando se inserte en la conducción algún elemento adicional como puede ser una válvula).

HEAD QUARTER / MADRID
Av. Mediterráneo 5, 1ºG
28007 Madrid – ESPAÑA
Tel: (+0034) 91 535 17 90,
Fax: (+0034)91 534 69 42
Mail: nokselspain@noksespain.com

FACTORY / LORCA
Autovía del Mediterráneo, km 644
Avda. Río Narcea, s/n, Parcela X-1
Pol. Ind. Saprelorca, buzón nº216
30817 Lorca (Murcia) – ESPAÑA
Tel: (+0034) 968 925 002

En las tuberías de acero, una vez establecido el diámetro y las condiciones de instalación y funcionamiento, los parámetros a dimensionar son:

- Espesor de pared del tubo
- Módulo de reacción del relleno a compactar, en las tuberías enterradas.
- Tipo de acero empleado (definiendo el límite elástico)

Esos tres parámetros se definen con la comprobación de 3 hipótesis:
Resistencia frente a la presión interna, comprobación de deformación máxima admisible al actuar las cargas externas sobre el tubo, así como verificación del colapso por acciones internas o externas.

HIPOTESIS I. Presión hidráulica interior positiva (estado tensional)

El espesor viene definido por la Presión Máxima de Diseño (N/mm^2), MDP, que deberá ser a su vez inferior a la Presión Máxima Admisible (N/mm^2), PMA y que vendrá condicionada por el diámetro exterior del tubo y la Tensión admisible del acero según su grado N/mm^2

La siguiente expresión define los espesores requeridos (AWWA M11):

$$e \geq \frac{D \cdot MDP}{2 \cdot \sigma_{adm}}$$

MDP = Presión Max. de Diseño (N/mm^2); igual o menor que PMA, Presión Máxima admisible.

e = espesor del tubo (mm).

D = Diámetro exterior del tubo (mm)

σ_{adm} = Tensión admisible del acero (N/mm^2). Se adopta el 50% del límite elástico mínimo del acero.

	Diámetro (mm.)	Espesor (mm.)	Limite elástico del acero (N/mm2)	Presión Máxima de Diseño (Bar)	Presión de Prueba (fábrica) (UNE EN 10224) (Bar)	Presión Máxima teórica (Bar)
Item 1	762	6,4	28,10	**23,60**	33,04	47,20

LA TUBERIA CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS DE PRESIÓN

HEAD QUARTER / MADRID
Av. Mediterráneo 5, 1ºG
28007 Madrid – ESPAÑA
Tel: (+0034) 91 535 17 90,
Fax: (+0034)91 534 69 42
Mail: nokselspain@noksespain.com

FACTORY / LORCA
Autovía del Mediterráneo, km 644
Avda. Río Narcea, s/n, Parcela X-1
Pol. Ind. Saprelorca, buzón nº216
30817 Lorca (Murcia) – ESPAÑA
Tel: (+0034) 968 925 002

HIPOTESIS II. Acciones gravitatorias (estado tensional y deformacional)

Está hipótesis considera la carga pésima de acciones gravitatorias, debe comprobarse que la tensión y la deformación máxima no superan las admisibles.

En caso de tubería aérea, en defecto de otros condicionantes más restrictivos, como deformación admisible se adoptará el valor de 1/360 de la luz entre apoyos. Además, debe verificarse que, para la hipótesis pésima de carga, las tensiones producidas en las zonas de los apoyos no superan las admisibles.

Las acciones gravitatorias incluyen:

- Peso propio de la tubería.
- Peso del fluido transportado.
- Cargas permanentes uniformes debidas a elementos constructivos tales como aislamientos.
- Cargas permanentes puntuales debidas a elementos constructivos o instalaciones sobre la tubería.
- Acciones originadas por el peso de la nieve que pudiese acumularse sobre la tubería.
- Acciones del viento originadas por las presiones y succiones sobre la superficie exterior.

En caso de tubería enterrada, considerando únicamente las cargas del terreno y del tráfico, debe comprobarse que la deformación máxima debida a la flexión transversal no supera la admisible. Como deformaciones máximas admisibles, hay que tener en cuenta la rigidez de la tubería y de sus revestimientos y en general, tal como se muestra en la tabla adjunta, suelen admitirse valores entre el 2 y el 5% del diámetro exterior (manual AWWA M11).

TIPO DE REVESTIMIENTO		DEFORMACIÓN ADMISIBLE (% DN)
EXTERIOR	INTERIOR	
Flexible	Flexible	5
Flexible	Mortero de cemento	3 a 4
Mortero de cemento	Mortero de cemento	2

Deformaciones diametrales admisibles de los tubos (Manual AWWA M11)

En el caso de la tubería de acero helicosoldada, habitualmente revestida con polímeros bicomponentes (epoxis, poliuretanos) para el interior y exteriormente, en caso de estar enterrada, con combinaciones de polímeros y soluciones tricapa con polietileno o polipropileno extruido en caliente, estaríamos siempre hablando de revestimientos muy flexibles cuyas propiedades garantizan su perfecto funcionamiento incluso con deformaciones muchísimo mayor del 5%.

HEAD QUARTER / MADRID
Av. Mediterráneo 5, 1ºG
28007 Madrid – ESPAÑA
Tel: (+0034) 91 535 17 90,
Fax: (+0034)91 534 69 42
Mail: nokselspain@noksespain.com

FACTORY / LORCA
Autovía del Mediterráneo, km 644
Avda. Río Narcea, s/n, Parcela X-1
Pol. Ind. Saprelorca, buzón nº216
30817 Lorca (Murcia) – ESPAÑA
Tel: (+0034) 968 925 002

El cálculo de la deformación máxima debida a la flexión transversal se suele hacer mediante la formulación de Spangler (1941), la cual, en su forma más general, adopta la expresión siguiente (manual AWWA M11):

$$d = D_1 \frac{K_a (W_e + W_t) r_m^3}{\mathrm{EI} + 0{,}061\ \mathrm{E}' r_m^3}$$

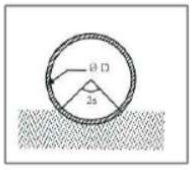
d = Deformación producida en el tubo, en m.

r_m = Radio medio de la tubería, en m.

D_1 = Coeficiente empírico de deformación diferida. Se toma un valor 1,25.

K_a = Coeficiente de factor de apoyo.

Ángulo de apoyo 2α = 20º	K_a = 0,110
Ángulo de apoyo 2α = 45º	K_a =0,105
Ángulo de apoyo 2α = 60º	K_a =0,102
Ángulo de apoyo 2α = 120º	K_a =0,090
Ángulo de apoyo 2α = 180º	K_a =0,083



E'= Módulo de reacción del relleno, en kN/m²

Terreno bien compactado	E' = 5.000 kN/m²
Terreno con compactación media	E' = 2.000 kN/m²
Terreno con mala compactación	E' = 1.000 kN/m²

W_e y W_t cargas debidas al peso de las tierras y al tráfico respectivamente, en kN/m²

W_e, cargas debidas al peso de las tierras: En la tubería de acero, al ser una tubería flexible, habitualmente se calculan según la teoría de Marston, sin considerar ningún coeficiente reductor, suponiendo una seguridad adicional

$$w_e = \gamma \,.\, H \,.\, OD$$

$$w_e = (\gamma_w \,.\, H_w + f.\gamma.H).\, OD \text{ (considerando el freático)}$$

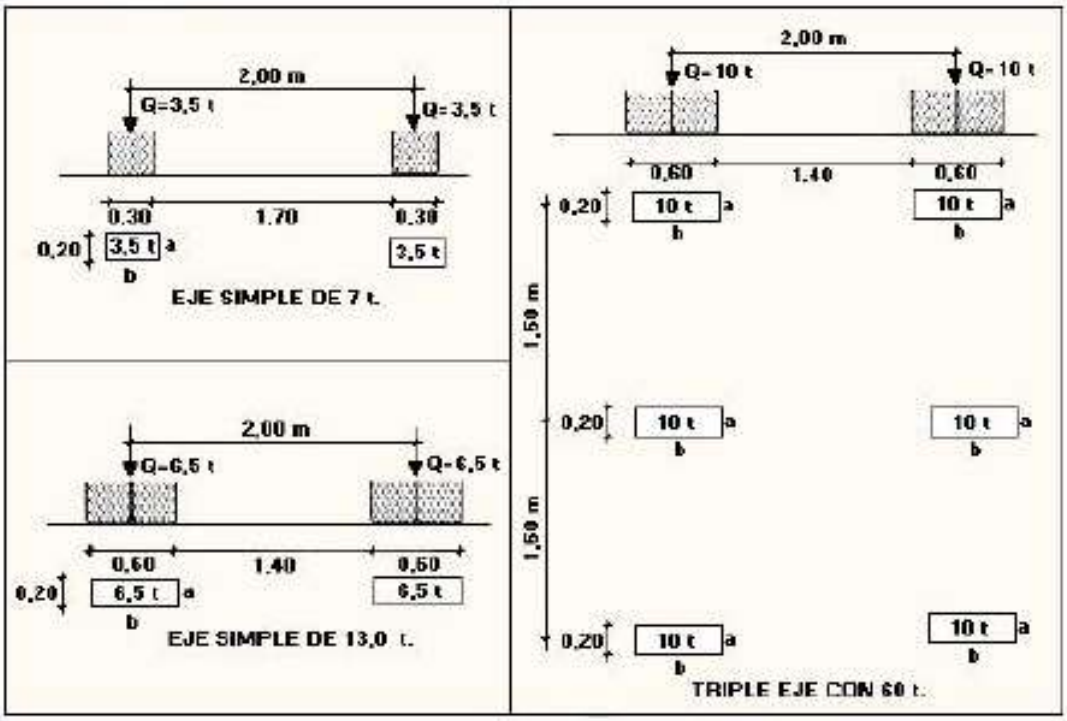
W_e= cargas debidas al peso de las tierras, en kN/m²
γ = peso específico del relleno. Por defecto puede tomarse 20kN/m³
H= Altura de tierras sobre la clave del tubo, en m.
OD= Diámetro exterior del tubo, en m.

HEAD QUARTER / MADRID
Av. Mediterráneo 5, 1ºG
28007 Madrid – ESPAÑA
Tel: (+0034) 91 535 17 90,
Fax: (+0034)91 534 69 42
Mail: nokselspain@noksespain.com

FACTORY / LORCA
Autovía del Mediterráneo, km 644
Avda. Río Narcea, s/n, Parcela X-1
Pol. Ind. Saprelorca, buzón nº216
30817 Lorca (Murcia) – ESPAÑA
Tel: (+0034) 968 925 002

γ_w = peso específico del agua, en kN/m³
H_w = Altura del nivel freático sobre el tubo, en m.
f(Factor de flotación) = 1 - 0,33.(H_w/H)

W_t ,cargas debidas al tráfico: Son sobrecargas puntuales, puede emplearse la formulación genérica de Boussinesq. Esta formulación ha sido simplificada y se suele considerar que se reparten uniformemente en una superficie que se va ampliando según un tronco de pirámide cuyas caras laterales forman un ángulo de unos 45º con la vertical.



A modo de resumen, para tubos menores de 2000mm de diámetro y una carga de triple eje con 60Ton, el valor de las cargas puntuales debidas al tráfico en t/m son las siguientes:

Para OD>s

$$w_t = 294{,}2 \,.\, \frac{OD + S}{t \,.\, l'_e}$$

Para OD<s

$$w_t = 588{,}4 \,.\, \frac{OD}{t \,.\, l'_e}$$

HEAD QUARTER / MADRID
Av. Mediterráneo 5, 1ºG
28007 Madrid – ESPAÑA
Tel: (+0034) 91 535 17 90,
Fax: (+0034)91 534 69 42
Mail: nokselspain@noksespain.com

FACTORY / LORCA
Autovía del Mediterráneo, km 644
Avda. Río Narcea, s/n, Parcela X-1
Pol. Ind. Saprelorca, buzón nº216
30817 Lorca (Murcia) – ESPAÑA
Tel: (+0034) 968 925 002

	Diametro (mm)	Espesor (mm)	d deformación admisible (% - m)		d Deformación calculada (m)	Altura de tierras (m)	D_1 1 - 1,5	E' 1000 - 5000kN/m2	I ($e^3/12$)	Coef. Factor apoyo Kc	We (cargas tierras, kN/m2)				cargas con freatico.				Wt (kN/m)	Wt (cargas trafico kN/m2)					Wt (cargas trafico kN/m2)			
											We = We = γ x H x OD				We = (W_w x H_w +f x γ x H_1) x OD					Wt = 294,2 x (OD + S) / (t x I'_e)					Wt = 588,4 x (OD) / (t x I'_e)			
											We (kN/m)	γ (kN/m3)	H (m)	We (kN/m)	$γ_w$ (kN/m3)	H_w (m)			Wt (kN/m)	Wt (kN/m)	S	t	I'_e		Wt (kN/m)	S	t	I'_e
Item 1	762	6,4	5%	0,038	4,89%	0,037	0,63	1,20	1000	2,2E-08	0,090	9,601	20	0,63	11,43	9,8	0,75	9,92	9,92	-0,5180	1,482	4,882	61,97	-0,5180	1,482	4,882
Item 2	762	6,4	5%	0,038	4,93%	0,038	1,15	1,20	2000	2,2E-08	0,090	17,526	20	1,15	19,9548	9,8	0,75	23,06	23,06	0,2100	2,210	5,610	4,98	0,2100	2,21	5,610
Item 3	762	6,4	5%	0,038	4,97%	0,038	5,50	1,20	5000	2,2E-08	0,090	83,820	20	5,50	85,6488	9,8	0,75	19,09	21,39	6,3000	8,300	11,700	19,09	6,3000	8,3	11,700

LA TUBERIA CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS MECÁNICOS

HEAD QUARTER / MADRID
Av. Mediterráneo 5, 1ºG
28007 Madrid – ESPAÑA
Tel: (+0034) 91 535 17 90,
Fax: (+0034)91 534 69 42
Mail: nokselspain@noksespain.com

FACTORY / LORCA
Autovía del Mediterráneo, km 644
Avda. Río Narcea, s/n, Parcela X-1
Pol. Ind. Saprelorca, buzón nº216
30817 Lorca (Murcia) – ESPAÑA
Tel: (+0034) 968 925 002

HIPOTESIS III. Presión hidráulica interior negativa (pandeo o colapso)

Considerando una situación excepcional en la que actuasen exclusivamente presiones interiores negativas, el colapso o pandeo debe verificarse comprobando que el coeficiente de seguridad C frente a dicho colapso sea al menos 2. La siguiente expresión verifica esta situación particular:

$$C = \frac{P_{crit}}{q_e} \geq 2{,}5 - 3$$

C = Coeficiente de seguridad, de valor igual o superior a 2 en tubería aérea (US army Corp of Engineers, 1970). Para tubería enterrada 2,5 (si H/DN>2) ó 3 (si H/DN<2)

Pcrit = Carga crítica de pandeo (N/mm2). Se puede calcular mediante la expresión de Luscher modificada o la expresión de Levy.

q_e= Depresión debida a posibles golpes de ariete, succiones, etc. (N/mm2).

$$q_e = \gamma_w H_w + f_f \frac{W_e}{DN} + \frac{W_t}{DN} + 0{,}1\ \mathrm{P}_v$$

γ_w = peso específico del agua, en N/mm^3

H_w = Altura del nivel freático sobre el tubo, en mm.
f_f (Factor de flotación) = 1 - 0,33.(H_w/H)

H= Altura de tierras sobre la clave del tubo, en mm.

P_v = depresión interna debida a posibles golpes de ariete, succiones, etc. (en bar)

$$P_{crit} = 10\ \mathrm{x} \sqrt{32\ \times f_f \times B' \times E' \times \frac{EI}{{D_m}^3}}$$

$$f_f = 1 - 0{,}33\ \mathrm{x} \frac{H_w}{H}$$

E = Módulo de elasticidad del material de la tubería (N/mm2).

e = Espesor del tubo reducido (mm).

Dm = Diámetro medio del tubo (mm).

I= momento de inercia de la pared de la tubería (mm^3) (I=e^3/12)

E'= Módulo de reacción del relleno (N/mm2)

HEAD QUARTER / MADRID
Av. Mediterráneo 5, 1ºG
28007 Madrid – ESPAÑA
Tel: (+0034) 91 535 17 90,
Fax: (+0034)91 534 69 42
Mail: nokselspain@noksespain.com

FACTORY / LORCA
Autovía del Mediterráneo, km 644
Avda. Río Narcea, s/n, Parcela X-1
Pol. Ind. Saprelorca, buzón nº216
30817 Lorca (Murcia) – ESPAÑA
Tel: (+0034) 968 925 002

B'=coeficiente de origen empírico

$$B' = \frac{1}{1 + e^{(-0.213H)}}$$

Para el caso que nos ocupa, no se consideraran depresiones ni golpe de ariete ya que se dispondrán elementos anti ariete y de ventosas en el trazado de la conducción.

08/11/2021

Roberto Bollo Fustero

Sales Department

NOKSEL ESPAÑA, S.A.