

02-023

MECHANICAL STUDY TO COLLAPSE IN LARGE POTABLE WATER SUPPLY PIPES

Romero Sedó, Antonio Manuel ⁽¹⁾; Arrué Burillo, Paloma ⁽²⁾; Romero Miquel, Jordi
Françesc ⁽²⁾; Ponz Carcelen, Román ⁽³⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de València, ⁽²⁾ Universitat Politècnica de València, ⁽³⁾ EMIMET

The Polytechnic University of Valencia works together with EMIMET through a research agreement, whose objective is to perform the mechanical calculation of new buried pipes collapsing for the supply of drinkable water. The objective is to determine the minimum thickness of the steel pipes to be installed buried, as well as the working and service limit conditions. The mechanical behaviour and collapse of pipes with and without traffic loads and inside a sheath is studied. The calculations have been made through mathematical finite element modeling (MEF) and the calculation of the critical pressure using the equations of the American Water Works Association. The results obtained have been the stresses, deformations, safety coefficients and minimum thicknesses of the pipes.

Keywords: mechanical calculation; finite elements; critical pressure; collapse calculation

ESTUDIO MECÁNICO A COLAPSO EN GRANDES TUBERÍAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

La Universitat Politècnica de València trabaja juntamente con EMIMET a través de un convenio de investigación, cuyo objetivo es la realización del cálculo mecánico a colapso de nuevas conducciones enterradas para el abastecimiento de agua potable. El objetivo es determinar el espesor mínimo de las tuberías de acero que se van a instalar enterradas, así como las condiciones límite de trabajo y de servicio. Se estudia el comportamiento mecánico a colapso de las tuberías con y sin cargas de tráfico y en el interior de una vaina. Los cálculos se han realizado a través de modelación matemática por elementos finitos (MEF) y el cálculo de la presión crítica mediante las ecuaciones de la American Water Works Association. Los resultados obtenidos han sido los espesores mínimos de las tuberías.

Palabras clave: cálculo mecánico; elementos finitos; presión crítica; cálculo a colapso

Correspondencia: Antonio Manuel Romero Sedó aromeros@csa.upv.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Existen amplios estudios relacionados con el cálculo de la resistencia de las tuberías de abastecimiento de agua sometida a presiones positivas en el interior de la tubería, pero existe poca información relacionada con el cálculo en la hipótesis de colapso, es decir, cuando la presión interior de la tubería que transporta el fluido se somete a presiones negativas, se produce depresión, que en caso de alcanzar la presión de -1kp/cm^2 provocaría el colapso de la tubería.

La empresa gestora del abastecimiento de agua en alta en el Área Metropolitana de Valencia, EMIMET, muy interesada en estos temas, está desarrollando un estudio con la Universitat Politècnica de València (UPV) en relación con el cálculo mecánico de las grandes conducciones enterradas de acero de abastecimiento. Parte de los resultados obtenidos se desarrollan en este artículo. La motivación de este artículo es profundizar en el cálculo a colapso con una aplicación práctica como es determinar el espesor mínimo de las tuberías de acero que se van a instalar enterradas, relacionándolas con las condiciones de trabajo y de servicio. Así mismo se han estudiado la influencia del ángulo de apoyo de la tubería, siendo este de hormigón para dos hipótesis, una con un ángulo de 120 grados y dos, para 180 grados.

2. Objetivos

El objetivo es determinar el espesor mínimo de las tuberías de acero de DN-1016 y DN-1422 que se van a instalar enterradas, así como las condiciones límite de trabajo y de servicio. Se han estudiado 727 casos resultantes de la combinación de tres hipótesis de cálculo, con o sin carga de tráfico e instalada en el interior de una vaina, con las condiciones de contorno de funcionamiento de las tuberías según la tipología constructiva, con las cargas externas a que pueden estar sometidas las conducciones, con o sin vehículo pesado, así como la tipología constructiva y las presiones internas negativas de la tubería condicionadas por el fluido en la red de abastecimiento.

Se ha utilizado el cálculo computacional con modelación matemática por elementos finitos (MEF) y el cálculo de la presión crítica mediante las ecuaciones de la American Water Works Association.

3. Materiales y métodos

3.1 Metodología de cálculo

El método de cálculo está basado en las ecuaciones de la mecánica de sólidos, (Zienkiewicz et al, 2010), (Temam, 1979), y de Euler (1824), (Vázquez, 2001), considerando el agua como fluido real e incompresible, ecuación (1).

$$K_{ij}^e = B_i^T D B_j V^e \quad (1)$$

Los cálculos se han realizado mediante aplicación informática comercial SolidWorks con licencia de la UPV, (Dassault Systems, 2019). Para calcular la presión externa asociada con la posibilidad del fallo por colapso designada por P_{cr} , se ha utilizado los resultados obtenidos por MEF en combinación con las ecuaciones (2) y (3), indicadas por el manual M11 de la American Water Works Association (2017).

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \left(\frac{e}{D_{\text{exterior}} - e} \right)^3 \quad \text{para} \quad \frac{e}{D_{\text{exterior}}} < \sqrt{\frac{(1 - \mu^2) \cdot S_y}{E}} \quad (2)$$

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot S_y \cdot \left(\frac{D_{\text{exterior}}}{e} - 1 \right)}{\sqrt{\left(\frac{D_{\text{exterior}}}{e} \right)^4 - \left(\frac{D_{\text{exterior}}}{e} \right)^3 + 5 \cdot \left(\frac{D_{\text{exterior}}}{e} \right)^2 - 8 \cdot \left(\frac{D_{\text{exterior}}}{e} \right) + 4}} \quad \text{para} \quad \frac{e}{D_{\text{exterior}}} > \sqrt{\frac{(1 - \mu^2) \cdot S_y}{E}} \quad (3)$$

3.2 Características de los materiales

La conducción es de acero cuyas características mecánicas han sido facilitadas por el fabricante, se trata de acero tipo S275J2G4 con módulo de elasticidad de 210000 MPa, coeficiente de Poisson de 0.29, límite de tracción de 450 MPa, límite elástico de 275 MPa y densidad de 7858 kg/m³.

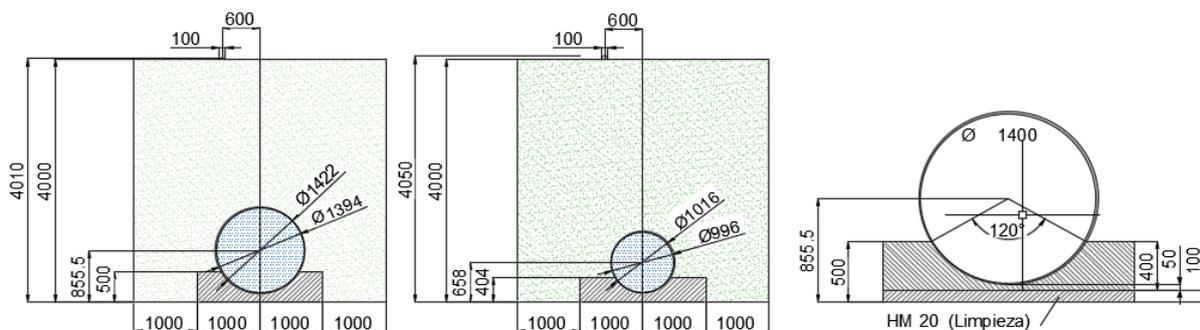
El diseño de la instalación indica que la tubería posee un apoyo de hormigón situado en la parte inferior de la tubería cuya definición geométrica se indica en la figura 1. El hormigón tiene un módulo elástico de 27300 MPa, coeficiente de Poisson de 0.22 y límite elástico de 25 MPa.

Las características del suelo corresponden a los indicados en las tablas D.23, 24, 26, 27 y 28, del Código Técnico de la Edificación del Documento SE-C "Seguridad estructural. Cimientos" para el tipo de suelo clasificado, a partir de un estudio geológico-geotécnico realizado por EMIMET. Tiene un módulo elástico de 100 MPa, un coeficiente de Poisson de 0.33 y una densidad de 1800 kg/m³.

La geometría de las tuberías según catálogo técnico del fabricante es para la tubería DN-1066 de diámetro exterior 1016 mm, 996 mm de diámetro interior y 10 mm de espesor, y para la DN-1422 de diámetro exterior 1422 mm, 1394 mm de diámetro interior y 14 mm de espesor, figura 1.

Con la finalidad de delimitar el cálculo por MEF, se plantea un conjunto compuesto por un ensamblaje formado por el suelo, la tubería de acero y el apoyo de hormigón cuyas dimensiones geométricas vienen dadas por la figura 1.

Figura 1: Plano ensamblaje del bloque de zanja con tubería DN-1016 Y DN-1422 y apoyo de hormigón con ángulo de 120° sometido a estudio mediante MEF



3.3 Acciones consideradas

Las cargas permanentes están formadas por el peso propio de la tubería, peso del agua y del suelo de la zanja de anchura 4 m y longitud de 10 m. La acción permanente de valor no

constante se considera la ejercida por el suelo de la zanja según su profundidad y que soporta la tubería en el caso de que se encuentre enterrada. Las acciones variables corresponden a las cargas por vehículo pesado, formado por un eje pesado con dos cargas puntuales de 165 kN, dispuestas de forma longitudinal sobre la tubería eje Z, y transversal a la misma a una distancia de 0.60 m del eje vertical, eje Y. No se considera el nivel freático y la presión hidráulica en el interior de la tubería en depresión varía desde 0 kp/cm² a -1 kp/cm². Las condiciones de carga del vehículo pesado, así como el nivel freático ha sido impuesto por las condiciones de servicio indicadas por la empresa EMIMET.

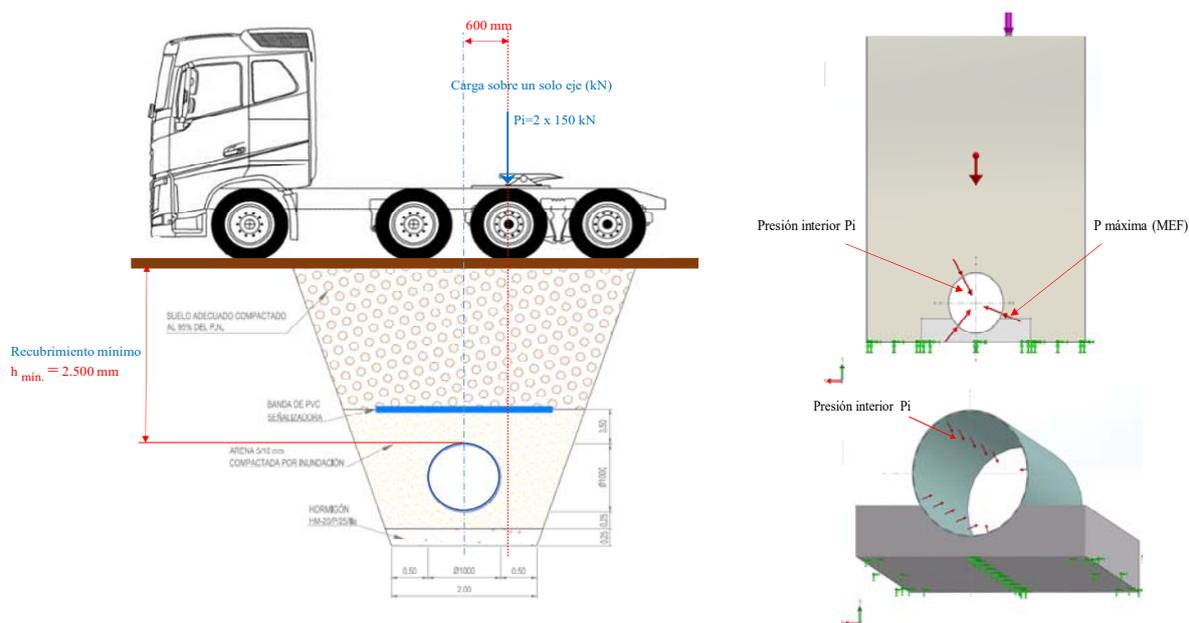
3.4 Hipótesis a estudio

El número de hipótesis seleccionadas ha sido tres que se han obtenido de los estados más desfavorables a los que las tuberías pueden estar sometidas, tabla 1. En las tres hipótesis la presión hidráulica relativa en el interior de la tubería es negativa, es decir, existe depresión en la tubería para analizar el estado de colapso. Se analizan las presiones desde 0 kp/cm² hasta -1 kp/cm². La hipótesis I corresponde la tubería enterrada sometida a las cargas por vehículo pesado, figura 2, la hipótesis II sin estas cargas de vehículo pesado y la hipótesis III considerando que la tubería se encuentra instalada en el interior de una vaina.

Tabla 1. Hipótesis de cálculo para cada tubería a estudio

Hipótesis	Designación	Ecuaciones
I	Tubería en depresión variable, con cargas por vehículo pesado	MEF + AWWA M11
II	Tubería en depresión variable, sin cargas por vehículo pesado	MEF + AWWA M11
III	Tubería en depresión variable, en vaina	AWWA M11

Figura 2: Hipótesis I. Tubería DN-1422, sometida a cargas por vehículo pesado y depresión interna variable.



El número de casos estudiados para cada hipótesis se ha obtenido combinando las variables de diseño de la instalación, la geometría de la zanja y por otra parte la presión interna de la tubería. La profundidad de la zanja (H) corresponde a la cota que existe entre la parte inferior del apoyo de hormigón y la rasante del terreno, siendo las series estudiadas

de 2, 3.5, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 metros. El colapso se estudia a través de la depresión en el interior de la tubería (Pi), de -0.1, -0.2, -0.3, -0.4, -0.5, -0.6, -0.7, -0.8, -0.9 y -1 kp/cm².

3.6 Criterios de fallo para tensiones combinadas

Para el cálculo de las tensiones combinadas se ha utilizado el criterio de von Mises, por ser este método más adecuado para el acero como material dúctil isotrópico elástico lineal, y ser el que más se aproxima a los resultados experimentales (Ferrer, 2006), (Timoshenko, 1976). Por tanto, se descarta la utilización del criterio de Rankine (mejor criterio para materiales frágiles) y el de Tresca (satisfactorio para materiales dúctiles).

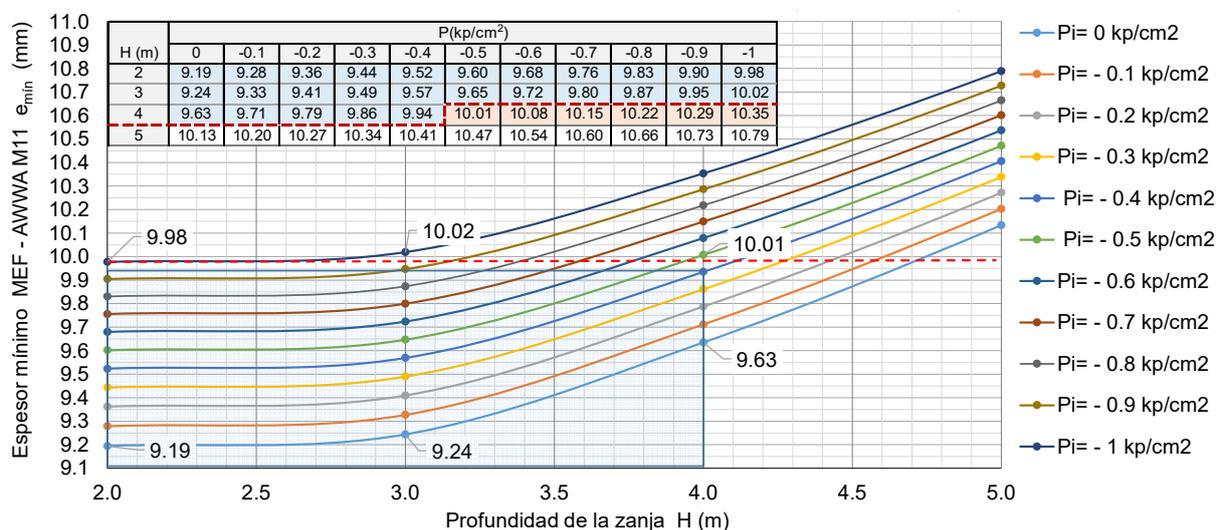
4. Resultados

En el estudio del colapso de las tuberías por aplastamiento se han obtenido previamente los resultados del cálculo computacional por MEF y posteriormente se han aplicado las ecuaciones del apartado 3.2 “Ecuaciones de AWWA manual 11” (AWWA, 2017), cuyos resultados permite definir los espesores mínimos de la tubería, sometida las distintas hipótesis de cálculo tanto en la tubería DN-1016 como en la DN-1422. En la hipótesis III con la tubería instalada en el interior de una vaina se han aplicado las ecuaciones del AWWA manual 11 (AWWA, 2017),

4.1. Hipótesis I. Cálculo a colapso de tuberías de acero DN-1016 con cargas de tráfico. Con ángulo de apoyo 120°.

Los espesores mínimos necesarios en relación con la profundidad de la zanja, para la tubería DN-1016 sometida a cargas de tráfico, se indican en las figuras 3 y 4.

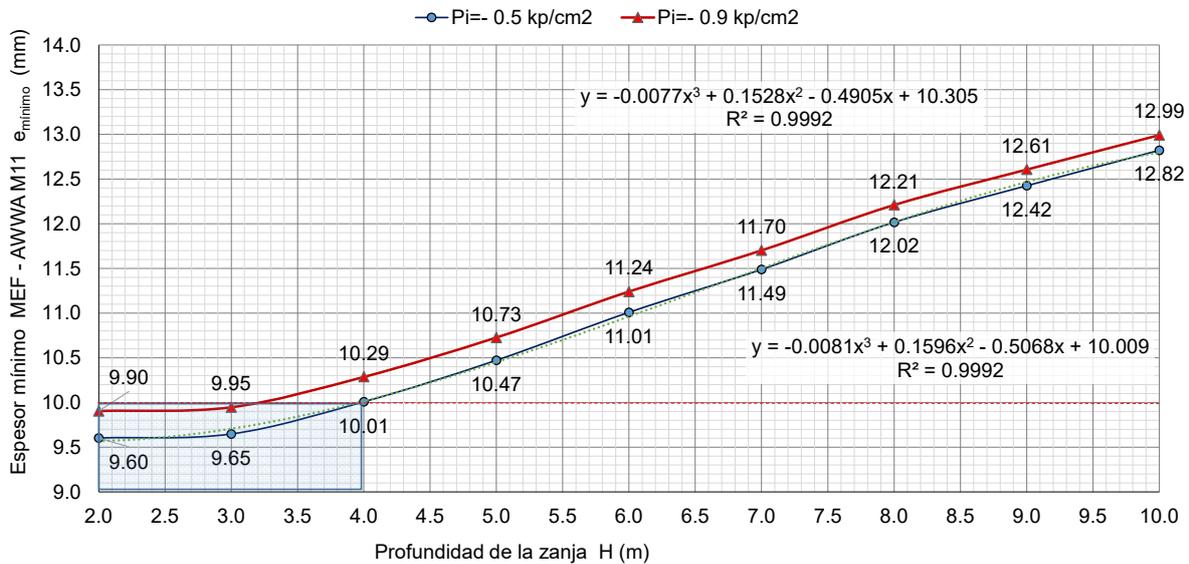
Figura 3: Hipótesis I. Tubería DN-1016 con tráfico. Correlación Espesor tubería vs. Profundidad de zanja (H= 2 a 5 metros). Ángulo de apoyo 120°



La tubería instalada con un espesor de 10 mm cumple las condiciones de seguridad para una profundidad de 4 m hasta una depresión de -0.4 kp/cm².

En particular para las depresiones de -0.5 y -0.9 kp/cm², se han modelizado las curvas que correlacionan el espesor con la profundidad de la zanja para las depresiones con objeto de obtener los valores límite en las operaciones de ejecución de las conducciones, figura 4.

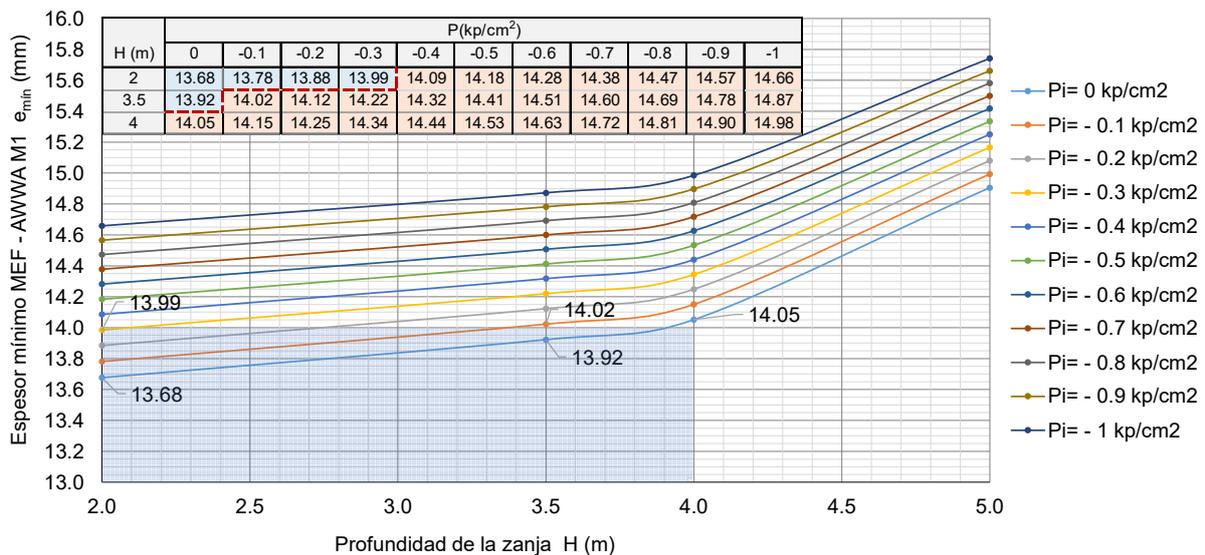
Figura 4.- Hipótesis I. Tubería DN-1016 con tráfico. Modelización Espesor tubería vs. Profundidad zanja (H= 2 a 10 metros). Ángulo de apoyo 120°



4.2. Hipótesis I. Cálculo a colapso de tuberías de acero DN-1422 con cargas de tráfico. Ángulo de apoyo 120°.

Los espesores mínimos necesarios en relación con la profundidad de la zanja, para la tubería DN-1422 sometida a cargas de tráfico, se indican en las figuras 5 y 6.

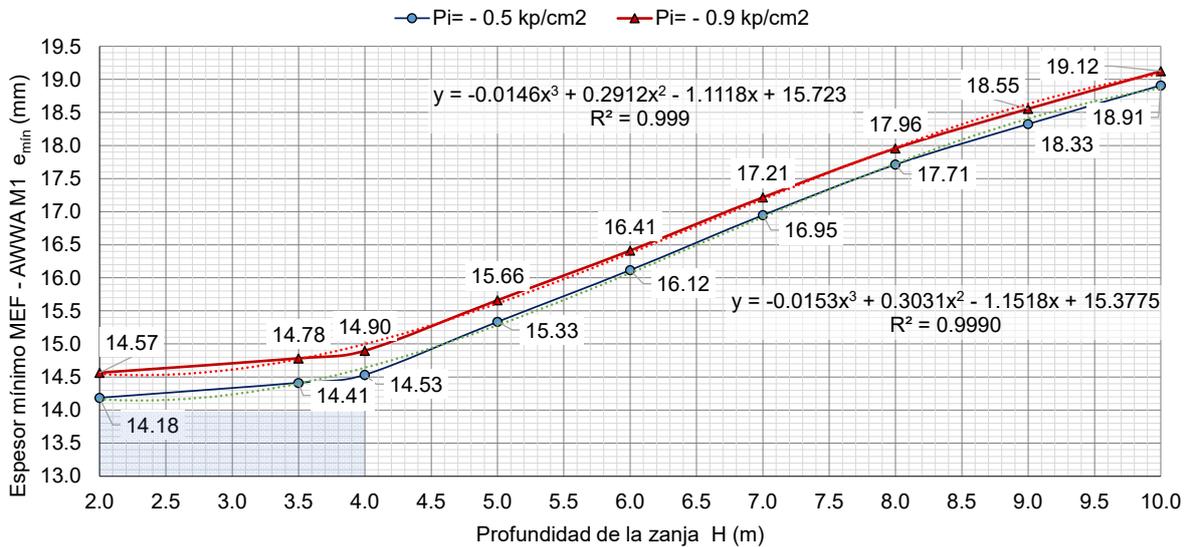
Figura 5: Hipótesis I. Tubería DN-1422 con tráfico. Correlación Espesor tubería vs. Profundidad de zanja (H=2 a 5 metros). Ángulo de apoyo 120°



La tubería instalada con un espesor de 14 mm cumple las condiciones de seguridad para una profundidad de 3 m hasta una depresión de -0.3 kp/cm² y para una profundidad de 2 m. Para una profundidad de 4 m y depresión teórica muy próxima a -1 kp/cm² requiere un espesor de 14.98 mm. En la figura 6, se han modelizado las curvas que correlacionan el

espesor mínimo de la tubería con la profundidad de la zanja para las depresiones de -0.5 y -0.9 kp/cm². Como ejemplo a una profundidad de 4 m y una presión de -0.5 kp/cm² se requiere un espesor mínimo de 14.53 mm y para -0.9 kp/cm² de 14.90 mm.

Figura 6: Hipótesis I. Tubería DN-1422 con tráfico. Modelización Espesor de tubería vs. Profundidad de zanja. Para Pi=-0.5 y -0.9 kp/cm². Ángulo de apoyo 120°



4.3. Hipótesis I. Cálculo a colapso de tuberías de acero DN-1422 con cargas de tráfico. Ángulo de apoyo 180°.

Los espesores mínimos en relación con la profundidad de la zanja, para la tubería DN-1422 sometida a cargas de tráfico, con apoyo de 180° se indican en las figuras 7 y 8.

Figura 7: Hipótesis I. Tubería DN-1422 con tráfico. Correlación Espesor tubería vs. Profundidad de zanja (H=2 a 5 metros). Ángulo de apoyo 180°.

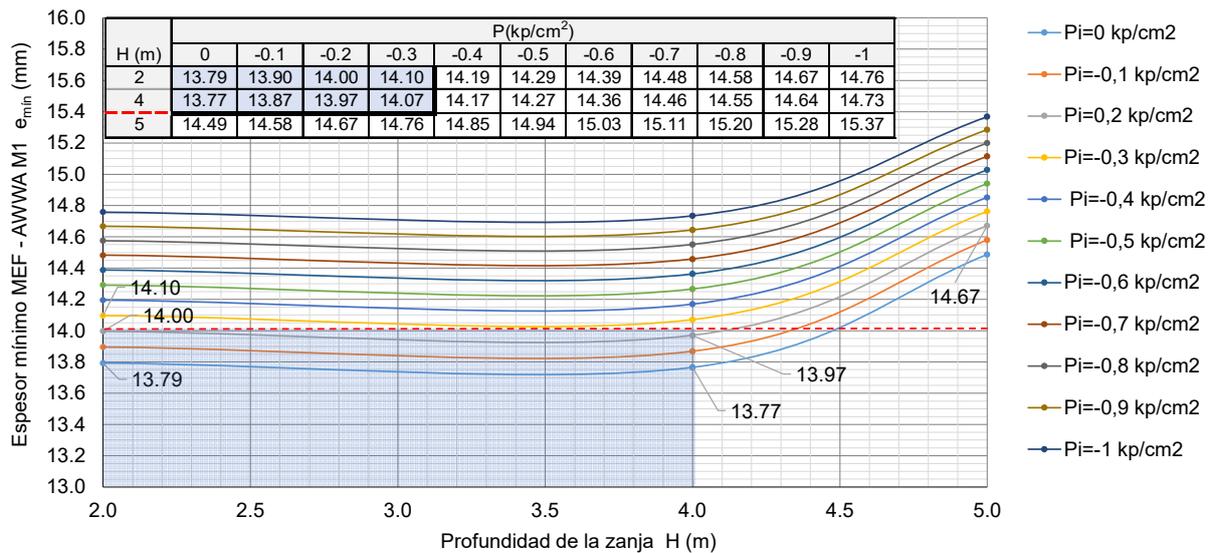
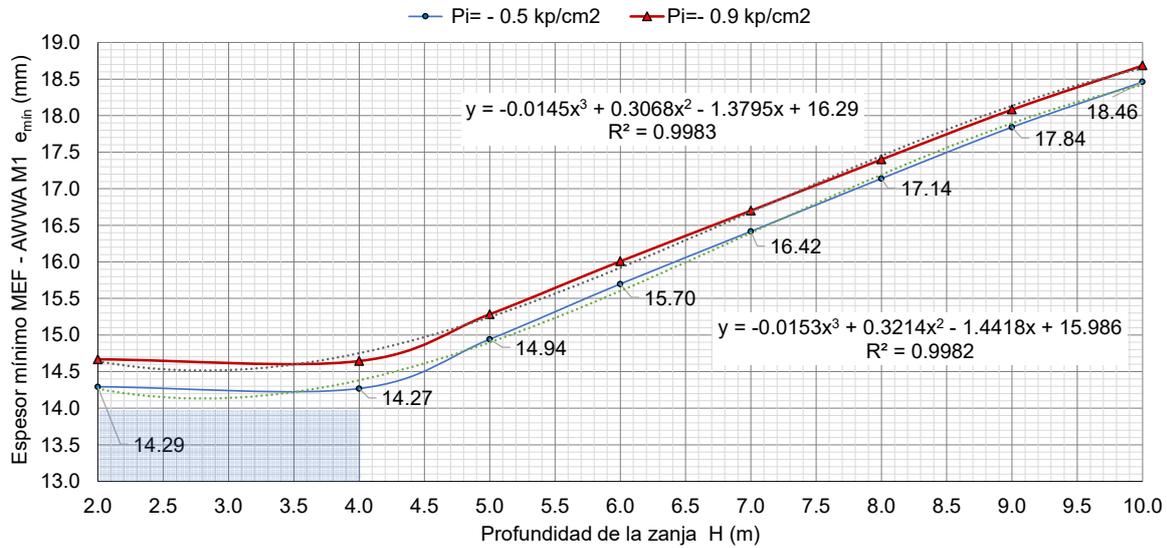


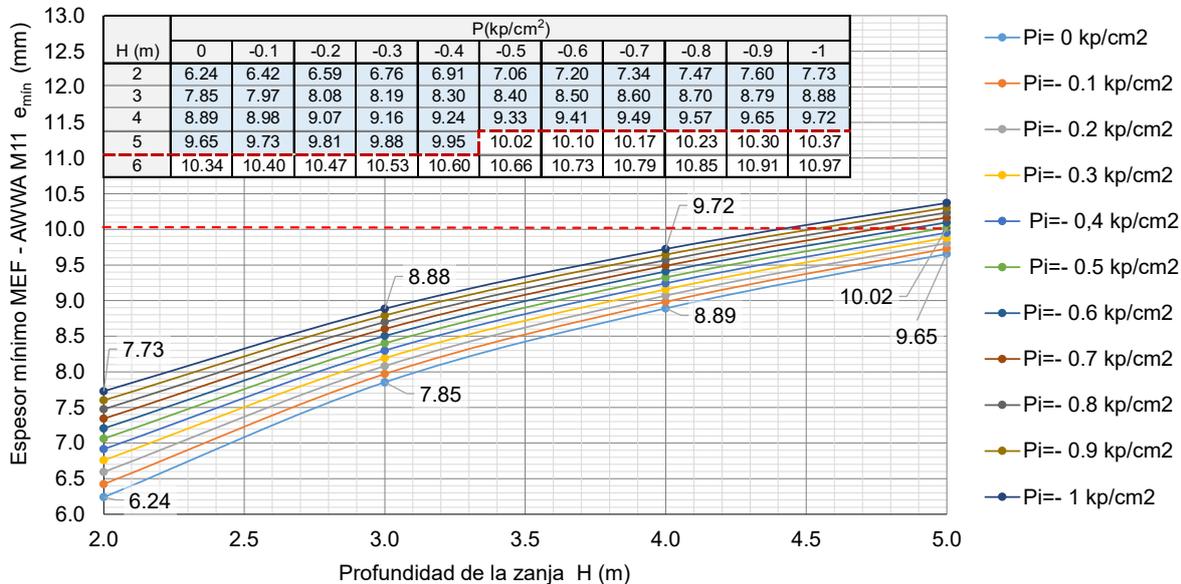
Figura 8: Hipótesis I. Tubería DN-1422 con tráfico. Modelización Espesor tubería vs. Profundidad de zanja (H=2 a 10 metros). Apoyo de hormigón 180°.



4.4. Hipótesis II. Cálculo a colapso de tuberías de acero DN-1016 sin cargas de tráfico. Ángulo de apoyo 120°.

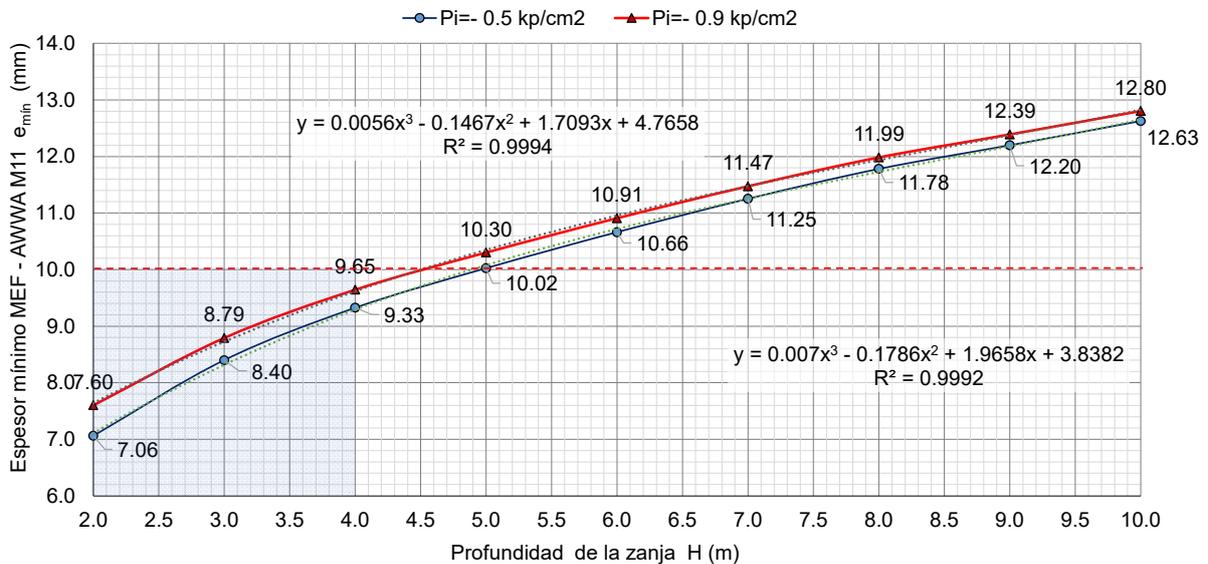
Los espesores mínimos necesarios en relación con la profundidad de la zanja, para la tubería DN-1016 sin cargas de tráfico, se indican en las figuras 9 y 10.

Figura 9: Hipótesis II. Tubería DN-1016 sin tráfico. Correlación Espesor tubería vs. Profundidad de zanja (H=2 a 5 metros). Ángulo de apoyo 120°.



La tubería instalada con un espesor de 10 mm cumple las condiciones de seguridad para una profundidad de 4 m hasta una depresión teórica de -1 kp/cm² y en el caso de 5 m de profundidad hasta una depresión de -0.4 kp/cm². La figura 10 muestra la modelización las curvas que correlacionan el espesor con la profundidad de la zanja para las depresiones de -0.5 y -0.9 kp/cm².

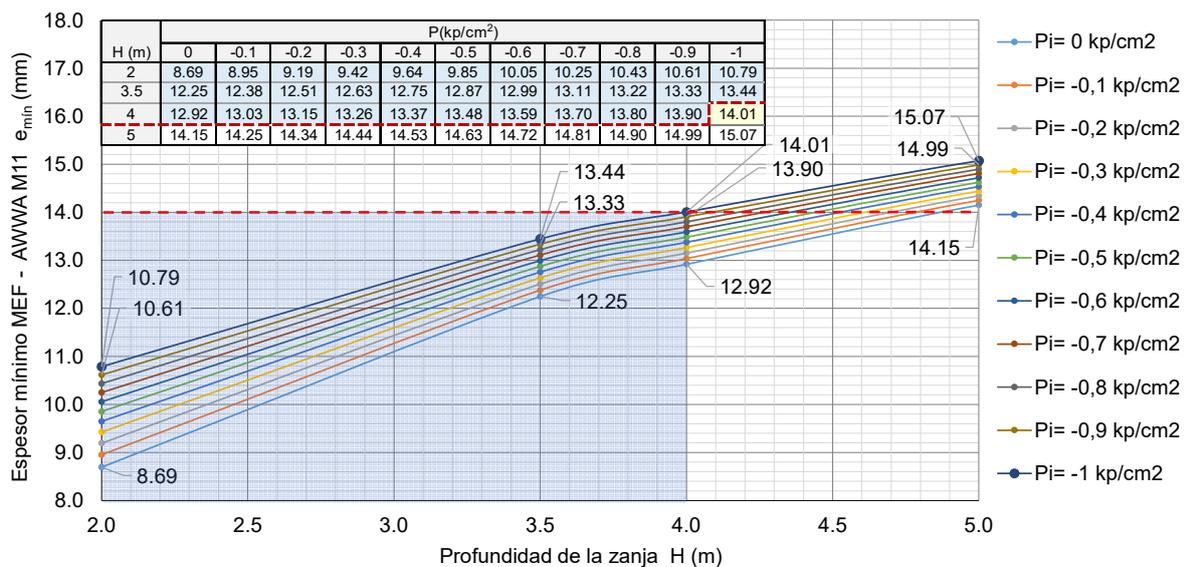
Figura 10.- Hipótesis II. Tubería DN-1016 sin tráfico. Modelización Espesor tubería vs. Profundidad de zanja (H= 2 a 10 metros). Apoyo de hormigón de 120°



4.5. Hipótesis II. Cálculo a colapso de tuberías de acero DN-1422 sin cargas de tráfico. Ángulo de apoyo 120°.

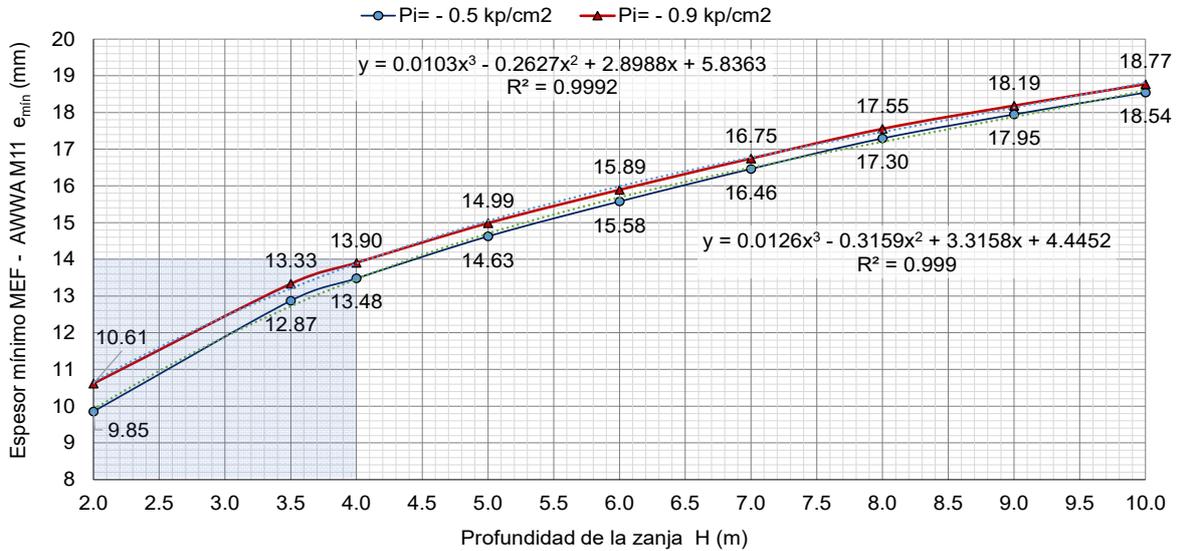
La representación gráfica de los resultados para la tubería DN-1422 en depresión sin cargas de tráfico, vienen dadas las figuras 11 y 12. La tubería instalada con un espesor de 14 mm cumple las condiciones de seguridad hasta una depresión teórica muy próxima a -1 kp/cm² para una profundidad de hasta 3.50 m, para la profundidad de 4 m requiere 14.01 mm.

Figura 14: Hipótesis II. Tubería DN-1422 sin tráfico. Correlación Espesor tubería vs. Profundidad de zanja (H= 2 a 5 metros). Ángulo de apoyo 120°.



En la figura 12, se ha modelizado las curvas que correlacionan el espesor con la profundidad de la zanja para las depresiones de -0.5 y -0.9 kp/cm².

Figura 12: Hipótesis II. Tubería DN-1422 sin tráfico. Modelización Espesor tubería vs. Profundidad zanja (H= 2 a 10 metros). Ángulo de apoyo 120°.



En una comparativa entre las hipótesis I y II, tabla 2, la influencia de la carga de tráfico requiere aumentar un porcentaje el espesor de la tubería cuya cuantía va siendo menor a mayor profundidad de zanja, pasando del 47% al 2% en la tubería DN-1016 y del 57% al 2% en la tubería DN-1422, debido al efecto de transmisión de cargas del suelo. También es interesante indicar que el incremento es menor cuando la depresión aumenta, es decir, en la obtención del espesor mínimo se va haciendo mucho más influyente la depresión en sí que la propia carga de tráfico.

Tabla 2. Incremento del espesor mínimo por las cargas de tráfico en DN-1016 y DN-1422. Ángulo de apoyo 120°.

H (m)	DN-1016 Incremento de espesor por cargas de tráfico $I = (e_i - e_{ii})/e_{ii}$ (%)												Promedio	DN-1422 Incremento de espesor por cargas de tráfico $I = (e_i - e_{ii})/e_{ii}$ (%)												Promedio
	P(kp/cm ²)													P(kp/cm ²)												
	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1	0		-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1			
2	47%	44%	42%	40%	38%	36%	34%	33%	32%	30%	29%	37%	57%	54%	51%	48%	46%	44%	42%	40%	39%	37%	36%	45%		
3	18%	17%	16%	16%	15%	15%	14%	14%	14%	13%	13%	15%	14%	13%	13%	13%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	12%		
4	8%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	6%	7%	9%	9%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	7%	7%	7%	8%		
5	5%	5%	5%	5%	5%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	4%	5%		
6	4%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%		
7	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%		
8	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	3%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%		
9	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%		
10	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%		

4.6. Hipótesis II. Cálculo a colapso de tuberías de acero DN-1422 sin cargas de tráfico. Ángulo de apoyo 180°.

Los espesores mínimos en relación con la profundidad de la zanja, para la tubería DN-1422 sometida a cargas de tráfico, con apoyo de 180° se indican en las figuras 13 y 14.

Figura 13: Hipótesis I. Tubería DN-1422 sin tráfico. Correlación Espesor tubería vs. Profundidad de zanja (H=2 a 5 metros). Ángulo de apoyo 180°.

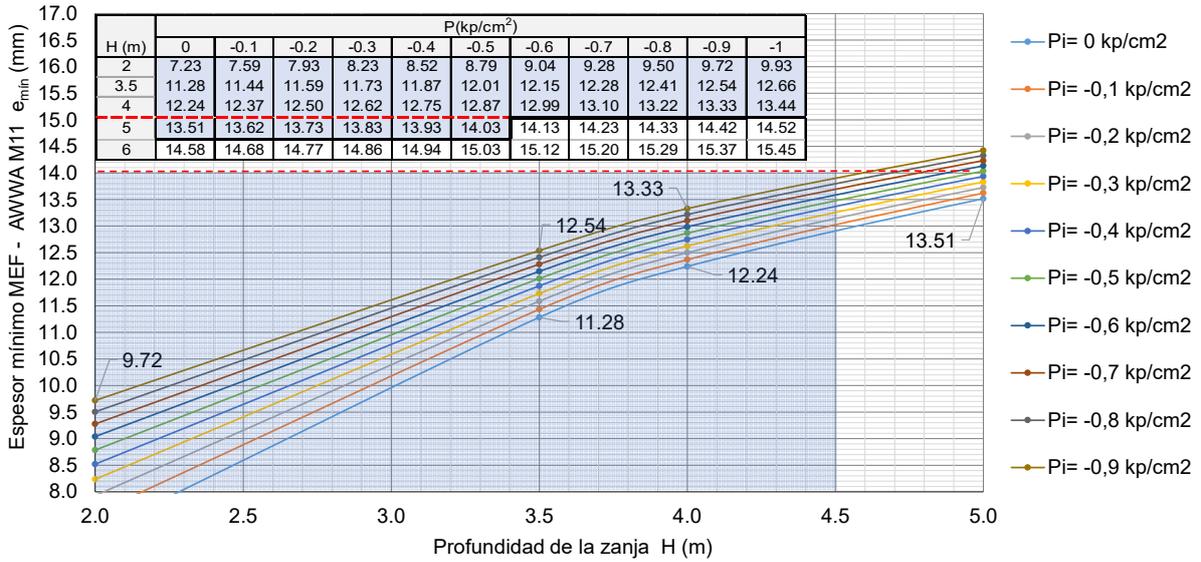
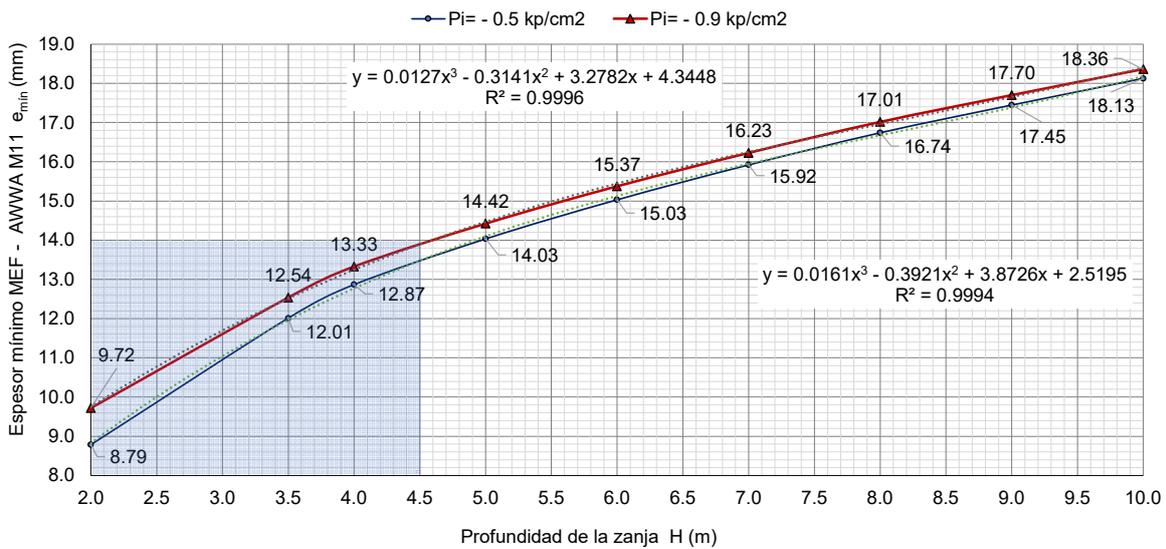


Figura 14: Hipótesis I. Tubería DN-1422 sin tráfico. Modelización Espesor tubería vs. Profundidad de zanja (H=2 a 10 metros). Ángulo de apoyo 180°.



En una comparativa entre las hipótesis I y II, tabla 3, de la tubería de DN-1422 con el apoyo de hormigón de 180°. La influencia de la carga de tráfico requiere aumentar un porcentaje el espesor de la tubería cuya cuantía va siendo menor a mayor profundidad de zanja, pasando del 91% al 2%, debido al efecto de transmisión de cargas del suelo.

Tabla 3. Incremento del espesor mínimo por las cargas de tráfico en DN-1422. Apoyo de 180°.

H (m)	Incremento de espesor mínimo de tubería DN-1422 $I = (e_I - e_{II})/e_{II}$ (%)											Promedio
	P(kp/cm²)											
	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1	
2	91%	83%	77%	71%	67%	63%	59%	56%	53%	51%	49%	65%
4	12%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	10%	10%	10%	10%	11%
5	7%	7%	7%	7%	7%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
6	5%	5%	5%	5%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%

El diseño del apoyo de hormigón de 180° proporciona menores espesores de tubería. En una comparativa en la tubería DN-1422 con cargas de tráfico el apoyo de 120° requiere entre un 3% y un 1% de mayor espesor que con el apoyo de 120°. En el caso de la tubería sin cargas de tráfico la variación es se produce entre un 20% y un 2%, tabla 4.

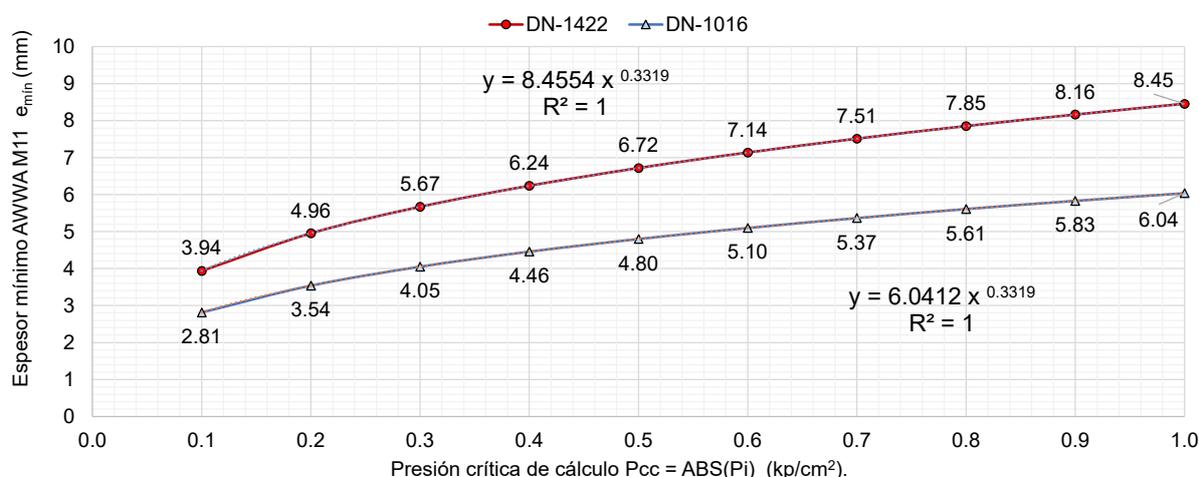
Tabla 4. Incremento de espesor en DN-1422 con y sin tráfico entre apoyo de 180° y 120°.

H (m)	DN-1422 con carga de tráfico, entre apoyo 120° y 180° I = (e120-e180)/e180 (%)											DN-1422 sin carga de tráfico, entre apoyo 120° y 180° I = (e120-e180)/e180 (%)												
	P(kp/cm ²)											P(kp/cm ²)												
	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1	Promedio	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1	Promedio
2	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	20%	18%	16%	14%	13%	12%	11%	10%	10%	9%	9%	13%
4	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	6%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	4%	4%	4%	5%
5	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	2%	3%	5%	5%	5%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
6	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	3%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	3%	3%	3%	3%	4%	4%

4.7. Hipótesis III. Cálculo a colapso de tuberías de acero DN-1016 y DN-1422 en vaina. Ángulo de apoyo 120°.

En esta hipótesis se ha considerado la instalación de la tubería en el interior de otra previamente instalada por hinca. La tubería no está sometida a ningún tipo de carga ejercida por el empuje del terreno ni por vehículo pesado, solamente posee como carga permanente el peso propio de la tubería, la presión atmosférica exterior (presión atmosférica técnica) y la variación de las depresiones a considerar en el interior de la tubería. Se han aplicado las ecuaciones de AWWA manual 11 (AWWA, 2017), teniendo en cuenta las características de la tubería de acero DN-1016 y DN-1422. Los resultados vienen dados por la figura 15.

Figura 15: Hipótesis III. Tubería en vaina. Correlación Espesor vs. Presión crítica.



Para las depresiones estudiadas, el espesor mínimo obtenido es inferior en todos los casos al espesor de la tubería DN-1016 de 10 mm y en la tubería DN-1422 de 14 mm. En ambas tuberías se cumplen las condiciones de seguridad hasta una depresión teórica muy próxima a -1 kp/cm², siendo el espesor mínimo de 6.04mm para la DN-1016 y 8.45 mm para la DN-1422. La curva modelizada de tipo potencial tiene el mismo exponente en ambas tuberías, siendo el espesor mínimo en la tubería DN-1422 un 39.96% mayor al del DN-1016 para las mismas presiones críticas de cálculo.

5. Conclusiones

En la hipótesis I, para un ángulo de apoyo de 120° con cargas por vehículo pesado, la tubería instalada DN-1066 con un espesor de 10 mm cumple las condiciones de seguridad hasta una depresión de -0.4 kp/cm² para una profundidad de 4 m. Para una depresión

teórica de -1 kp/cm^2 cumple hasta una profundidad de 2 m. Y la tubería DN-1422 con un espesor de 14 mm cumple las condiciones de seguridad hasta una depresión de -0.3 kp/cm^2 para una profundidad de 2 m. Para una depresión teórica de -1 kp/cm^2 y profundidad de 4 m requiere un espesor de 14.98 mm.

En la hipótesis II, para un ángulo de apoyo de 120° sin cargas por vehículo pesado, la tubería instalada DN-1016 con un espesor de 10 mm hasta una profundidad de hasta 4m y la tubería DN-1422 de 14 mm de espesor hasta 3.50 m, cumplen las condiciones de seguridad para una depresión teórica muy próxima a -1 kp/cm^2 . La influencia de la carga de tráfico requiere aumentar un porcentaje el espesor de la tubería menor a mayor profundidad de zanja, debido al efecto de transmisión de cargas del suelo. También es interesante indicar que en la obtención del espesor mínimo se va haciendo mucho más influyente la depresión en sí que la propia carga de tráfico.

El diseño del apoyo de 120° en la tubería DN-1422 requiere entre un 3% y un 1% de mayor espesor que con el apoyo de 180° con cargas de tráfico y entre un 20% y un 2% sin cargas.

En el cálculo a colapso de las tuberías de acero en vaina, hipótesis III, se desprenden que las tuberías pueden soportar más cuantía de depresión. La tubería DN-1016 con un espesor de 10 mm y la DN-1422 con un espesor de 14 mm cumplen las condiciones de seguridad hasta una depresión teórica de -1 kp/cm^2 . En ambas las curvas modelizadas del espesor mínimo (mm) respecto a la presión crítica (kp/cm^2) son del tipo potencial con exponente 0.3319, siendo el de DN-1422 un 39.96% mayor a la de DN-1016.

En los tramos de instalaciones que puedan existir depresiones importantes es aconsejable su instalación en el interior de una vaina para evitar sobrecargas, además de la instalación de sistemas de protección de admisión de aire.

6. Referencias

- American Water Works Association. (2017). Steel pipe design and installation. (A. W. W. Association, Ed.) (2nd ed.). Denver, Colorado: American Water Works Association, 2017.
- Euler, L. (1824). Leonhardi Euleri Institutionum calculi integralis: volumen primum [-quartum]. impensis Academiae imperialis scientiarum. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2027/mdp.39015068183345>
- Ferrer, C. (2006). *Diagnóstico del comportamiento en servicio de materiales*. Valencia: Editorial UPV.
- SOLIDWORKS. Dassault Systems. [en línea]. <http://www.solidworks.com/es>.
- Temam, R. (1979). *Navier-Stokes equations: Theory and numerical analysis*. Amsterdam, etc. : North-Holland.
- Timoshenko, S. P. (1976). *Resistencia de materiales. Primera parte: Teoría elemental y problemas* (13ª-16ª ed.). Madrid: Espasa Calpe.
- Vázquez, M. (2001). *El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural*. (E. López, Ed.). Madrid: Madrid: Noela, D.L. 2001.
- Zienkiewicz, Olgierd Cecil, et al. *El método de los elementos finitos. Volumen 2, Mecánica de sólidos*. 6ª ed., CIMNE, 2010.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

