

Instalación de conducciones en zanja inducida en terraplén

Víctor Flórez Casillas

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Director del Departamento de Presas y Obras Hidráulicas. FCC CONSTRUCCION, S.A.

vfllorez@fcc.es

Generalidades

En esta presentación vamos a abordar un tipo de instalación bastante singular que consigue básicamente una reducción muy importante de las cargas que gravitan sobre la conducción, mediante el empleo de una técnica que requiere de un importante control de ejecución.

Veremos por una parte y de forma somera, la teoría que sustenta este tipo de instalaciones y su comparación con lo que sucede en tuberías colocadas en zanja, en terraplén o en zanja terraplenada.

En una segunda parte veremos la aplicación práctica de esta técnica y finalmente las recomendaciones que, nosotros dentro de los Servicios Técnicos de FCC, hacemos sobre este tipo de instalaciones. Son recomendaciones que son algo más restrictivas de las teóricas necesarias pero que entendemos básicas.

La aplicación más importante de la zanja inducida es sobre tubería rígida y en grandes terraplenes. En caso de tubería flexible su comportamiento tanto en zanja como en terraplén se asemeja a una zanja inducida incompleta y no suele requerir este tipo de técnicas de reducción de cargas.



Zanja inducida en autopista Ávila

La teoría

Como vamos a tratar exclusivamente de tuberías rígidas y de alturas con rellenos considerables, siempre superiores a los 4 m, las cargas móviles de superficie no van a afectar sensiblemente a la tubería.

La forma más intuitiva de apreciar el efecto de la zanja inducida será mediante las teorías clásicas que Marston y Spangler desarrollaron entre los años 1920 y 1930. Spangler orientó sus resultados básicamente hacia la tubería flexible cuyo comportamiento es totalmente diferente a la tubería rígida.

Empezaremos por definir algunos conceptos, entre ellos, la distinción entre tubería flexible y tubería rígida a los efectos de esta presentación.

Definiciones

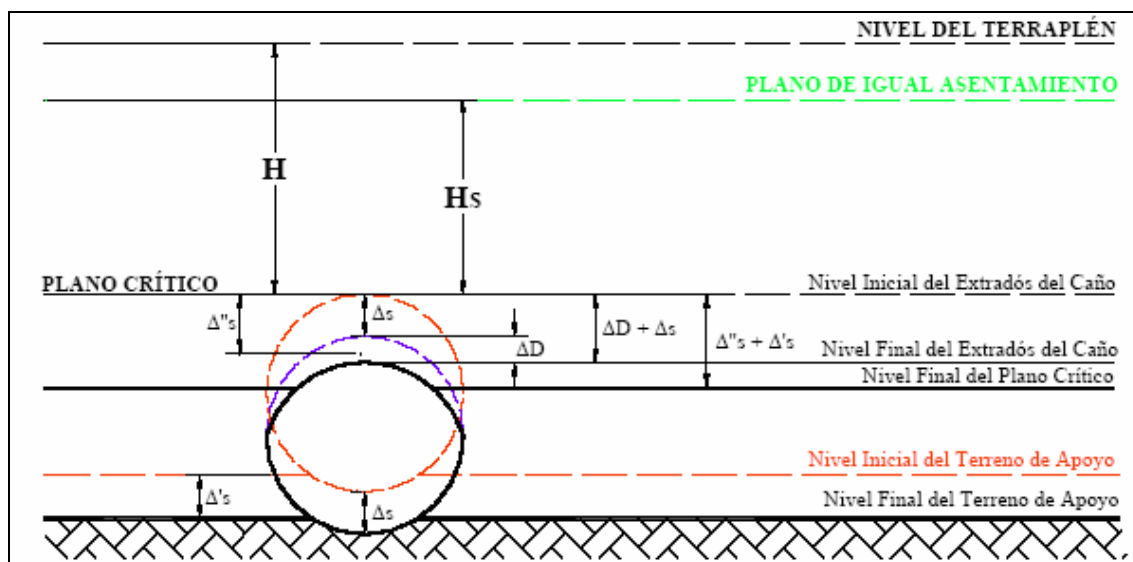
Tubería flexible: aquella cuya capacidad de deformación es capaz de transmitir al relleno lateral parte del esfuerzo hasta el equilibrio. Son aquellas tuberías que para trabajar, para adquirir tensión, han de deformarse.

Tubería rígida: aquella que soporta las acciones exteriores sin apenas deformación, con lo cual es la propia sección de la tubería la que aguanta los esfuerzos de flexión.

Plano crítico: se define de esta forma el plano que está situado al mismo nivel que la clave exterior de la tubería. Con respecto a este plano se definirán los asentamientos (razones de asentamientos) relativos entre los prismas laterales y el prisma central.

Prisma central o prisma interior: el que gravita directamente sobre la tubería, del mismo ancho que el diámetro exterior del tubo.

Prismas laterales o prismas exteriores: relleno adyacente al prisma central, a ambos lados de la tubería.

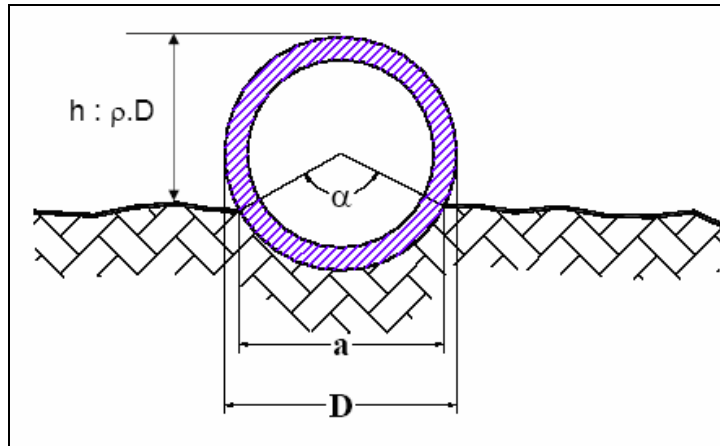


Esquema para definiciones (1)

Plano de igual asentamiento: aquel cuya altura de relleno sobre la tubería es tal que, a partir de él, asientan de la misma forma los prismas centrales y los laterales.

Razón de asentamiento: relación entre la deformación de los prismas laterales de relleno respecto al prisma central.

Factor de proyección: relación entre h y D , siendo D el diámetro exterior. Es decir, si nos colocamos lateralmente al tubo, la proporción de tubería que queda sobre el terreno respecto a la dimensión total de la obra. Estamos hablando generalmente de tuberías de gran diámetro pero es aplicable también a cajones o secciones rectangulares.



Esquema para definiciones (2)

Instalación en zanja: cuando la tubería se coloca a cierta profundidad en un suelo natural previamente excavado para proceder posteriormente a su relleno. Dentro de este tipo de instalación habrá que distinguir si la zanja es estrecha o si la zanja es ancha cuyo comportamiento se asemeja al terraplén.

Instalación en terraplén: cuando la tubería se coloca previamente de forma superficial en el terreno y se procede posteriormente al relleno hasta alcanzar la altura requerida. Dentro de este tipo de instalaciones habrá que considerar unas variantes: zanja terraplendada y zanja inducida en terraplén.

Instalación en zanja	Instalación en zanja terraplendada	Instalación en terraplén	Instalación en zanja inducida en terraplén

Tipos de instalación. Guía CEDEX para tubería de hormigón armado en redes de saneamiento y drenaje

Marston

Las fórmulas originales de Marston y actualmente utilizadas en USA son del tipo;

$$\text{Carga sobre el tubo} = \text{Coeficiente} \times \text{Peso específico del relleno} \times (\phi \text{ exterior})^2$$

Según la deducción original de Marston, procedente de la integración de las fuerzas actuantes obtiene unos coeficientes que dependen de la relación $Hr/\phi \text{ ext.}$, o bien Hr/B

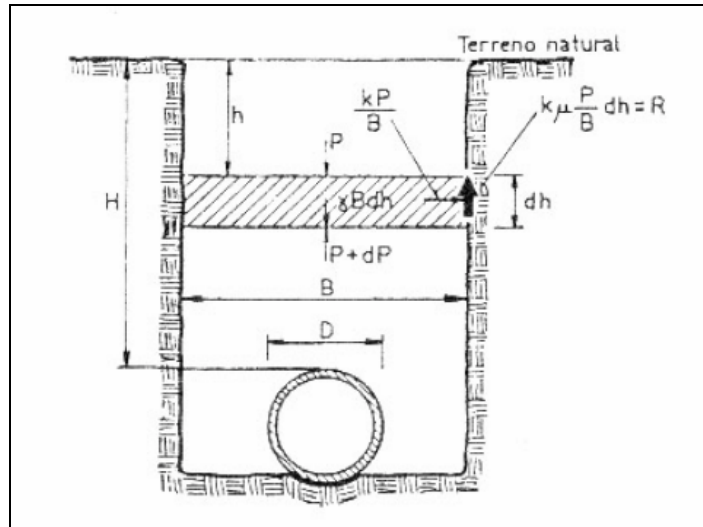
En Europa se ha hecho una modificación a los coeficientes de Marston de forma que éstos nos indiquen la relación que existe entre la carga real sobre la tubería respecto al peso del prisma central.

$$\text{Carga sobre el tubo} = \text{Coeficiente}(2) \times \text{Peso específico del relleno} \times \phi \text{ exterior} \times \text{altura de relleno}$$

Esta última formulación es mucho más intuitiva ya que nos va a indicar si un tipo de instalación mejora o empeora las condiciones básicas que serían las de soportar la carga de tierras superior, completa.

En ambas formulaciones el ϕ exterior se sustituye por B, ancho de la zanja a la altura de la clave, en las instalaciones en zanja.

La imagen siguiente es un esquema de las cargas y su transmisión que Marston emplea en su teoría.



Esquema de cálculo de Marston para transmisión de cargas

El valor de los coeficientes de Marston de la normativa Europea

Tal como hemos comentado en el punto anterior, la carga producida por el relleno sobre la tubería se puede obtener mediante una expresión función del prisma de tierra que tiene encima.

Si llamamos al peso del terreno sobre el tubo P, este será:

$$P = \gamma B H,$$

Donde:

γ es el peso específico del relleno

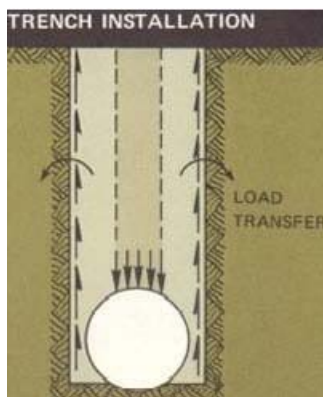
H es la altura de relleno sobre el tubo

B la anchura efectiva de relleno a la altura de la clave del tubo

La carga en cada caso será:

$$W = C P, \text{ siendo}$$

C el coeficiente de Marston de cada instalación. Es el parámetro que vamos a estudiar a continuación.



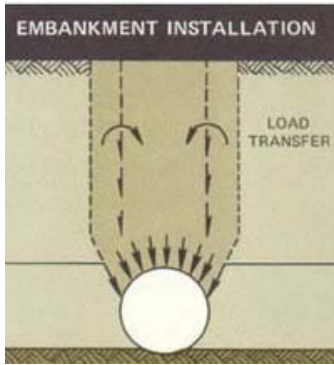
En instalaciones en zanja, el coeficiente de Marston es inferior a 1 ya que al intentar deformarse el relleno se encuentra con la oposición del terreno natural ya consolidado; se produce un esfuerzo cortante por rozamiento del relleno contra el terreno natural.

Parte de la carga se transmite por efecto arco a las paredes de la zanja.

Por tanto la carga a transmitir es inferior al prisma que gravita sobre el tubo.

Esto sucede si la zanja es suficientemente estrecha, en otro caso estaríamos en un caso similar al de terraplén.

En todo caso la carga en terraplén sería la máxima a considerar sobre el tubo.



En la instalación en terraplén el coeficiente de Marston es superior a la unidad.

El relleno deformable tiene mayor altura en los laterales que sobre el tubo y esa deformación provoca un rozamiento negativo entre el prisma superior y los prismas laterales, aumentando la carga.

Este incremento no es indefinido ya que una vez superada la altura del plano de igual asentamiento la carga no se transmite entre los distintos prismas y el coeficiente de Marston será de valor 1; la carga será a partir de ese punto igual al peso del prisma de tierras.

Esta consideración es aplicable a cualquier otra estructura en terraplén.

Esto sucede con los rellenos formados recientemente y con material deformable. En el caso de las hincas o los túneles nos son aplicables estas teorías ya que hay otros componentes de estabilidad muy importantes en la mayoría de los casos como la cohesión.

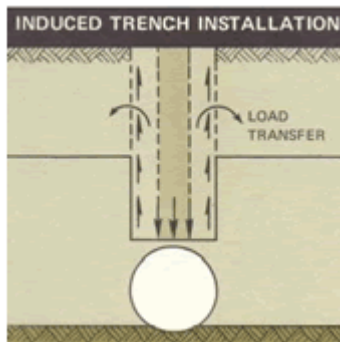
En una publicación colombiana (RAS-2000) llama la atención sobre algunas situaciones que modifican sustancialmente la carga a pesar de que parezca una instalación tipo y menciona varias, por ejemplo: un terraplén sobre suelo muy deformable, en pura lógica reduce la carga sobre el tubo, si bien no dice que el tubo se abriría por deflexión inadecuada; otro caso similar sería el de una zanja en material más deformable que el relleno, esto aumentaría la carga sobre el tubo por el efecto contrario. Menciona otro caso de bastante aplicación, se trata de tubería en terreno orgánico apoyada sobre pilotes, clásico ejemplo de tubería sobre un vertedero o sobre rellenos antrópicos, en ese caso la carga del relleno deformable superior incrementa mucho su magnitud.

La singularidad de la zanja inducida en terraplén

Marston, a la vez que estudiaba la carga que generaba el terreno sobre tubería rígida instalada en zanja o en terraplén, ya consideraba otros tipos de instalaciones que permitieran la reducción de la carga total. Uno de los casos es la zanja terraplenada donde la tubería que va a ser enterrada bajo un terraplén se coloca en una excavación previa del terreno, de esta forma parte de la carga superior se disipa por rozamiento como en una zanja.

El otro tipo de instalación es muy ingenieril, es la denominada zanja inducida en terraplén.

El invento consiste en lo siguiente:



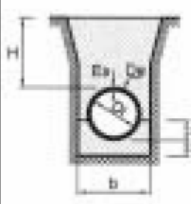
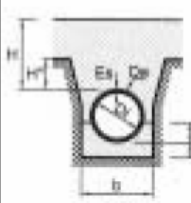
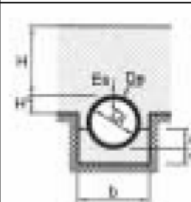
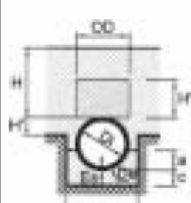
Si mediara mucho tiempo entre la ejecución del terraplén y el final de la obra, podría abrir una zanja en él y transformar la carga en terraplén por carga en zanja. No será normalmente viable.

Pero habría otra forma de transferir carga a los prismas laterales, sería formando un arco de descarga. De modo que si abro un hueco sobre el tubo y lo relleno de "nada" formaré un arco de descarga completo, ninguna carga llegará al tubo. Pero será imposible rellenar de "nada"

Ahora bien, si podré abrir y rellenar de "casi nada" definiendo por "casi nada" un material mucho más deformable que el relleno general, un material que haga de muelle y evite en lo posible la carga al tubo.

De esta forma consigo una reducción muy importante de las cargas que gravitan sobre el tubo, no solamente he convertido un terraplén en zanja que sería el primer caso descrito sino que logro que la parte que gravite sobre el tubo sea casi nula porque se transmite a través de otro material muy deformable que se colgará, además, del resto del relleno.

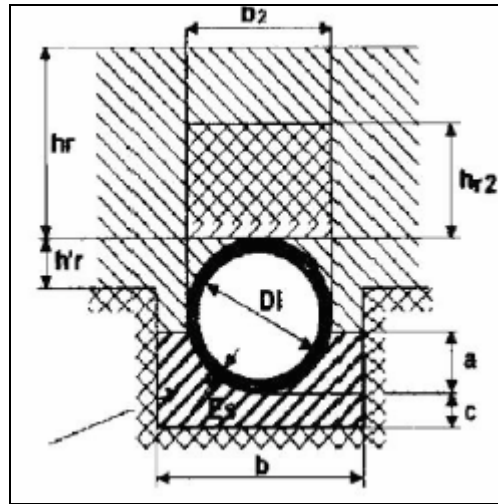
Al compactar las capas superiores la transmisión a la clave del tubo a través del material muy deformable es reducida. Para ello se requiere encontrar ese material muy deformable. La literatura técnica habla de materia orgánica, paja, aserrín, ramaje, o cualquier otro material deformable. Existen estudios recientes con espuma de poliuretano, isocianato o poliestireno expandido. No sé de ningún caso donde se hayan empleado éstos últimos materiales.

Tipo de instalación	Fórmula para el cálculo del peso de las tierras	Fórmula para el cálculo del coeficiente de Marston		Criterio para el cálculo del parámetro H_0	
		$H \geq H_0$	$H > H_0$		
 <p>Zanja</p>	$W_s = C_z \cdot \gamma \cdot H \cdot b$	$C_z = \frac{1 - e^{-2\lambda\mu \frac{H}{b}}}{2\lambda\mu \frac{H}{b}}$			
 <p>Terraplén</p>	$W_s = C_z \cdot \gamma \cdot H \cdot OD$	$C_z = \frac{e^{2\lambda\mu \frac{H}{OD}} - 1}{2\lambda\mu \frac{H}{OD}}$	$C_z = \frac{e^{2\lambda\mu \frac{H_0}{OD}} - 1}{2\lambda\mu \frac{H}{OD}} + \frac{H - H_0}{H} e^{2\lambda\mu \frac{H_0}{OD}}$	Tipo de base	H_0/OD
				Roca o suelo rígido compacto (ordinario)	2,026
				Suelo natural asentable	1,170
 <p>Zanja terraplenada</p>	$W_s = C_z \cdot \gamma \cdot H \cdot b$	$C_z = \frac{1 - e^{-2\lambda\mu \frac{H}{b}}}{2\lambda\mu \frac{H}{b}}$	$C_z = \frac{1 - e^{-2\lambda\mu \frac{H_0}{b}}}{2\lambda\mu \frac{H}{b}} + \frac{H - H_0}{H} e^{-2\lambda\mu \frac{H_0}{b}}$	H'/OD	H_0/OD
				0,5	0,600
				1,0	1,520
				1,5	2,515
				2,0	4,460
 <p>Zanja inducida en terraplén</p>	$W_s = C_z \cdot \gamma \cdot H \cdot b$	$C_z = \frac{1 - e^{-2\lambda\mu \frac{H}{b}}}{2\lambda\mu \frac{H}{b}}$	$C_z = \frac{1 - e^{-2\lambda\mu \frac{H_0}{b}}}{2\lambda\mu \frac{H}{b}} + \frac{H - H_0}{H} e^{-2\lambda\mu \frac{H_0}{b}}$	H'/OD	H_0/OD
				0,5	1,380
				1,0	2,421
				1,5	3,752
				2,0	6,915

Cuadro que recoge las fórmulas y coeficientes de Marston para obtener la carga producida por el relleno sobre la tubería. Guía del CEDEX para redes de saneamiento y drenaje

La explicación que da la UNE 127.916 para la zanja inducida es la siguiente: La carga que recibe una conducción instalada en terraplén puede reducirse invirtiendo artificialmente el sentido del deslizamiento, es decir haciendo que el prisma central descienda más que los exteriores y generando así unas fuerzas de rozamiento dirigidas hacia arriba, las cuales equilibran parte del peso del prisma central y, en consecuencia, aligeran la carga sobre la conducción.

Al definir los parámetros que concurren en una zanja inducida que como hemos visto trata de crear un hueco sobre el tubo, faltaría por incluir una variable adicional al resto de instalaciones: la altura del hueco hr_2



Definición de los parámetros de una zanja inducida

Se definen dos modalidades de instalación en zanja inducida tal como recoge la UNE 127.916 y aquí se transcriben del **manual de la ATHA**, artículo 4.5.3.5, incluso las figuras que lo describen.

Modalidad A

- 1º Se comienza por instalar la conducción, que suponemos en condiciones de proyección positiva (figura 4.5.3.5.a).
- 2º Se realiza el terraplenado (figura 4.5.3.5.b), cubriendo la conducción hasta una altura, sobre el plano de clave, no inferior a su diámetro exterior D . A cada lado de la conducción, se compacta el relleno hasta una distancia que como mínimo será $2 D$ ó $3,6$ m (la que sea menor).
- 3º En el relleno así compactado se excava una zanja hasta el plano de clave de la conducción, cuya anchura coincidirá con el diámetro exterior de aquella (figura 4.5.3.5.c) Esta zanja se rellena con material compresible como paja, serrín suelo orgánico, o cualquier otro material que ofrezca garantía de un asentamiento claramente superior al del relleno compactado.
- 4º Se completa el relleno del terraplén en la forma habitual (figura 4.5.3.5.d).



Figura 4.5.3.5.a

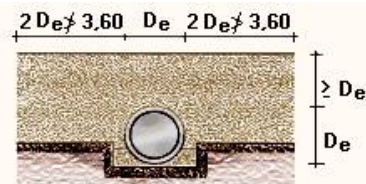


Figura 4.5.3.5.b

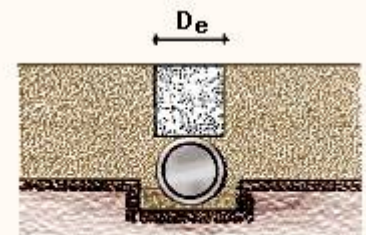


Figura 4.5.3.5.c

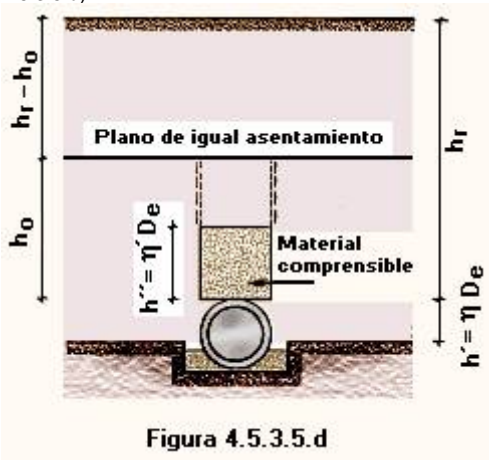
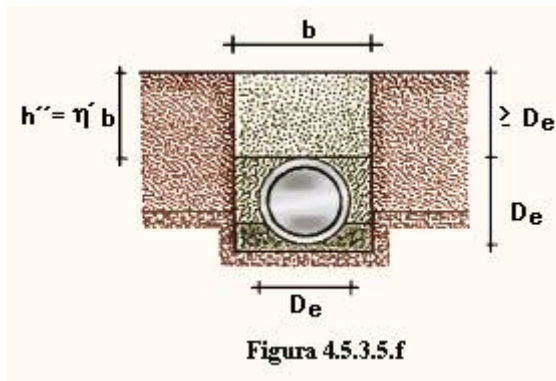
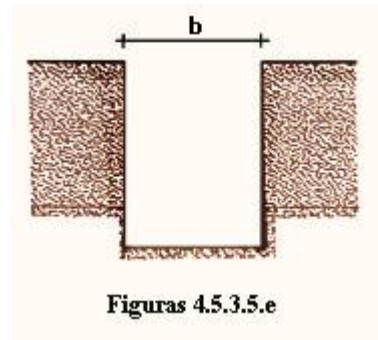


Figura 4.5.3.5.d

Modalidad B

- 1º Antes de instalar la conducción, se rellena el terraplén hasta una cota superior, al menos en D , a la del plano de clave. Una vez compactado este relleno, se abre en él una zanja capaz de alojar la conducción (figura 4.5.3.5.e).
- 2º En dicha zanja se coloca la tubería y se rellena con tierra hasta el plano de clave, y con el material compresible por encima hasta una altura no inferior a D (figura 4.5.3.5.f).
- 3º Se completa el terraplén en la forma habitual.



Cuadro copiado del artículo 4.5.3.5 de la ATHA que describe las dos modalidades de zanja inducida indicadas en la UNE 127-916

Se consigue una mayor reducción de cargas en la modalidad A que en la modalidad B.

Calculo de la carga de tierras

La carga obtenida por el relleno se calcula según la UNE 127.916 de la forma siguiente:

$$q_r = C_{zit} \cdot \gamma_r \cdot h_r \cdot b_2 \quad \text{en kN/m con } h_r \text{ y } b_2 \text{ en m}$$

El valor de C_{zit} se obtiene por:

Para $h_r \leq h_0$

$$C_{zit} = \frac{1 - e^{-2\lambda\mu(h_r/b_2)}}{2\lambda\mu(h_r/b_2)}$$

Para $h_r > h_0$

$$C_{zit} = \frac{1 - e^{-2\lambda\mu(h_0/b_2)}}{2\lambda\mu(h_r/b_2)} + \frac{h_r - h_0}{h_r} e^{-2\lambda\mu(h_0/b_2)}$$

Donde h_r es la altura de relleno, b_2 es la anchura del hueco superior y h_0 es la altura del plano de igual asentamiento. Si denominamos h_{r2} a la altura del relleno compresible, se define la razón de proyección de este relleno como η' al cociente h_{r2} / b_2 .

Únicamente con estos parámetros geométricos y el tipo de relleno ($\lambda\mu$) se obtienen por tabulación el resto de los parámetros básicos del cálculo como la razón de asentamiento en zanja inducida δ' y el valor de h_0 .

En el cuadro siguiente se recogen los valores del parámetro $\lambda\mu$, así como el del peso específico γ_r , asociados a cada tipo de relleno, en este caso en t/m^3 .

Clase de relleno	$\lambda\mu$	γ_r (t/m ³)
Arcilla plástica	0.110	2.10
Arcilla ordinaria	0.130	1.92
Arena arcillosa	0.150	1.92
Arena y grava	0.165	1.76
Arena sin cohesión	0.192	1.90

Tabla con los parámetros básicos del relleno

En la UNE 127.916 están directamente relacionados los valores de la razón de proyección del relleno η' y la razón asentamiento de la zanja inducida δ' .

Razón de proyección (η')	δ'
0.5	0.5
1.0	0.7
1.5	1.0
2.0	2.0

Tabla que relaciona la razón de proyección del relleno compresible con la razón de asentamiento de la zanja inducida

Para el cálculo de la altura del plano de igual asentamiento, se tantea hasta igualar las dos expresiones que indican los asentamientos producidos, tanto en el relleno lateral como sobre la clave del tubo:

$$e^{-2\lambda\mu \cdot h_0/d_e} + 2\lambda\mu \cdot h_0/d_e = 2\lambda\mu \cdot \delta' \cdot \eta' + 1$$

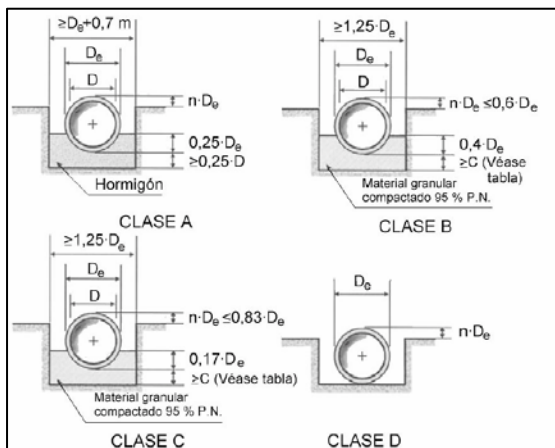
Obtenidos todos los parámetros, se calcula el valor de la carga de tierras:

$$q_r = C_{zit} \cdot \gamma_r \cdot h_r \cdot d_e$$

Cálculo de la clase de tubería

Solamente en el caso de tuberías de hormigón armado podemos seguir el procedimiento para el cálculo de la clase de tubería comparando las cargas efectivas con las cargas del ensayo a tres aristas estipulado en la normativa.

En ese caso se establecen 4 tipos de apoyo, tipos A, B, C y D



Clases de apoyo de la tubería instalada en terraplén y por extensión en zanja inducida en terraplén

Para calcular la carga efectiva comparable al ensayo tres aristas, la carga total va minorada en un coeficiente denominado factor de apoyo, cuyo sentido físico es la relación de momentos entre la situación del ensayo y en la instalación real. El cálculo del factor de apoyo figura en la UNE 127.916, anejo M y no se desarrolla en esta presentación.

La carga obtenida se compara con los valores estipulados para cada clase resistente de tubería, tanto en rotura como a fisuración, obteniéndose de esta forma la tubería necesaria.

La práctica

A pesar de su larga historia, el sistema de instalación en zanja inducida ha sido considerado con cierto escepticismo debido a las múltiples simplificaciones del método de cálculo. De hecho en la asociación americana de tuberías de hormigón (ACPA) este tipo de instalación ha desaparecido en su HANDBOOK del año 2000. Así recoge el preámbulo de la presentación: "Performance of Induced Trench Culverts in New Brunswick" en la Annual Conference of the Transportation Association of Canada. 2007

Sin embargo, esta misma presentación sirve para verificar que las 50 obras de distintas épocas, comprobadas han funcionado correctamente, con reducciones de carga importantes para alturas de relleno superiores a 9 m. Es decir, el método funciona.

Table 2 Summary of pipe classes

Outside Pipe Diameter (B _c) (mm)	Fill Height (m)	D _{0.01} required in (N/m/mm)		Installed Pipe	Pipe Class	
		Positive Projection	Induced Trench		Induced Trench (required)	Positive Projection
1000	12	212.36	43.26	III	III	Exceeds V
1500	10.8	177.51	39.13	III	III	Exceeds V
1450	14.4	230.28	48.10	IV	III	Exceeds V
1830	18.5	327.06	43.88	IV	III	Exceeds V
1500	11.4	187.59	40.94	IV	III	Exceeds V
1500	11.8	194.32	42.14	IV	III	Exceeds V
1800	12.3	193.77	43.18	IV	III	Exceeds V
1500	12	197.68	42.74	IV	III	Exceeds V
1500	9.5	155.62	35.24	IV	III	Exceeds V
1800	11	172.80	39.45	IV	III	Exceeds V
1830	9.5	150.94	49.42	III	III	Exceeds V
1830	10.9	173.92	56.20	III	III	Exceeds V
1850	10.2	164.16	38.42	IV	III	Exceeds V
2222	22.8	368.96	83.30	V	IV	Exceeds V
2200	10	158.36	52.29	III	III	Exceeds V
2200	11.8	188.02	44.32	IV	III	Exceeds V
2200	13.5	216.00	49.27	V	III	Exceeds V
1850	13.6	220.61	71.02	IV	IV	Exceeds V
1850	12.3	199.05	64.35	IV	III	Exceeds V
1867	21.2	346.77	44.24	IV	III	Exceeds V
950*	11.9	200.21	63.41	IV*	III	Exceeds V
950	8.9	149.05	47.56	III	III	Exceeds V
1300	10.4	169.69	54.44	IV	III	Exceeds V
1300	11.8	193.04	61.66	III	III	Exceeds V
3000	16.6	270.74	63.33	IV	III	Exceeds V
2400	32.4	536.60	137.13	V	V	Exceeds V
1467	32.5	531.73	52.34	V	III	Exceeds V
2500	15.4	240.01	77.89	IV	IV	Exceeds V
2500	12.6	195.11	64.01	IV	III	Exceeds V
2200	11.8	188.02	44.32	III	III	Exceeds V
1500	9	147.18	33.74	III	III	Exceeds V
1300	10.1	164.70	35.79	III	III	Exceeds V
1500	10.2	167.38	37.34	III	III	Exceeds V
1300	11.2	183.02	39.07	III	III	Exceeds V
2950	15.9	254.80	60.00	III	III	Exceeds V
1300	12	196.40	41.47	III	III	Exceeds V
1200	13.5	238.69	49.02	III	III	Exceeds V
1200	16.2	287.10	57.73	IV	III	Exceeds V
2600	22.45	366.83	78.31	V	IV	Exceeds V
1829	16.14	259.97	63.72	V	III	Exceeds V
2500	9.5	145.36	39.24	65-D	65-D	Exceeds V
1300	12.7	208.03	66.31	65-D	100-D	Exceeds V
1850	11.2	180.75	58.70	65-D	65-D	Exceeds V
3600	19.1	298.66	70.62	100-D	100-D	Exceeds V
2600	15.1	244.34	56.46	100-D	65-D	Exceeds V
2600	15.4	249.33	57.34	65-D	65-D	Exceeds V
3600	13.5	208.07	69.75	100-D	100-D	Exceeds V
2600	11.4	182.60	60.46	65-D	65-D	Exceeds V
2600	13.5	217.63	51.76	100-D	65-D	Exceeds V
3600	16.1	250.15	82.71	100-D	100-D	Exceeds V

*Conduit experienced significant longitudinal cracking

Tabla de resultados del informe presentado en la Conferencia de Canadá

En la tabla los resultados de cálculo corresponden a apoyo tipo C, con cama de arena a 90° que ha sido la empleada en los casos estudiados. Para cama de apoyo tipo A, cama de hormigón a 120°, aumenta considerablemente el factor de apoyo y disminuye la clase ASTM necesaria.

En todos los casos la clase necesaria en terraplén era superior a la V de la norma ASTM. Solamente se ha encontrado un caso con fisuración longitudinal evidente cuyas causas no han sido analizadas (nota al pie del cuadro adjunto).

En cualquier caso, es lógico que haya cierto recelo porque hay parámetros geotécnicos que se obtienen directamente de otros geométricos siendo quizás el más representativo el de la *Ilustración 9* que relaciona el espesor de material compresible con la razón de asentamiento. Lo que más llama la atención es que vale para cualquier material compresible de relleno ya que no se definen parámetros para el mismo.

La ASCE en sus manuales de Ingeniería Práctica dice que “El conocimiento actual de los valores de la razón de asentamiento que deben emplearse en estos casos especiales (de carga) es muy pobre (*very meager*)” y considera a renglón seguido que un valor recomendable sería de $-0,3$, al menos en el cálculo del factor de apoyo ya que se reduce la carga vertical frente a la lateral.

Condicionantes prácticos

El sistema de ejecución de la zanja inducida en terraplén requiere de varias acciones singulares entre ellas la interrupción del terraplenado a una cierta altura y el comienzo de una nueva excavación y relleno. Interrumpe el tajo, por tanto, cualquiera que haya ejecutado una zanja inducida la recuerda y si no lo recuerda es que no la ha hecho (causa de patología grave).



Fotografía de rotura de tubería que se proyectó con zanja inducida y no se ejecutó

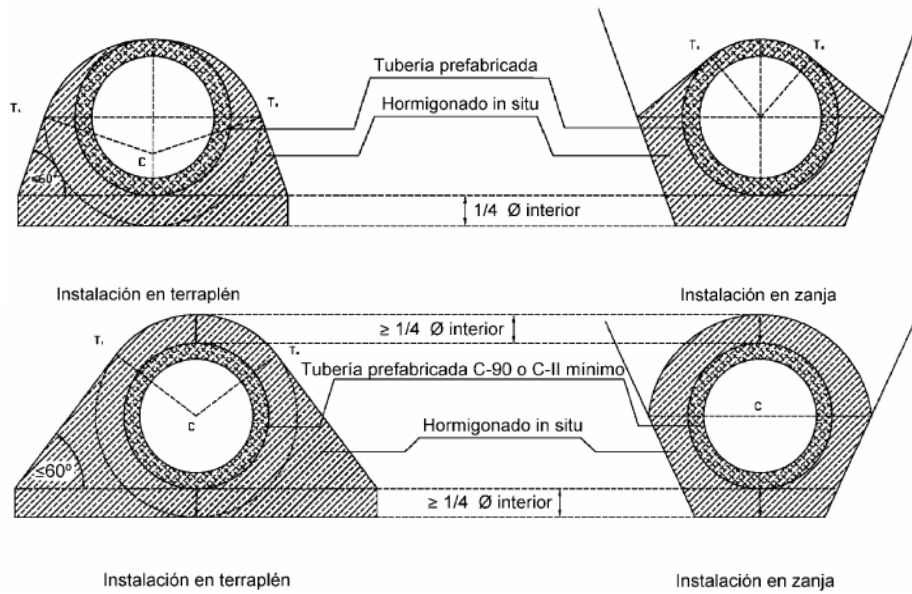
Previamente debemos decidir si es la solución óptima y qué condicionantes especiales tiene.

Lo primero que haremos será el cálculo de las tuberías de hormigón siguiendo las directrices marcadas por la UNE 127.916, calculándose de esta forma la CLASE resistente necesaria en terraplén.

Cuando nos encontramos con una altura de tierras tal que no es posible el empleo de una CLASE normalizada con la instalación prevista, antes de optar por otro tipo de instalación se intentará la mejora del factor de apoyo, y si esto no es suficiente se planteará la instalación en zanja inducida.

Para mejorar el factor de apoyo podemos ir a cama de hormigón e incluso a cama de hormigón a 180°, y como otra opción los apoyos especiales que figuran en la UNE 127.916 con secciones macizadas.

La zanja inducida debe limitarse por tanto al tramo central del terraplén y solamente cuando las alturas de terraplén **superen los 10 m**, en otro caso pueden producirse deformaciones importantes en el firme ya que la altura del plano de igual asentamiento es grande y suele superar los 6 m sobre la clave del tubo para tubos de ϕ 1800 mm.



Instalaciones de tuberías macizadas de la UNE 127.916



Iniciamos la ejecución de la zanja inducida como si se tratara de un terraplén. Recomendamos que el tubo sea, a pesar de que los cálculos nos permitan una clase inferior, de clase UNE 135 ó ASTM IV, que el apoyo sea en cama de hormigón a 120° y que esta tipología se extienda a toda la obra. Esta disposición aunque podría optimizarse permite mantener una seguridad adicional.

Tubería colocada en cama de hormigón a 120° y clase UNE 135, en toda la longitud

Dado que en las labores posteriores el tubo estará tapado, es vital que coloquemos unas referencias bien visibles de la ubicación del tubo.



Se terraplena hasta una altura determinada que será normalmente de la misma altura que el diámetro exterior, en caso de ser una tubería.

Sobre el tubo se ejecuta una zanja que no debe alcanzar los extremos del terraplén, limitándose a la zona donde no valga la tubería de clase 135 ó IV que hayamos dispuesto.

Zanja sobre la clave del tubo de drenaje



La zanja se rellena de **material compresible**.

En el contacto con el terraplén es habitual colocar un geotextil para evitar la contaminación del terraplén con el material compresible que puede alterar las condiciones de éste.

Relleno compresible. Ramaje

Sobre este relleno la compactación es casi inexistente hasta alcanzar cierta altura, del orden de 1 m sobre el terraplén ejecutado, para poder pasar por encima con las máquinas extendedoras y compactadoras.



Secuencia de relleno de las primeras capas sobre la zanja inducida

Finalmente se sigue ejecutando el terraplén de la forma habitual.

Para evitar problemas de tubificación dentro del terraplén, si se trata de obras de drenaje, se calcularán para una altura de energía a la entrada, a caudal máximo, inferior a la altura del conducto, es decir $H_w/D < 1$. De esta forma evitamos la formación de un gradiente que pueda provocar el arrastre y pérdida de finos y la tubificación en el contacto del material compresible con el terraplén, aunque hayamos protegido con geotextil.

Si existen posibilidades de embalsamiento de agua a uno de los lados por no tener franca la salida debe desestimarse esta solución, que ya ha provocado algún problema, y optar por el refuerzo mediante recubrimiento exterior de hormigón, de las dimensiones adecuadas o bien otro tipo de estructura (triarticulada, abovedada,...).

Como ya se ha comentado anteriormente, en la literatura técnica se considera material compresible a: suelo orgánico suelto, paja suelta (no en balas, lógicamente) y virutas de madera (no apisonadas).

La tierra vegetal, sin más definición, puede resultar inadecuada, es decir, menos compresible de lo necesario para conseguir unos asentamientos como los de cálculo, sobre todo porque la tierra vegetal que separamos contiene además de suelos orgánicos parte del terreno que está en contacto. Por esta razón tienen sentido las aclaraciones de la ASCE anteriormente comentadas y, por tanto, se van a considerar unos parámetros de dimensionamiento iniciales como los siguientes.

En general los terraplenes no suelen ser de material granular exclusivamente por lo que emplearemos unos parámetros correspondientes a **Arena arcillosa** es decir $\lambda \mu = 0,15$ que nos deja del lado de la seguridad por lo general.

Consideraremos una altura de zanja de material compresible igual al diámetro exterior de la tubería, es decir, $\eta' = 1.0$ y un valor asociado de $h_0/b = 2,421$, para el cálculo de la carga de tierras. Las cargas de tráfico a estas profundidades se pueden despreciar.

Para el cálculo del factor de apoyo seguiremos el mismo método que en el caso de terraplén, de forma que:

$$F_a = \frac{a}{n - v\theta}$$

Pero en este caso el valor de θ se obtiene para una carga vertical de tierras con un valor de $\delta' = 0,30$.

Conclusiones

La instalación en zanja inducida en terraplén es una solución muy ingenieril en la que podemos exprimir y aprovechar todos los conceptos teóricos de reducción de cargas del terreno.

Esto nos permite emplear una tubería o, en general cualquier obra enterrada, de menor clase resistente. Además, a través de estudios experimentales se ha comprobado que existe tal reducción de cargas, aunque haya atravesado una época de incertidumbre o más bien de susceptibilidad frente a este tipo de instalaciones.

Sin embargo, no debemos olvidar que la ejecución de la instalación en zanja inducida es compleja y requiere de atenciones especiales, requiere también una modificación en el terraplenado, parando y partiendo el tajo y una selección del material de relleno a emplear.