

**ESTUDIO Y ANALISIS DEL IMPACTO QUE TIENEN LAS CARGAS VIVAS
Y MUERTAS EN EL COLAPSO DE TUBERIAS ENTERRADAS**

SERAFIN FLOREZ RAMIREZ

CESAR AUGUSTO QUIÑONES MARRIAGA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

CARTAGENA DE INDIAS D.T. y C., NOVIEMBRE DE 2003

**ESTUDIO Y ANALISIS DEL IMPACTO QUE TIENEN LAS CARGAS VIVAS
Y MUERTAS EN EL COLAPSO DE TUBERIAS ENTERRADAS**

SERAFIN FLOREZ RAMIREZ
CESAR AUGUSTO QUIÑONES MARRIAGA

Monografía presentada como requisito para el Minor en Ingeniería Mecánica

Director:
JULIO CESAR CANTILLO
Ingeniero Mecánico

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T.y C., NOVIEMBRE DE 2003

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Cartagena de Indias D.T. y C., Noviembre de 2003

Cartagena de Indias D.T y C., Noviembre 7 de 2003

Señores:

Comité Evaluador

Departamento de Ingeniería Mecánica

Apreciados señores:

Por medio de la presente me permito informarles que la monografía titulada **“ESTUDIO Y ANALISIS DEL IMPACTO QUE TIENEN LAS CARGAS VIVAS Y MUERTAS EN EL COLAPSO DE TUBERIAS ENTERRADAS”** ha sido desarrollada de acuerdo a los objetivos establecidos.

Como autores del proyecto consideramos que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente,

Serafín Florez Ramírez

Cesar A. Quiñones Marriaga

Cartagena de Indias D.T y C., Noviembre 7 de 2003

Señores:

Comité Evaluador

Departamento de Ingeniería Mecánica

Apreciados señores

Por medio de la presente me permito informarles que la monografía titulada **“ESTUDIO Y ANALISIS DEL IMPACTO QUE TIENEN LAS CARGAS VIVAS Y MUERTAS EN EL COLAPSO DE TUBERIAS ENTERRADAS”** ha sido desarrollada de acuerdo a los objetivos establecidos.

Como director del proyecto considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Atentamente,

Ing. Julio Cesar Cantillo

CONTENIDO

INTRODUCCION

1. ANTECEDENTES HISTORICOS

2. TUBERÍAS DE POLIVINIL CLORURO (PVC)

2.1 COMPORTAMIENTO DE LAS TUBERÍAS DE PVC

3. TUBERÍAS ENTERRADAS

3.1 CLASIFICACIÓN DE LAS CARGAS

3.1.1 CARGAS MUERTAS

3.1.2 CARGAS VIVAS

3.2 DEFLEXIÓN COMO RESULTADO DE CARGAS EN TUBERÍAS FLEXIBLES

4. TUBERÍAS DE HIERRO DÚCTIL

4.1 TUBERÍA DE HIERRO DÚCTIL (DIP)

4.1.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA TUBERÍA DE HIERRO DÚCTIL

4.2 TUBERÍA DE ACERO

4.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS

5. CONDICIONES DE TENDIDO

5.1 DIRECCIÓN, ALINEAMIENTO Y PENDIENTE

5.2 ANCHO DE LA ZANJA

5.3 APOYO DE LA TUBERÍA

5.4 PREPARACIÓN DE LA FUNDACIÓN

5.5 ENCAMADO

5.5.1 TIPOS DE ENCAMADOS

5.6 ACOSTILLADO

5.7 RELLENO INICIAL

5.8 RELLENO FINAL

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades físicas del PVC 1114	8
Tabla 2. Esfuerzo Vs. Tiempo de falla	11
Tabla 3. Valores de Impacto (F)	19
Tabla 4. Valores de E, para la formula de IOWA	22
Tabla 5. Valores de D_e para la formula de IOWA	23
Tabla 6. Valores de g , para distintos materiales de relleno	24
Tabla 7. Descripción de los Tipos de Suelos	25
Tabla 8. Propiedades Físicas del Hierro Dúctil	28

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esfuerzo de tensión de falla debido a presión hidrostática interna 10 en una tubería fabricada con resina de PVC tipo I grado I (PVC 1114) en función del tiempo de prueba según ASTM - 2837 - 1969.	
Figura 2. Diagrama de presiones.	14
Figura 3. Valor del coeficiente C_s para cargas verticales superpuestas concentradas.	20
Figura 4. Condiciones de tendido.	40

INTRODUCCION

Debido a la creciente industrialización de los últimos años, se ha dado notable desarrollo en las líneas de tuberías (agua, gasolina, petróleo, etc.). Es de nuestro interés como Ingenieros Mecánicos conocer, la manera de como interactúan los factores suelo-estructura que intervienen en la instalación de un sistema de tuberías para que opere bajo tierra. Es claro que muchas de las estructuras enterradas, usualmente no llegan a soportar la combinación de cargas a las cuales son sometidas durante su ciclo de servicio.

Por tal razón todo tipo de tubería debe ser instalado de acuerdo con las normas y códigos existentes a fin de asegurar su correcto funcionamiento. El tipo de material de relleno y los requisitos sobre compactación deben ser determinados durante el diseño, como los cálculos de las cargas muertas y vivas para garantizar el buen funcionamiento de la línea de tubería.

1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Siempre que una civilización alcanza un cierto grado de desarrollo tal que inspire el deseo por ciertas clases de comodidades, alguna forma de sistemas tuberías es inventada para satisfacer ese deseo de comodidades. De esta forma, el uso de las tuberías es anterior a la historia misma. Tuberías de arcilla (4.000 años A.C) en Babilonia, sistemas de distribución, en tuberías de plomo con valcucería de bronce (87 años A.C) en las ruinas de Pompeya, tuberías de madera, así como tuberías de piedras agujereadas, han sido utilizados en muchas partes del mundo durante siglos.

El uso de tuberías de hierro fundido para conducción de agua siguió, evidentemente, a la invención de cañones de hierro fundido usados en Gante en 1313. En 1562 se hicieron los tendidos de tuberías de este mismo material para el suministro de las fuentes de Ratanes que, Luis XIV, en su intento de imitar las fuentes de las villas italianas instaló para sus fuentes de Versalles. Este sistema continúa en uso, así como otras muchas instalaciones de este tipo en Europa y Estados Unidos.

El uso común de tuberías de hierro fundido, como conducto de agua, comenzó en la primera década del siglo XIX. A causa de su resistencia en conducciones subterráneas, continua siendo especificado para los nuevos sistemas de suministro de agua. El hierro quizás haya sido utilizado como tubería y accesorios hace mucho tiempo, pero debido a la corrosión no ha sido encontrada ninguna evidencia en este sentido.

El desarrollo y amplio uso de la máquina de vapor, que comenzó a finales del siglo XVIII creó la necesidad de usar materiales capaces de soportar mayores presiones y temperaturas, que las que se habían utilizado anteriormente. Las tuberías de acero pronto empezaron a utilizarse y a extenderse, y muchos métodos de fabricación fueron vislumbrados. Después de la Primera Guerra Mundial, como las plantas energéticas y de proceso demandaban cada vez mayores presiones, tuberías hechas sin soldadura llegaron a ser de uso común. Aunque las tuberías de acero ganaron una aceptación constantemente en aumento a partir de finales de del siglo XVIII y principios del XIX, y habiendo sido fabricadas en grandes cantidades en los comienzos del siglo XX, las válvulas y accesorios continuaron siendo hechas de hierro fundido. Los métodos de unión de tuberías no sufrieron ningún adelanto de importancia durante ese tiempo. Conexiones roscadas han sido utilizadas durante siglos. Las conexiones embridadas para tuberías de acero eran, o bien forjadas integralmente, o a la brida roscada a la tubería.

Aunque tuberías y accesorios para alta presión han sido fabricados desde hace más de treinta años, uniones a prueba de fugas eran desconocidas hasta la relativamente recién aparición de la soldadura.

En los últimos años se ha venido implementando nuevos materiales para la fabricación de tuberías. Materiales como los termoplásticos Acrilonitril-Butadieno - Estireno (ABS), el Polivinil Cloruro (PVC) y el Polietileno de Alta Densidad (HDPE) poseen atributos generales normalmente asociados a los plásticos como ligero peso, largas longitudes, juntas herméticas, resistencia a la corrosión, etc. Las tuberías de PVC se emplean extensamente en instalaciones hidráulicas (redes de distribución y conducción de agua), instalaciones eléctricas (como protector de cables), industriales (conducción de fluidos corrosivos), gas natural y L.P. (líneas de distribución de gas), etc.

2. TUBERÍAS DE POLIVINIL CLORURO (PVC)

La tubería hidráulica de PVC inicia su historia en Latinoamérica en el año 1964 con la instalación de las primeras redes. Las técnicas utilizadas se basaron en la experiencia de varios países europeos, especialmente Alemania, en donde ya se usaba con éxito desde 15 años antes.

En el período de 1964 a 1970 creció su demanda en el campo del abastecimiento de agua junto con ésta la necesidad de mayor difusión de literatura técnica sobre el diseño de redes y los criterios de instalación más apropiados. En este lapso se empezaron a usar también en Estados Unidos el mismo tipo de tubería y las compañías fabricantes en ese país efectuaron muchos estudios y publicaciones técnicas.

La American Society for Testing And Materials (ASTM) Comité D-20 define Plástico como: "Un material que contiene esencialmente moléculas orgánicas de muy alto peso molecular, sólido en su estado final y en algunas etapas de su fabricación es formado por flujo a su forma final".

La gama de características y propiedades de los plásticos es probablemente mayor que la existente entre los diferentes metales (plomo

- cobre - acero, etc.). Entre los plásticos más comunes (PVC - ABS - Polietileno - Epoxy), hay grandes diferencias en sus propiedades físicas y químicas: así mismo cada uno de éstos tiene diferentes tipos y grados. Los tipos y grados de cada plástico se refieren a una clasificación basada en las propiedades físicas y químicas. Por ejemplo el PVC tiene 4 tipos, los cuales a su vez pueden tener varios grados, así el Tipo 1 tiene excelente resistencia a la tracción y buena resistencia química aunque su resistencia al impacto es menor a la del tipo II, éste a su vez no tiene tan buena resistencia a la tracción y a los agentes químicos (corrosión) como el tipo I, pero presenta mayor resistencia al impacto. De estas variedades el PVC tipo I, Grado I, es el que reúne las características físicas y químicas más apropiados para la fabricación de tuberías para abastecimiento de agua.

Para la mejor identificación, de los variedades de PVC antes mencionados se les ha dado una clave compuesta de cuatro números: El primer número se refiere al tipo de PVC, el segundo número se refiere al grado del mismo y el 3 y 4 se refiere al esfuerzo de diseño empleado, dividido entre 10, así tenemos que el PVC 1114 es el tipo I grado I, con esfuerzo de diseño a la tensión de 140 kg/cm^2 .

La tubería de PVC fue desarrollada por primera vez en Alemania alrededor de 1930 y desde entonces ha ganado gran aceptación mundial.

La aceptación de las tuberías de PVC se debe a sus ventajas económicas y técnicas. Algunas de estas propiedades son:

1. Gran resistencia a la corrosión.
2. Alta resistencia química.
3. Alta resistencia al envejecimiento.
4. Bajo coeficiente de elasticidad.
5. Bajo coeficiente de fricción.
6. Bajo peso.
7. Facilidad de instalación.
8. Gran resistencia al golpe de ariete.

Como todos los materiales, el PVC tiene ciertas limitaciones, los cuales son:

- a) A temperaturas cercanas o inferiores a 0°C la resistencia al impacto se reduce.
- b) Para conducción de fluidos a presión y a temperaturas mayores de 25°C, debe aplicarse un factor para reducir la presión máxima de trabajo o aumentar el espesor mínimo de pared del tubo.
- c) La tubería de PVC tipo I grado I no debe quedar expuesta a los rayos solares por períodos prolongados, ya que éstos pueden afectar ciertas propiedades mecánicas del tubo.

Las tuberías de PVC se emplean extensamente en instalaciones hidráulicas (redes de distribución y conducción de agua), instalaciones eléctricas (como protector de cables), industriales (conducción de fluidos corrosivos), gas natural y L.P. (líneas de distribución de gas), etc.

2.1 Comportamiento de las Tuberías de PVC

a. Resistencia Química

La tubería de PVC es altamente resistente al ataque químico de suelos agresivos, de aguas conducidas y en general de ácidos, álcalis y soluciones salinas. Se ha demostrado que el ataque de algas, hongos, bacterias, etc. carece de importancia por no haber material nutriente en el PVC.

b. Resistencia y propiedades físicas del PVC tipo I grado I (PVC 1114)

A continuación se enumeran las características más importantes de acuerdo a los métodos recomendados por ASTM.

Tabla 1. Propiedades físicas del PVC 1114

Características	Valor	Métodos de Prueba ASTM
Densidad	1,4 g/cm ³	-
Resistencia mínima al impacto - Izod.	3,55 cm/kg f/cm de ranura	D - 256 – 73c
Resistencia mínima a la tensión	492 kg f/cm ³	D - 638 - 76
Temperatura mínima de deflexión	70°C	D - 648 - 72
Módulo de elasticidad	2,81 x 10 ⁴ kg/cm ²	D - 638 - 76
Resistencia química	H ₂ SO ₄ (conc. 93%, 14 días y 55°C) incremento de peso máx. 5%.	D - 543 - 67
	Aceite ASTM N°3 (30 días y 23°C) incremento de peso máx. 1%	D - 471 - 75
Flamabilidad	Autoextinguible Δ	D - 635 - 76
Dilatación térmica lineal	0,08 mm/m/°C de t°	

Las tuberías de PVC están diseñadas para trabajar dentro de su límite elástico, al igual que las tuberías de acero y en general de todas aquéllas

fabricadas con materiales clasificados como visco-elásticos. Los materiales plásticos se pueden comportar plástica o elásticamente en función de la temperatura, esfuerzo y tiempo.

Para conocer los valores de esfuerzo del PVC a largo plazo, es necesario efectuar pruebas a tiempos muy largos, y los equipos convencionales para efectuar estas pruebas (Máquina Universal, etc.) resultan imprácticos. Por esta razón ASTM (33) en conjunto con otras instalaciones desarrollaron el método que a continuación se describe para encontrar la curva de esfuerzo del PVC y otros materiales plásticos.

A una serie de tubos de PVC se les aplican diferentes presiones hidráulicas internas constantes y los tiempos de falla se grafican en función de los esfuerzos de tensión de falla. El esfuerzo a la tensión que hace fallar al tubo se obtiene teóricamente empleando la ecuación universalmente aceptada, según recomendación ISO-R-161 para tubos de materiales plásticos para el transporte de fluidos:

$$S = \frac{P(D-e)}{2e}$$

Los resultados de estas pruebas se trataron estadísticamente para determinar la curva más representativa. En miles de pruebas efectuadas a especímenes de tubos de PVC tipo I grado I, se encontró que el

resultado representado en papel logarítmico era una línea recta y que las variaciones en los resultados de estas pruebas en los diferentes compuestos son insignificantes, Fig. N° 1.

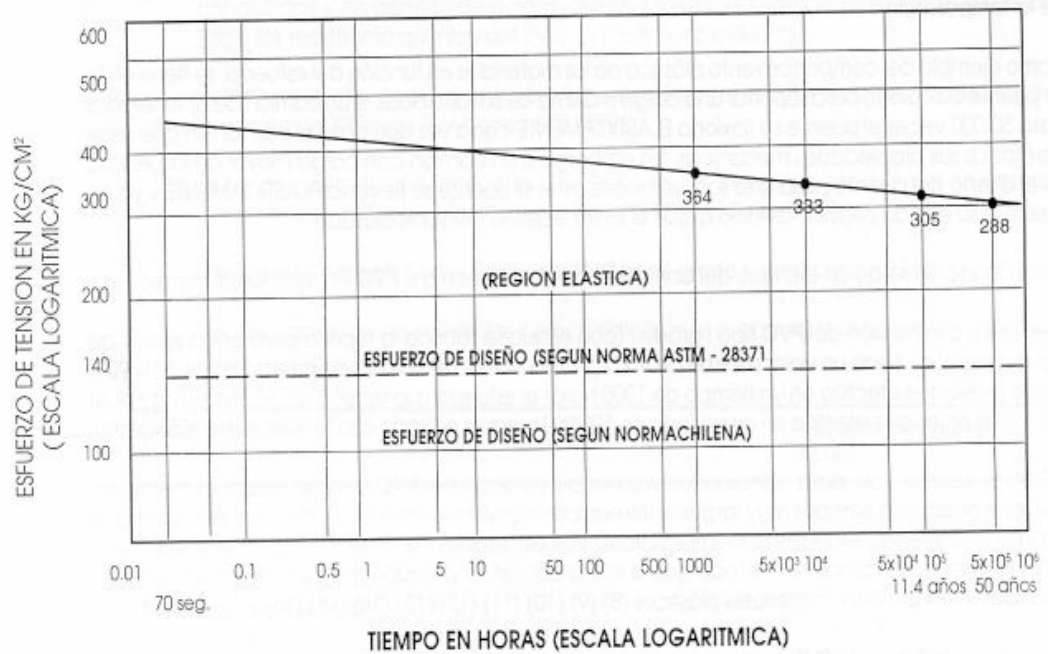


Figura 1. Esfuerzo de tensión de falla debido a presión hidrostática interna en una tubería fabricada con resina de PVC tipo I grado I (PVC 1114) en función del tiempo de prueba según norma ASTM - 2837 - 1969.

A continuación se anotan algunos de los resultados:

Tabla 2. Esfuerzo Vs. Tiempo de falla

Tiempo hasta falla	Esfuerzo a la tensión sostenido hasta falla
60 - 90 s	450 kg/cm ²
1.000 horas	364 kg/cm ²
10.000 horas	333 kg/cm ²
100.000 horas	305 kg/cm ²
50 años	288 kg/cm ²
500 x 10 ⁷	140 kg/cm ²

c. Presiones de trabajo y relación de dimensiones.

Las tuberías de PVC para conducción de agua están calculadas con el esfuerzo permisible de diseño ($\leq 140 \text{ kg/cm}^2$) para asegurar que la tubería de PVC siempre trabaje dentro de su límite elástico. La selección del valor de esfuerzo de diseño parte básicamente de dos criterios, el norteamericano y el alemán. Estos países son los que han hecho más estudios y más han contribuido con la información al respecto. El resto de los países, incluyendo a Colombia, han tomado como base para sus normas uno u otro criterio, haciéndole ciertas variaciones.

Es lógico pensar que cada país en función de sus condiciones climatológicas, de suelo, de disponibilidad de materias primas, de condiciones de instalación y de otros factores, han modificado, de acuerdo a sus necesidades, cualesquiera de los dos criterios base seleccionados como patrón.

Los espesores de pared de los tubos de PVC están calculados de acuerdo con la expresión dada en la Norma ISO-R-161 para tubos de plástico para conducción de fluidos a presión:

$$S = \frac{P(D-e)}{2e}$$

En donde:

S = Esfuerzo de diseño o sea el esfuerzo hidrostático máximo de trabajo

P = Presión máxima de trabajo (kg/cm²)

D = Diámetro exterior (cm)

e = Espesor mínimo de pared (cm)

La nomenclatura empleada para definir las presiones de trabajo en función de la Relación de Dimensiones "RD" está de acuerdo a la norma ASTM D-2241-711 y se expresa con la siguiente ecuación:

$$RD = \frac{D}{e}$$

En donde:

D = Diámetro exterior (cm)

e = Espesor de pared mínimo (cm)

Combinando las dos ecuaciones anteriores se tiene que:

$$\frac{2S}{P} = RD - 1$$

Ahora, la presión de trabajo se obtiene despejando P de la ecuación anterior obteniendo:

$$P = \frac{2S}{RD - 1}$$

Finalmente, el factor de seguridad sería:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Pr esión de ruptura}}{\text{Pr esión de trabajo}}$$

3. TUBERÍAS ENTERRADAS

Cuando se instala una tubería bajo tierra, esta queda sometido a un régimen de cargas: presiones verticales y horizontales del terreno, peso propio, presión interna, cargas superficiales estáticas o dinámicas, y esfuerzos sísmicos, que afectan su comportamiento mecánico. La magnitud de estas cargas dependerá sus propiedades físicas, las dimensiones de la zanja, el tipo de suelo y el método de instalación de la tubería.

Por la Ley de Pascal sabemos que la presión que ejerce un líquido sobre las paredes que lo contienen es proporcional a la profundidad y a la densidad de líquido contenido. Los suelos ejercen sobre las superficies una presión similar a los líquidos pero de menor magnitud.

La presión se representa entonces como una carga triangular

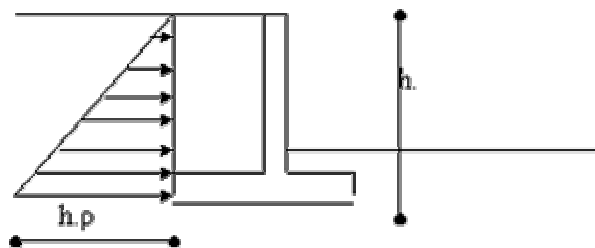


Figura 2. Diagrama de presiones.

Donde:

ρ : es la densidad del líquido o del líquido equivalente que representa al suelo.

ρ *equivalente* = $k_a \cdot \rho$ *suelo*, donde k_a es menor que 1

h: altura

3.1 Clasificación de las Cargas

Existen dos clases de cargas que actúan sobre cualquier estructura diseñada para operar por fuera o por debajo de la superficie. Estas son:

3.1.3 Cargas Muertas

Son aquellas cuya magnitud y posición, permanecen prácticamente constantes durante la vida útil de la estructura. Son provocadas por el efecto del peso del tubo, accesorios, revestimiento, relleno sobre la tubería, etc. Dentro de las cargas muertas también se pueden clasificar aquellos equipos permanentes en la estructura. En general las cargas muertas se pueden determinar con cierto grado de exactitud conociendo las densidades de los materiales.

Determinación de cargas muertas

Para determinarlas se usa la teoría de Marston, la cual se expresa mediante:

$$W_c = C_d \gamma_t B_d D$$

W_c : carga muerta (kg/m de tubería)

C_d : coeficiente de Marston

γ_t : densidad del material de relleno (kg/m³)

B_d : ancho de la zanja medido en el lecho superior del tubo (m)

D : diámetro exterior del tubo

También la ecuación de Marston se puede expresar:

$$W_c = \gamma_t H D \left[C_d \frac{B_d}{H} \right]$$

En esta ecuación el término ($\gamma_t \times H \times D$) representa la presión del peso del prisma vertical del suelo sobre la tubería. El factor C_d indica la reducción que sufre esta carga del prisma, debido a la acción de fuerzas de fricción generadas por el asentamiento del material de relleno, con respecto a los bordes de la zanja.

Aunque los datos obtenidos por Marston se aproximan a las presiones reales, algunos datos experimentales indican que las fuerzas de fricción que actúan en los lados de la zanja, pueden tender a desaparecer en el largo plazo y la presión última se aproximarían a la carga del prisma tal como se puede establecer en la siguiente ecuación:

$$W_C = g_t H D \quad (\text{Ecuación del Prisma})$$

Por último es necesario destacar que la carga real que actúa en un tubo flexible, en los casos más desfavorables, está ubicada en algún lugar entre Marston y la ecuación del Prisma, lo que significa que el uso de esta última implica resultados más conservadores. En todo caso, para el cálculo de deformación de tuberías se podría considerar que es la carga del prisma la que actúa a objeto de incluir un factor de seguridad adicional aunque ya no incluye el factor de deformación de largo plazo.

3.1.4 Cargas Vivas

Son cargas variables en magnitud y posición debidas al funcionamiento propio de la estructura, del tráfico (por vehículos) transmitidas a través del material de relleno sobre el tubo, peso del líquido transportado, el viento, los sismos, olas y corrientes, etc.

Estudios hechos en tuberías rígidas y flexibles enterradas han demostrado que:

1. Las cargas desarrolladas sobre la tubería rígida son mayores que las desarrolladas sobre la tubería flexible.
2. Las cargas externas tienden a concentrarse directamente debajo del tubo rígido, creando un momento de aplastamiento que debe ser resistido por las paredes del tubo. En los tubos flexibles la carga se distribuye uniforme en el perímetro del tubo, y la carga en cualquier punto es menor que en tuberías rígidas.
3. Las cargas externas son soportadas por fuerzas de compresión en la sección transversal de la tubería. En tubos flexibles, parte de estas cargas son anuladas por la presión hidráulica interna, y otra parte transmitidas lateralmente al material alrededor del tubo, dependiendo del espesor de éste, del módulo de elasticidad del tubo y características del tipo de relleno.

Conforme se va deformando la tubería (sin fracturarse), transfiere la carga vertical en reacciones horizontales radiales, y son resistidas por la presión pasiva de la tierra alrededor del tubo. Cuando la pared de éste es rígida, lo anterior no ocurre, sino que toda la carga tiene que

ser soportada por el tubo, a diferencia de la tubería de PVC la cual transmite parte de la carga al terreno alrededor del tubo.

Determinación de cargas vivas

Para calcular las cargas vivas en tuberías flexibles se usó el criterio recomendado por A.W.W.A.

$$W_e = C_s \frac{P_c F}{L}$$

W_e : carga viva (kg/m de tubería)

C_s : coeficiente de carga en función del diámetro

P_c : carga concentrada en kg= 4.550 kg (A.W.W.A.)

F : factor de impacto

L : longitud efectiva del tubo en el cual ocurre la carga (m).

Tabla 3. Valores de Impacto (F)

Tipo de tráfico	Valor de F
Carretera	1.5
Ferrocarril	1.75
Aeropuertos	1.00

El valor normalmente aceptado para L (longitud de la tubería que está bajo la carga de impacto) es de 0,90 metros (AWWA).

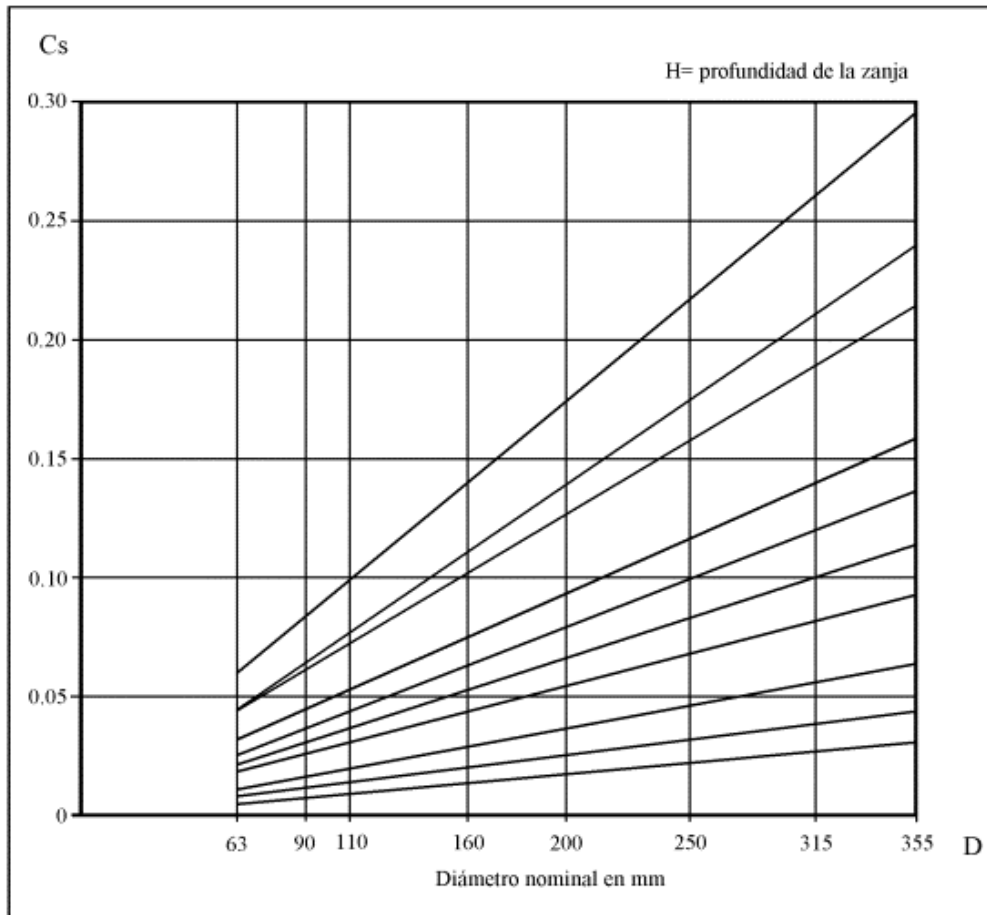


Figura 3. Valor del coeficiente C_s para cargas verticales superpuestas concentradas.

3.2 Deflexión como resultado de Cargas en Tuberías Flexibles

Varias fórmulas se han estudiado que relacionan la deflexión de la tubería flexible bajo cargas y las propiedades de la tubería y el suelo.

La fórmula más ampliamente utilizada es la siguiente ecuación, originalmente desarrollada por Spangler en la IOWA State University y

más tarde modificada por Spangler y Watkins, y conocida mundialmente como la fórmula IOWA.

$$\Delta x = \frac{K (De W_c + W_e)}{EI / r^3 + 0,061 E'}$$

Δx = máxima deformación transversal (m)

De = factor de deformación de largo plazo

K = constante encamado (varía de 0,11 a 0,083 para un ángulo de contacto de 0° ó 180°, respectivamente). Para tubos de PVC se considera el valor 0,10 (AWWA-ASTM)

W = We + Wc : carga vertical total actuando en la tubería por unidad de longitud (kg/cm)

r = (D – e)/2: radio promedio del tubo (cm)

E = módulo de elasticidad (kg/cm²)

I = momento de inercia de la pared del tubo por unidad de longitud (cm⁴/cm). En tuberías I= e³/12, siendo “e” el espesor medio de la pared del tubo.

E' = módulo de reacción del suelo.

Tabla 4. Valores de E, para la formula de IOWA

Tipo de suelo según ASTM 2321	Suelo según Unified Classification System (1)	Suelto	Sin compactación <85% Proctor <40% den. Rel	Moderada 85-95% Proctor 40-70% den. Rel.	Alta >95% Proctor >70% den. Rel.
V (2)	Suelos finos Límite líquido >50 Suelos con media a alta plasticidad CH, MH, CH-MH	No existe información. Consulte un mecánico de suelos o use $E = 0$			
IVa	Suelos finos. Límite líquido <50 Plasticidad media a sin plasticidad CL, ML, ML-CL con menos de 25% de partículas gruesas	3,5	14	28	70
IVb	Idem anterior con más de 25% de partículas gruesas	7	28	70	140
III	Suelos gruesos con más de 12% finos GM-GC, SM, SC3				

II	Gruesos con menos de 12% de finos GW, GP, SW, SP3	14	70	140	210
I	Chancado	70	210	210	210

Tabla 5. Valores de D_e para la formula de IOWA

Nota: N/R = no recomendable

		TIPO DE SUELO EXISTENTE					
			Tipo II	Tipo III	Tipo IVb <25% arenas	Tipo IVa y Tipo V	Suelos cementados con sales solubles
Material encamado	Suelo grano grueso	Tipo II	1	1,5	1,75	2,0	N/R
	Suelos cohesivos	Tipo III	1,5	1,6	1,75	N/R	N/R
		Tipo IVb	2,0	2,5	3,0	N/R	N/R
		Tipo IVa Tipo V	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R

Tabla 6. Valores de g_c para distintos materiales de relleno

MATERIAL DE RELLENO	γ_t según grado compactación (ton/m ³)			
	Suelto	Modera -do	Media	Alto
a. Granular grueso sin cohesión	1.8	1.9	2.0	2.2
b. Grava gruesa húmeda con contenido de finos	1.7	1.8	1.9	2.0
c. Grava fina, arena, maicillo	1.4	1.6	1.7	1.8
d. Limo no saturado	1.6	1.8	1.9	-
e. Arcilla saturada	1.5	1.4	1.5	1.7
f. Piedra pómez				

Tabla 7. Descripción de los Tipos de Suelos

TIPO DE SUELO	DESCRIPCION
CLASE I	Material granular manufacturado, angular de 6 a 40 mm de tamaño, tal como chancado, gravilla.
CLASE II	
GW	Ripios y mezclas ripio-arena de buena granulometría, con pocos o sin material fino. 50% o más retenido en malla N° 4. Más del 95% retenido en malla N° 200. Limpios.
GP	Ripios y mezclas ripio-arena de mala granulometría, con pocos o sin material fino. 50% o más retenido en malla N° 4. Más del 95% retenido en malla N° 200. Limpios.
SW	Arenas y arenas ripiosas de buena granulometría, con pocos o sin material fino. Más del 50% pasa malla N° 4. Más del 95% retenido en malla N° 200. Limpios.
SP	Arenas y arenas ripiosas de mala granulometría, con pocos o sin material fino. Más del 50% pasa malla N° 4. Más del 95% retenido en malla N° 200. Limpios.
CLASE III	
GM	Ripios limosos, mezclas ripio-arena, limo. 50% o más retenido en malla N° 4. Más del 50% retenido en malla N° 200.
GC	Ripios arcillosos, mezclas ripio, arena, arcilla. 50% o más retenido en malla N° 4. Más del 50% retenido en malla N° 200.
SM	Arenas limosas, mezclas arena-limo. Más del 50% pasa malla N° 4.

	Más del 50% retenido en malla N° 200.
SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla. Más del 50% pasa malla N° 4. Más del 50% retenido en malla N° 200.
CLASE IV	
ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas. Límite líquido 50% o menos. 50% o más pasa malla N° 200.
CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas ripiosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras. Límite líquido 50% o menos. 50% o más pasa malla N° 200.
MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos Límite líquido mayor de 50%. Pasa malla N° 200 o más.
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas. Límite líquido mayor de 50%. 50% o más pasa malla N° 200.
CLASE V	
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad. Límite líquido 50% o menos. 50% o más pasa malla N° 200.
OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta. Límite líquido mayor de 50%. 50% o más pasa malla N° 200.
PT	Turba y otros suelos altamente orgánicos.

4. TUBERÍAS DE HIERRO DÚCTIL

4.1 Tubería de Hierro Dúctil (DIP)

La tubería de hierro dúctil tiene reemplazada a la tubería de hierro fundido en uso y aplicación. Este se produce al darle tratamiento al hierro fundido con base de azufre bajo y agregándole magnesio bajo condiciones estrechamente controladas. El cambio sorprendente en el metal está caracterizado por el grafito libre que se deposita en forma de esferas o nódulos en lugar de que se deposite en forma de escamas como sucede con el hierro gris. Con el grafito libre en forma nodular, la continuidad de la matriz de metal está a un máximo, lo cual explica la formación de un material dúctil que supera, por márgenes muy amplios, al hierro gris, en cuanto a su ductilidad y resistencia a la tensión y al impacto.

Tabla 8. Propiedades Físicas del Hierro Dúctil

Hierro Dúctil Propiedades Físicas Mínimas de Tubería de Hierro Dúctil		
AWWA C151		ISO 2531
Estas propiedades se verifican por medio de muestras de tensión de la pared de la tubería.	Resistencia a la Tensión ... 60,000 psi	... 4200 Kg/cm ²
Estas propiedades se verifican por medio de muestras de tensión de la pared de la tubería.	Resistencia a la Cedencia ... 42,000 psi	... 3000 Kg/cm ²
Estas propiedades se verifican por medio de muestras de tensión de la pared de la tubería.	Elongación ... 10%	... 10%

4.1.2 Propiedades Mecánicas de la tubería de Hierro Dúctil

a. Resistencia a la Tensión

Una tubería tiene que aguantar tensiones severas causadas externamente por los movimientos de tierra y por cargas pesadas, e internamente también tiene que soportar la presión del agua y el golpe de ariete. La tubería de hierro dúctil tiene una resistencia última a la tensión de 4,200 Kg/cm² y resistencia a la cedencia de 3,000 Kg/cm². Debe además soportar una elongación mínima del 10%.

b. Resistencia a la Flexión.

El hierro dúctil se comporta con una gran flexibilidad antes de fallar. La habilidad del hierro dúctil para deformarse bajo carga, aumenta grandemente su capacidad de momento de flexión.

c. Cargas de Aplastamiento.

Las cargas de tráfico extremas, relleno pesado, o movimientos de la tierra causados por sismos y las presiones por expansión de la tierra, transmiten tremendas cargas a las tuberías bajo tierra. Las pruebas de flexión, las pruebas de flexión libre, y lo más duro de todo, las pruebas de anillo, las cuales determinan la habilidad que tiene la tubería para resistir cargas concentradas, muestran la superioridad de la tubería de hierro dúctil.

d. Resistencia a la Corrosión.

Numerosas pruebas de laboratorio y de campo han probado que la resistencia de la tubería de hierro dúctil contra la corrosión es igual o mayor a la del hierro vaciado, que ha servido a un buen número de organismos de servicio de agua de los EUA por más de 150 años, sin que la tubería lleve protección externa. En la mayoría de los suelos, el hierro dúctil no la necesita. En áreas de suelos altamente corrosivos, un

recubrimiento sencillo, económico de manga de polietileno ha proporcionado a la tubería una protección excelente en contra de la corrosión.

e. Resistencia al Impacto.

En prueba tras prueba, el hierro dúctil ha mostrado una gran resistencia al impacto. La rudeza de la tubería de hierro dúctil hace que esta sea mucho menos vulnerable a sufrir daños debidos a un manejo inadecuado o condiciones anormales de servicio. Y trabaja bajo condiciones de tráfico pesado, en ambientes de suelos no estables, en donde otros materiales pudiesen fallar debido a las tensiones causadas por cargas excesivas.

f. Gran Resistencia a las Altas Presiones.

La gran resistencia que la tubería de hierro dúctil tiene antes de reventarse, la hace ideal para aplicaciones de altas presiones. Esto proporciona un factor adicional de seguridad en contra del golpe de ariete.

4.2 Tubería de Acero

Las tuberías de acero modernas son fabricadas de aceros dúctiles con penetración completa de soldaduras a tope en las juntas. Comúnmente

son utilizadas para la conducción de hidrocarburos (oleoducto, poliducto, gasoducto) desde una estación de bombeo. Generalmente el Acero es considerado Acero-Carbón cuando ningún otro elemento es considerado como aditivo para obtener una aleación. Las tuberías de acero deben ser diseñadas de acuerdo con la American Water Works Association (AWWA) M11 y la American Society for Testing and Materials (ASTM)

4.3 Métodos de Análisis

El cálculo y diseño de tuberías enterradas se realiza normalmente mediante formulas aproximadas o métodos semiempíricos. A pesar de su amplia difusión, estas teorías no permiten explicar las fallas observadas en numerosas tuberías.

Tampoco es posible tener en cuenta el efecto de la pérdida de confinamiento lateral que ocurre cuando se satura o inunda el terreno natural. Este problema es de fundamental importancia en los suelos, y se ha convertido en una de las principales causas de rotura de tuberías. Los resultados obtenidos por medio de esta formulas:

$$P_v = \frac{f}{3 \left[\frac{D^2}{r^2} - \frac{D}{t} \right] \left\{ K_b - \frac{K_x}{\left[\frac{8 \frac{E}{E'}}{\left[\frac{D}{t} - 1 \right]^3 + 0.732} \right]} \right\}}$$

ESFUERZOS
QUE SE
PRODUCEN POR

$$P_v = \left[\frac{\Delta x 1 D}{12 K_x} \right] \left[\frac{8 E}{\left[\frac{D}{t_m} - 1 \right]^3} + 0.732 E' \right]$$

ESFUERZOS QUE
SE PRODUCEN
DEBIDO A

En donde:

P_v = carga de la zanja, tierra mas viva, N/m^2 (psi)

f = esfuerzo máx. de diseño, $330 N/m^2$ (48000 psi)

D = diámetro exterior, mm (in)

t = espesor del tubo, mm (in)

K_b = coeficiente del momento flector, 0.157

K_x = coeficiente de reflexión, 0.096

E = modulo de elasticidad, 165.475 MPa (24.000.000 psi)

E' = modulo de reacción del suelo, 3.5 MPa (500 psi)

t_m = mínimo espesor de manufactura, $t_m + 2$ mm ($t_m + 0.08$ in)

$\Delta X/D$ = relación deflexión/diámetro, 0.03 forrado en concreto, 0.05 forrado asfáltico y plástico

nos permiten determinar la influencia de la rigidez de la tubería y de la saturación del suelo en las deflexiones de la misma. La necesidad de considerar pequeñas y grandes deformaciones en el cálculo y la contribución del ancho de la trinchera y del módulo de deformación del relleno en las deflexiones de las tuberías. Se ha demostrado que los métodos tradicionales de cálculo tienden a predecir deflexiones y esfuerzos no conservadores, es por tal razón que se deben utilizar métodos numéricos para el análisis de tuberías enterradas.

Una alternativa para el estudio de tuberías enterradas es la utilización de modelos mecánicos, métodos analíticos, métodos empíricos, diferencias finitas, equilibrio límite, modelo de vigas, ensayos a escala, etc.

En el caso de tuberías rígidas, los métodos numéricos son los más utilizados para el cálculo, ya que posibilitan realizar sofisticados análisis a un bajo costo. Entre las técnicas más utilizadas se encuentra el Método de Elementos Finitos (MEF). Diferentes códigos de elementos finitos especializados permiten simular el comportamiento no lineal del suelo y considerar el efecto de éste sobre la estructura.

5. CONDICIONES DE TENDIDO

Como regla general las zanjas no deben ser excavadas con mucha anticipación al tendido de la tubería al evitar largos tramos de zanjas abiertas se obtienen las siguientes ventajas:

- a. Se reduce o elimina la necesidad de achicar o apuntalar.
- b. Se minimiza la probabilidad de inundación de la zanja.
- c. Se reduce la erosión de la porción inferior de las paredes causada por el agua subterránea.
- d. Se reducen los accidentes de tráfico y de los trabajadores.

5.1 Dirección, Alineamiento y pendiente

Es una practica común que los sistemas de alcantarillado sean construidos en dirección aguas arriba, partiendo desde el lugar de la descarga o de la boca de visita mas próxima a el. La excavación de la zanja debe ser ejecutada siguiendo los alineamientos y pendientes establecidos en los planos del proyecto.

5.2 Ancho de la Zanja

El ancho que tenga la zanja a la altura de la clave o "lomo" de la tubería tiene una influencia crucial en el comportamiento estructural de los conductos enterrados. La magnitud de las cargas que actúan sobre el conducto no son solo función del prisma de tierra que gravita sobre el, sino también de los adyacentes, que transmiten su peso mediante fuerzas cortantes verticales ejercidas sobre prisma central. De allí que resulta recomendable mantener el ancho de la zanja lo menor posible, siempre que este permita una adecuada instalación. Por otro lado, un ancho de zanja excesivamente pequeño limita la buena compactación del relleno alrededor de la tubería.

Naturalmente, el ancho de la zanja por encima de la clave de la tubería dependerá de múltiples factores como son: la profundidad de la zanja, el tipo de suelo excavado, presencia de agua subterránea, disponibilidad de espacio, adyacencia a vías o estructuras existentes, etc.

5.3 Apoyo de la Tubería

El tipo y la calidad del apoyo que tenga una tubería que ha sido tendida en una zanja, es otro factor que influye notablemente en la capacidad de soporte de los conductos enterrados. El fondo de la zanja debe

conformarse para proveer un apoyo firme, estable y uniforme a lo largo de toda la longitud de la tubería.

Las especificaciones para la compactación del material de relleno en la zanja se exponen en el aparte correspondiente al "Grado de Compactación", el cual depende de la clasificación de los suelos empleados en el relleno.

Independientemente del tipo de apoyo especificado, se deberán excavar pequeños nichos o hendiduras en el lecho de apoyo en aquellos puntos donde vaya a estar ubicada una junta, para así alojar a los extremos acampanados de las tuberías, permitiendo que los tramos estén uniformemente soportados y alineados.

5.4 Preparación de la Fundación

Una instalación de tubería sólida comienza con una fundación estable. El fondo de la zanja debe ser apenas sobre-excavado para permitir el material de encamado y debe estar libre de piedras, trozos de tierra, suelo congelado o desechos.

Se podrá requerir de una sobre-excavación o de una sub-excavación a fin de retirar crestos de roca, fango u otros materiales no apropiados ya

que podrían no proporcionar un soporte uniforme y apropiado a la tubería. ASTM y fabricantes independientes de tubería podrán también proporcionar pautas adicionales en relación a las necesidades de la fundación en estas situaciones, en base a la severidad de las condiciones locales.

La presencia de agua en la zanja durante la instalación de la tubería puede crear una situación de peligro y hacer casi imposible la instalación correcta de la tubería. En estas situaciones se requiere de efectuar un desagüe.

5.5 Encamado

El encamado es la porción de la envoltura del relleno la cual se coloca directamente sobre la fundación. Deberá ser suficiente como para proporcionar un soporte uniforme y firme para la tubería y mantener el grado de esta; la profundidad de encamado que se usa comúnmente para referencia es el de 4" (0.1 m); como se muestra en la figura 4.

5.5.1 Tipos de Encamados

a. Zanja tipo 2: encamado con ligera compactación mayor que el 75% de la densidad estándar Proctor.

b. Zanja tipo 3: encamado con ligera compactación mayor que el 80% de la densidad estándar Proctor.

c. Zanja tipo 4: encamado con compactación media mayor que el 85% de la densidad estándar Proctor.

d. Zanja tipo 5: encamado con alta compactación mayor que el 90% de la densidad estándar Proctor.

Nota: una capa de suelo suelto de por lo menos 100 mm de profundidad debe ser usada como una plantilla inferior para todas las condiciones de zanja.

5.6 Acostillado

El área de acostillado de la envoltura del relleno proporciona la mayor parte de la resistencia contra cargas de suelos y tráfico. El material de relleno debe ser instalado en capas o niveles, en forma uniforme a cada lado de la tubería. Materiales de mayor tamaño y más angulares pueden generalmente ser colocados en capas más gruesas que material con partículas de menor tamaño y de forma más redonda. El relleno debe ser paleado bajo la tubería, cuidando de llenar los vacíos. Si se requiere de compactación, esta debe ser realizada de manera tal que no se altere la

alineación de la tubería. La construcción de relleno debe continuar hasta el centro de la tubería a fin de completar el área de acostillado, como se muestra en la Figura 4.

5.7 Relleno Inicial

El relleno inicial distribuye las cargas hacia el acostillado. Esta área de la envoltura del relleno se extiende desde el centro de la tubería hasta un mínimo de 6" (0.15m) por encima de la tubería; refiérase a la figura 4. Debe ser colocada y compactada en tapas. Si se va a hacer uso de compactadores mecánicos, es importante no utilizar el equipo directamente sobre la tubería misma.

5.8 Relleno Final

El relleno final se extiende desde el relleno inicial hasta el tope de la zanja. En instalaciones de tráfico, la altura total del relleno inicial y relleno final debe ser de por lo menos 1' (0.3m); refiérase a la Figura 4. Debido a que esta parte de la instalación no soporta en forma directa la tubería, el tipo de material y nivel de compactación debe basarse en las condiciones de carga de la superficie. Por ejemplo, si caminos o vías cruzarán la tubería, un material relativamente resistente y de un alto nivel de compactación será necesario a fin de prevenir la sedimentación. Por el

contrario, si la sedimentación de la superficie no es un problema, entonces la compactación es innecesaria.

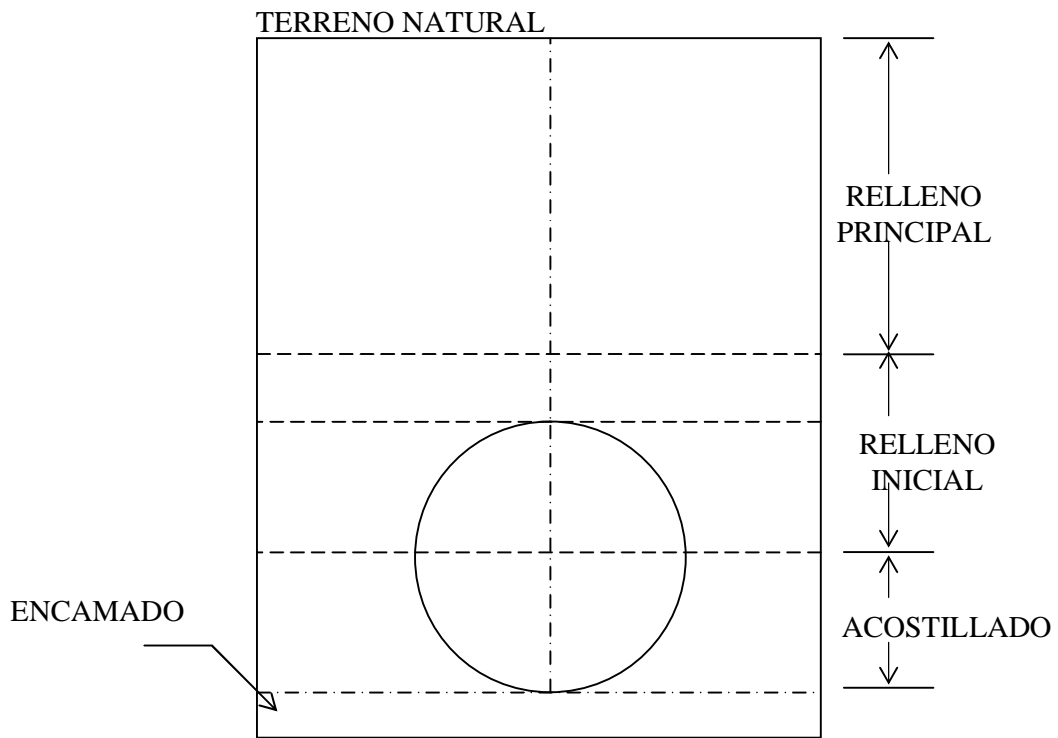


Figura 4. Condiciones de tendido.

CONCLUSIONES

Las tuberías enterradas son habitualmente calculadas considerando las cargas que deben soportar las mismas durante su vida útil tales como: presiones verticales y horizontales del terreno, peso propio, presión interna, cargas superficiales estáticas o dinámicas, y esfuerzos sísmicos. Debido a ello, los métodos de cálculos de tuberías difieren según el tipo de tuberías ya sean rígidas o flexibles.

Para el cálculo de las mismas se realizan verificaciones de deformaciones o deflexiones, tensiones, inestabilidad o pandeo, y rotura. En todos los casos, se verifica que el nivel de tensiones durante la vida útil sea inferior a las tensiones de rotura con un determinado nivel de seguridad, y que las deformaciones sean inferiores a las máximas admisibles. Sin embargo, la ecuación analítica no permite explicar las fallas y colapso observado en tuberías en servicio. Debido a que la ecuación considera que las presiones verticales actuantes en la tubería tienen una distribución uniforme (Mayol, 1981).

Por lo tanto, no permite explicar el mecanismo de concentración de tensiones que ocurre en la parte superior e inferior de las tuberías rígidas.

Por eso es recomendable la utilización de métodos computacionales (MEF) para el cálculo de “tuberías rígidas” enterradas. El MEF permite realizar análisis numéricos del comportamiento de las tuberías enterradas considerando la contribución y comportamiento del suelo y de la tubería. De manera que cuando el terreno natural se satura (se producen importantes incrementos en las deflexiones y esfuerzos en las tuberías) esta herramienta resulta ventajosa debido a la versatilidad que tienen los códigos actuales de elementos finitos para representar problemas de interacción suelo-tubería, teniendo en cuenta el comportamiento no lineal del suelo. Además, para bajos valores de rigidez relativa las tuberías se encuentran más afectadas por el humedecimiento del suelo.

Las deflexiones y esfuerzos en las tuberías dependen fundamentalmente de la rigidez relativa entre la tubería y el suelo. La utilización de mezclas de suelo-cemento es una alternativa de gran utilidad para incrementar la rigidez del relleno de las zanjas, y disminuir las deflexiones de las tuberías. Si no se tiene en cuenta el desplazamiento relativo entre el suelo y la estructura, se sobreestiman los esfuerzos y se subestiman las deflexiones en las tuberías.

Finalmente para el cálculo y verificación de cargas en tuberías es necesario considerar la contribución de pequeñas y grandes deformaciones. Cuando se produce el humedecimiento del terreno lateral, la contribución del suelo

compactado en la trinchera es más importante y al aumentar el ancho de zanja, se incrementa la disminución de las deflexiones.

BIBLIOGRAFIA

1. MAYOL J.M. (1981). Tuberías, Editores Técnicos Asociados S.A., Barcelona, España.
2. FERNANDO N. S. y CARTER J. P (1198). Ductile Iron Pipe., Pipe Desing Manual, Viena.
3. AMERICAN CAST IRON PIPE COMPANY (1995), ACIPCO International Web Page.
4. ASME B31-8 (1992 Edition). GAS TRASMISSION AND DISTRIBUTION PIPING SYSTEMS.
5. ASME B31-4 (1989 Edition). LIQUID TRANSPORTATION SYSTEMS FOR HIDROCARBONS, LIQUID PETROLEUM GAS, ANHYDROUS AMMONA AND ALCOHOLS.
6. Pipe Line Rules of Thumb Handbook. Third Edition. E. W. McAllister, Editor.
7. SPECIFICATION FOR LINE PIPE. API SPECIFICATION 5L. Forty-First Edition, April 1, 1995.
8. PIPING DESING AND ENGINEERING. Second Edition (1967). Grinnell Company, Inc.
9. Pipeline and Gas Technology Journal. June 2001.