

# **MANUAL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL PARA TUBERIAS FLEXIBLES**

## **CONTENIDOS**

Introducción .....	3
Materiales Termoplásticos .....	4
Tuberías Perfiladas de PVC.....	4
LAS CARGAS MUERTAS.....	5
Las Cargas Vivas .....	6
Límites de Comportamiento en Tuberías Flexibles.....	8
Límites de Comportamiento para Diseño.....	9
Anexo I.....	10

## Introducción

Es difícil hoy día encontrarnos en algún sitio donde no haya una tubería, quizás para suministro de agua potable, drenaje sanitario, agrícola, para cableado telefónico, para gas, oleoductos, túneles subterráneos, líneas de calefacción, etc.

En el sentido más amplio, una tubería es un conducto, por lo general de sección circular, que sirve para transportar una cantidad de masa: agua, gas, electrones, fotones, trenes, autos, etc.

Con las ciencias de la ingeniería actuales; es posible diseñar conducciones en tuberías casi con el mismo grado de precisión con que se diseñan otras estructuras tales como puentes o edificios. El grado de predicción acerca del comportamiento hidráulico o mecánico de una tubería, es hoy día muy alto gracias a los métodos de diseño disponibles y a la experiencia acumulada por profesionales que han dedicado mucho esfuerzo a esta materia. El trabajo de laboratorio ha sido y es continuo.

A inicios de este siglo, el profesor Anson Marston [1,2] desarrolló un método útil y práctico para calcular la magnitud de las cargas de tierra que inciden sobre una tubería instalada y en servicio. Su teoría es útil para predecir la resistencia que debe tener un conducto cuando se instala en condiciones particulares de servicio.

Más tarde, un discípulo suyo, M.G. Spangler, conjuntamente con su maestro desarrolló una teoría para el diseño de Tuberías Flexibles. Gracias a ellos y a un sinnúmero de colaboradores a lo largo de nuestro siglo, las tuberías flexibles ocupan hoy día una posición de privilegio en la conducción de masas de variada naturaleza. En esta obra se tratará el caso de las Tuberías Perfiladas de PVC, de perfil abierto, para el transporte de aguas, sean pluviales, efluentes o combinadas.

El transporte de agua mediante tuberías se puede dividir en:

- a- Transporte de aguas a presión y
- b- Transporte de aguas de drenaje (usualmente a la presión atmosférica, también conocidas como conducciones a cielo abierto). Estas últimas se analizan a continuación.

Esta publicación puede ser utilizada por ingenieros consultores, constructores, ingenieros de instituciones públicas, estudiantes o cualquier persona que necesite diseñar sistemas de drenaje pluvial o sanitario en relación al comportamiento de las tuberías flexibles ante las cargas. El programa de cálculo que se incluye en el Anexo I es aplicable a las tuberías flexibles perfiladas.

## **Materiales Termoplásticos**

Existen 4 tipos de tuberías termoplásticas que son utilizadas con mayor frecuencia en ingeniería:

1. Cloruro de Polivinilo (PVC)
2. Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)
3. Polietileno (PE)
4. Polibutileno (PB)

Además, se encuentran otros materiales como los SRP (plásticos de hule estireno) y el CAB (Butirato-acetato de celulosa), pero se fabrican en pequeña escala o son para aplicaciones muy específicas.

Aquí se tratará con las de PVC (cloruro de polivinilo) que en su aplicación para drenaje pueden ser de pared sólida o de pared perfilada. De estas dos, se verán las de pared perfilada.

## **Tuberías Perfiladas de PVC**

Actualmente en el mercado mundial existen diversos tipos de tuberías perfiladas hechas de cloruro de polivinilo. Todas ellas tienen una cualidad común: el diseño de la pared es estructural, es decir, tiene la facultad de aumentar la rigidez anular sin gran aumento en el peso por unidad de longitud. Esta condición hace que las tuberías perfiladas sean más livianas que las de pared sólida.

El principio de funcionamiento se basa en diseñar una pared que posea un valor elevado en el momento de inercia de sus elementos, tal y como se hace al diseñar una viga, para ganar resistencia con poco aumento del peso.

La Fig. 1 muestra un elemento típico de tubería perfilada. Con este tipo de pared el cálculo del momento de inercia es más laborioso que si fuera una pared sólida.



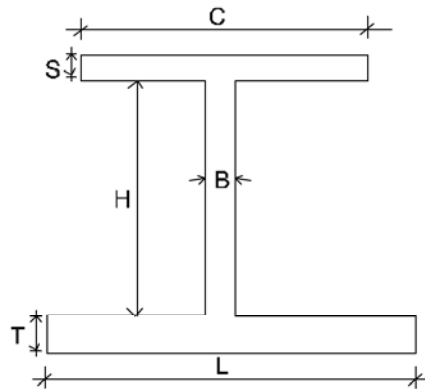


Figura 1. Elemento Estructural del Perfil

## LAS CARGAS MUERTAS

Las propiedades del suelo que interactúa con las tuberías flexibles influyen en su comportamiento. De igual manera, la forma de la cama (apoyo inferior de la tubería) puede reducir las concentraciones de presión de los suelos sobre una tubería rígida. El empleo de materiales adecuados y una buena densidad de éstos alrededor de tubos flexibles, pueden limitar las deflexiones a valores permisibles.

Por lo tanto, el suelo, su colocado y tratamiento, así como las propiedades de los ductos, sean rígidos o flexibles, son importantes en el diseño de cualquier sistema de tuberías enterradas.

Las tuberías rígidas y flexibles difieren en su comportamiento ante las cargas provenientes de los rellenos. Una tubería rígida (concreto, barro vitrificado o hierro colado) no se puede deformar materialmente sin sufrir agrietamientos. Por otra parte, una tubería perfilada de PVC puede deformarse considerablemente sin sufrir daños estructurales. El factor de seguridad que se emplea en deflexiones máximas es igual a 4.

En un sistema con tubería rígida la totalidad de la carga proveniente del relleno es resistida por la fortaleza misma de la tubería, puesto que el suelo a los lados del tubo tiende a consolidarse y por lo tanto a deformarse como producto de la carga.

Una tubería flexible al ser sometida a cargas, sufre una deformación que provoca el desarrollo de presiones laterales que contribuyen a soportar esas cargas (Ver Fig.4)

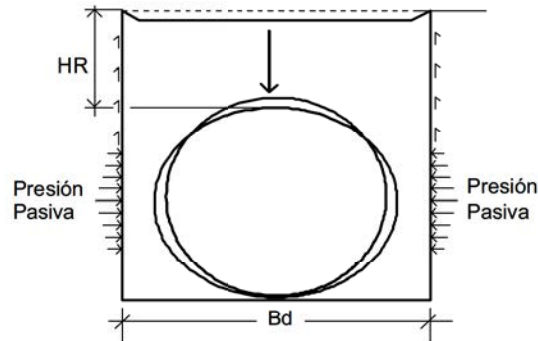


Figura 4. Tubería Flexible enterrada en una zanja

La deformación del relleno aumenta los esfuerzos cortantes entre éste y el muro de excavación, reduciendo así en cierta medida la carga total sobre el tubo. Como resultado, la carga transmitida a una tubería flexible es menor que en un conducto rígido a igualdad de altura de relleno HR.

Sin embargo, para efectos de diseño es conveniente considerar la llamada carga de prisma (Ec. 4, Fig. 5) cuando se trabaja con tuberías flexibles.

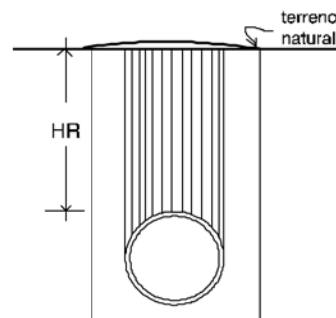


Figura 5. Carga de Prisma sobre la tubería

$$P = \gamma HR$$

Donde,

P: presión debida al peso del suelo a la profundidad HR

$\gamma$  : peso volumétrico total del suelo

HR: profundidad del relleno sobre la corona del tubo

#### EJEMPLO 1.

Una tubería perfilada de 522 mm diámetro externo se instalará en una zanja de 0.90

m de ancho. La altura de relleno será de 3 m de un suelo con  $g=1926 \text{ kg/m}^3$ . ¿Cuál será la carga sobre el tubo ?

Utilizando la Ec. 4 se tiene:

$$P= 1926 \text{ kg/m}^3 \times 3\text{m} = 5778 \text{ kg/m}^2.$$

Para obtener la carga muerta total por metro lineal de tubo, se debe multiplicar este valor por el diámetro externo del tubo,

$$\text{Carga muerta (Wm)} = 5778 \text{ kg/m}^2 \times .522 \text{ m} = 3016 \text{ kg/m lineal de tubo.}$$

HR:profundidad del relleno sobre la corona del tubo

Una ventaja de utilizar la carga de prisma es que no se toma en cuenta el ancho de la zanja.

La teoría de carga de Marston [1,2], (Ec. 5) para una tubería flexible, se basa en el caso especial de que el tubo y el relleno alrededor del mismo tienen una misma rigidez, por lo que la proporción de carga muerta sobre el tubo se puede asignar virtualmente en base al ancho de la excavación (Fig. 6)

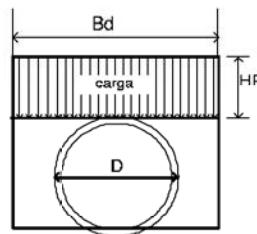


Figura 6. Proporcionalidad de la carga de acuerdo a la teoría de Marston

## Las Cargas Vivas

Las cargas sobre las superficies de las estructuras destinadas al transporte terrestre que pueden ser estáticas (las llamamos superpuestas) o bien dinámicas provenientes del tráfico de vehículos, se denominan cargas vivas.

Según la Oficina de Pesos y Dimensiones (OPD) del MOPT, las cargas máximas por eje permitidas en Centro América (según acuerdo regional) son como indica la Tabla 2.



Tabla 2. Cargas máximas por eje (kg) según la OPD del MOPT

VEHICULO	EJE 1	EJE2	EJE 3	EJE 4	EJE 5
C-2	4000	8000	-	-	-
C-3	5500	7250	7250	-	-
T3-S2	3500	7250	7250	7250	7250

Estos valores pueden incrementarse hasta en un 15% para efectos de diseño. El Eje Simple presenta un apoyo en cada uno de sus extremos y el Eje Doble ó Tandem presenta dos, separados por una distancia de 1.20 m en sentido longitudinal (de avance) del vehículo.

La superficie de apoyo de cada extremo del eje viene determinada por un rectángulo de dimensiones BxL (en sentido transversal y longitudinal del vehículo, respectivamente).

## Limites de Comportamiento en Tuberías Flexibles

Como se anotó anteriormente, una tubería perfilada de PVC deriva su resistencia a las cargas, de su naturaleza a permitir deformaciones. Al deflectarse ante la carga, ésto permite que se desarrollen empujes pasivos de suelo en ambos lados del tubo hacia la línea de centro horizontal (Fig.4). Al mismo tiempo, la deformación del tubo lo libera de soportar la mayor porción de la carga vertical, la cual es soportada por el suelo de los lados, a través del llamado efecto de arco. La resistencia efectiva del sistema tubo flexible-suelo, es notablemente alta. En pruebas experimentales hechas en la Utah State University [1], se ha demostrado que un tubo rígido con resistencia de 49.2 kg/cm (3300 lb/pie) en la "prueba de los tres apoyos", colocado en una cama clase C, llega a fallar por fractura de la pared con una carga de suelo de 74.5 kg/cm (5000 lb/pie); es decir, el factor de seguridad es de aproximadamente 1.5. Sin embargo, bajo condiciones idénticas de suelo y carga, una tubería flexible de PVC deflecta solo el 5% de su diámetro interno. Este valor está muy por debajo del valor de deflexión que podría causar la falla en la pared del tubo, algo así como un factor de seguridad de 6 [1].

Por supuesto, en una prueba de los tres apoyos o de apoyo plano, la tubería rígida soporta mucho más carga que la flexible antes de la falla. La experiencia indica que esta anomalía tiende a confundir a ciertos ingenieros, porque ellos relacionan capacidad de carga entre placas planas con la resistencia del sistema suelo-tubo flexible. Esto solo se puede relacionar para tubos rígidos, pero no para tubos flexibles. A los tubos flexibles se les somete a la llamada "Prueba de Rigidez Anular". La rigidez del tubo flexible es tan sólo una pequeña contribución a la rigidez del "Sistema Suelo-Tubo", algo así como desde 150:1 hasta 800:1, y en rellenos



altamente compactados con materiales granulares podría llegar a ser aún mayor esta relación entre la rigidez del relleno a la rigidez del tubo. El comportamiento de tuberías perfiladas está ya muy documentado en la práctica. Uno de los ejemplos con mayor carácter científico fue desarrollado en las instalaciones de la World Expo 88 que se llevó a cabo en la ciudad de Brisbane, Australia, de abril a octubre de 1988. Allí, toda la infraestructura de los drenajes de tormenta se construyó con tuberías perfiladas. El trabajo de consultoría estuvo a cargo de la firma australiana Gutteridge Haskins and Davey y la construcción a cargo de la empresa Thiess Watkins (Constructions) Ltd.

La experiencia fue recogida con detalles en la publicación "Buried Plastic Pipe Technology" STP 1093, de la ASTM [5].

En el ejemplo 5 se pueden comparar dos tipos de tubería que, aunque diferentes, estructural y materialmente hablando, pueden cumplir con el objetivo solicitado por el diseño. No se analizan aspectos de costos en este ejemplo.

## **Limites de Comportamiento para Diseño**

Al igual que con cualquier obra constructiva, el diseño de tuberías flexibles enterradas tiene que valerse de ciertos límites de comportamiento, tanto de los productos como de la instalación en general. Una instalación de calidad es aquella que se diseñó e instaló siguiendo criterios técnicos adecuados, su vida de servicio resultó económica y prestó la seguridad esperada.

### ***Primer Limite: La Deflexión***

Existen tres factores que son esenciales en el análisis de cualquier instalación con tuberías flexibles:

1. Cargas sobre la tubería (debidas al relleno y cargas superpuestas)
2. Rigidez del suelo alrededor del tubo
3. Rigidez de la tubería

### ***La carga debida al relleno***

Se obtiene fácilmente con la Ecuación 4 (ver Ejemplo 1). El tiempo máximo durante el cual una tubería flexible alcanza su máxima carga es limitado. Esto depende de la densidad del material de suelo alrededor del tubo; a mayor densidad del suelo en los lados del tubo, menor será el tiempo durante el cual la tubería seguirá deformándose

y la deflexión total como respuesta de la carga máxima será menor. Adversamente, si el suelo posee una baja densidad, el tiempo durante el cual la tubería seguirá teniendo deformaciones será mayor y mayor será también la deformación final.

ANEXO I



Clasificación de suelos y valores del E2  
(Módulo de reacción del suelo Kg/cm<sup>2</sup>)

Clase de Suelo	Suelo según ASTM D2487	Suelto	Grado de compactación Próctor		
			Compactación ligera < 85%	Compactación moderada 85-95%	Muy compacto >95%
VI	Suelos orgánicos del tipo OL,OH, y suelos que contienen desechos y otros materiales extraños		No se acepta en ningún caso este material como material de encamado o relleno		
V	Suelos finos LL>50 suelos con media a alta plasticidad CH MH,CH-MH		No existe información, consulte con un mecánico de suelos o utilice E2=0		
Va	Suelos finos, LL<50 plasticidad media a sin plasticidad, CL,ML,ML-CL con menos de 25% de partículas gruesas	3.5	14	28	70
Vb	Idem anterior pero con más de 25% de partículas gruesas	7	28	70	140
III	Suelos gruesos con más de 12% de finos GM, GC, SM,SC	7	28	70	140
II	Suelos gruesos con menos de 12% de finos GW, GP, SW, SP	14	70	140	210
I	Piedra quebrada	70	210	210	210

Descripción de los tipos de suelos

TIPO DE SUELO	DESCRIPCION
-	Piedra quebrada, angular de 6 a 40 mm de tamaño tipo gravilla.
GW	Gravas limpias bien graduadas con poco o sin material fino. 50% ó más retenido en malla N°4. Más del 95% retenido en malla N° 200 limpios.
GP	Gravas limpias mal graduadas con poco o sin material fino. 50% ó más retenido en malla N°4. Más del 95% retenido en malla N° 200.
SW	Arenas limpias bien graduadas con poco o sin material fino (malla N° 200).
SP	Arenas limpias mal graduadas con poco o sin material fino (malla N°200).
GM	Gravas limosas. 50% ó más retenido en malla N° 4. Más del 50% retenido en malla N° 200.
GC	Gravas arcillosas. 50% ó más retenido en malla N° 4. Más del 50% retenido en malla N°200.
SM	Arenas limosas, mezcla 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.
ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas. Límite líquido 50% ó menos. 50% ó más pasa malla N° 200.
CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas ripiosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras. Límite líquido 50% ó menos. 50% ó más pasa la malla N° 200.
MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o diatomáceo, limos elásticos. Límite líquido > 50%. 50% pasa malla N° 200 ó más.
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad. Límite líquido > 50%. 50% ó más pasa malla N° 200.
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad. Límite líquido 50% ó menos. 50% ó más pasa malla N° 200.
OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta. Límite líquido > 50%. 50% ó más pasa malla N° 200.
PT	Turba y otros suelos altamente orgánicos

Los suelos están definidos de acuerdo a la norma ASTM D 2487 a excepción del material clase I, definido en Norma ASTM D 2321