Flotación de Tuberías

Introducción

El poco peso que presenta una tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) hace que sea muy atractivo trabajar con ellas debido a la facilidad de manejo e instalación, pero este beneficio produce que las tuberías termoplásticas sean propensas a la flotación. Todas las tuberías, incluyendo las de hormigón y acero corrugado, son propensas a la flotación bajo ciertas condiciones. Cuando la fuerza de empuje producida por un material fluido sobre la tubería es mayor que su propio peso más la sobrecarga, ésta flotará. Cuando hay posibilidades de flotación es vital realizar una instalación adecuada y/o un anclaje correcto de la tubería. En este documento se provee un análisis sobre las alturas de recubrimiento mínimo para prevenir la flotación de las tuberías corrugadas de polietileno de alta densidad entre 100 y 1500 mm de diámetro (4'' a 60''). Las fuerzas de empuje ejercidas por rellenos fluidos como Material de Baja Resistencia Controlada (CLSM: Controlled low strength material, en inglés) también será discutido.

Fuerza de empuje hidrostática debido a una Alta Napa Freática

La flotación se convierte en un problema cuando las aguas subterráneas invaden la zona de la tubería. Para proyectos donde se prevé la presencia de napa freática o agua alrededor de la tubería, se deben tomar precauciones para prevenir su flotación. Proporcionar una cantidad mínima de recubrimiento contribuirá a evitar la flotación de la tubería.

La fuerza hidrostática de empuje vertical, U, producto de la napa freática, puede ser fácilmente calculada con la Ecuación (1):

$$U = \frac{\pi}{4} D^2 \delta_w \qquad (1)$$

Donde U = kgf/m de largo de tubo

D = diámetro externo del tubo, en metros (m)

δ_w = peso específico del agua = 1.000 kgf/m^3

La fuerza de empuje debe ser balanceada con la carga del relleno y el peso de la tubería para asegurar que ésta no flote. Las cargas de relleno experimentadas por la tubería a distintas alturas de napa freática (W_{suelo}) pueden ser calculadas mediante la Ecuación (2). La Figura 1 ilustra cada uno de los tres casos posibles de observar en terreno en instalaciones donde la flotabilidad se convierte en un asunto a considerar, y aclara también todos los parámetros de la Ecuación (2).

¡Mejoramos la calidad de **vida**, desarrollando soluciones que cuidan el **agua** y el **medio ambiente**!

$$W_{suelo} = \delta_s H_s D + (\delta_{sat} - \delta_w)(H_{sum} + 0{,}1073D)D \qquad (2)$$

Donde W_{suelo} = peso de sobrecarga del suelo, kgf/m lineal de tubo

δ_s = peso unitario seco del suelo, kgf/m^3

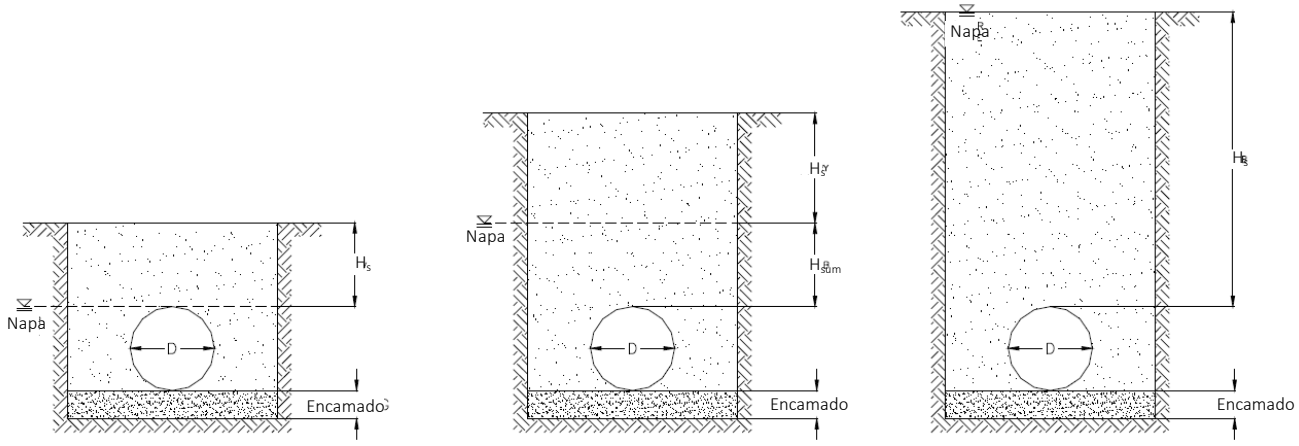
H_s = profundidad del suelo seco, m.

H_{sum} = profundidad del suelo sumergido sobre la clave de la tubería, m.

δ_{sat} = peso unitario del suelo saturado, kgf/m^3

$\delta_{sat} - \delta_w$ = peso unitario del suelo sumergido, kgf/m^3

Figura 1. Condiciones de instalación con posibilidad de flotación de tuberías ADS-Tigre



(a) NAPA FREATICA HASTA LA CLAVE DEL TUBO

(b) NAPA FREATICA SOBREPASA LA CLAVE DEL TUBO

(c) NAPA FREATICA LLEGA HASTA CLAVE DEL TUBO

Los pesos típicos (W_{tubo}) de tuberías Dren Pro-Infra y Dren Pro-HD de ADS-Tigre, ambos doble pared, y valores promedio de su diámetro externo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Peso Aproximado y Diámetro Externo Promedio de Tuberías ADS-Tigre

Diámetro Nominal mm **(in)**	Diámetro Externo mm **(in)**	Peso lineal del tubo doble pared kgf/m **(lbf/ft)**
75 **(3)**	93 (3,6)	0,46 (0,31)
100 (4)	122 (4,8)	0,67 (0,40)
150 (6)	177 (7,0)	1,32 (0,89)
200 (8)	232 (9,2)	2,30 (1,55)
250 (10)	289 (11,4)	3,45 (2,31)
300 (12)	367 (14,5)	5,10 (3,43)
375 (15)	446 (17,6)	7,38 (4,96)
450 (18)	545 (21,5)	10,50 (7.06)
600 (24)	718 (28,3)	15,92 (10.70)
750 (30)	900 (35,5)	24,02 (16,14)
900 (46)	1.054 (41,5)	27,53 (18,50)
1.000 (40)	1.148 (45,2)	33,14 (22,27)
1.200 (48)	1.369 (53,9)	45,61 (30,65)
1.500 (60)	1.713 (67,5)	62,51 (42,00)

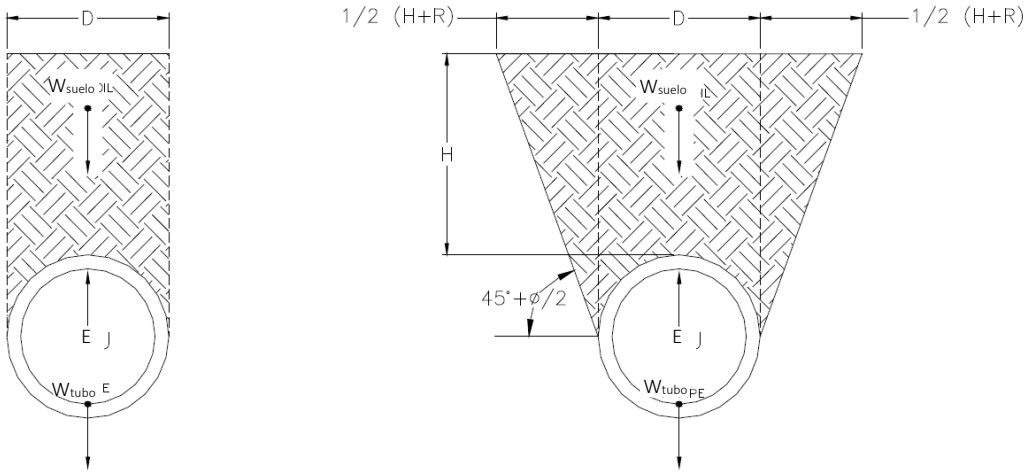
La altura mínima de recubrimiento (H) requerida para resistir la flotación puede ser calculada igualando la suma de las fuerzas verticales descendentes con la suma de las fuerzas verticales ascendentes o flotantes. Si bien existen diferentes métodos para considerar la distribución de la carga de suelo sobre la tubería, para un recubrimiento mínimo conservador, la carga del suelo se supone como la columna de suelo directamente sobre el diámetro exterior del tubo, según se ilustra en la Figura 2(a). Así, el recubrimiento mínimo se calcula utilizando las Ecuaciones (3) y (4):

$$U \leq W_{suelo} + W_{tubo} \qquad (3)$$

$$H \leq H_s + H_{sum} \qquad (4)$$

Donde W_{tubo} = peso lineal de la tubería, en kgf/m, (ver tabla 1)

Figura 2. Fuerzas que Afectan la Flotación



(a) Condición de Columna de Carga del Suelo

(b) Condición de Carga PrismáticaO

La Tabla 2 a continuación provee información sobre los recubrimientos mínimos requeridos para prevenir la flotación de las tuberías corrugadas ADS-Tigre, N-12 estándar.

Tabla 2. Recubrimiento Mínimo Recomendado para Prevenir la Flotación de Tubos ADS-Tigre

Diámetro Nominal mm (in)	**Recubrimiento Mínimo** mm (in)
75 (3)	80 (3,1)
100 (4)	106 (4,2)
150 (6)	154 (6,1)
200 (8)	202 (8,0)
250 (10)	252 (9,9)
300 (12)	322 (12,7)
375 (15)	392 (15,4)
450 (18)	480 (18,9)
600 (24)	637 (25,1)
750 (30)	800 (31,5)
900 (36)	944 (37,1)
1.000 (40)	1.027 (40,4)
1.200 (48)	1.227 (48,3)
1.500 (60)	1.542 (60,7)

Bases de cálculo:

1. Se asume que la tubería está vacía. Esto permite simplificar los cálculos y es una condición conservadora que fomenta la flotación. A menos que el sistema sea completamente hermético, es probable que esta condición no se factible de encontrar en una instalación real.
2. El diámetro exterior de la tubería corrugada se usó para determinar el suelo y el agua que es desplazada.
3. El peso específico del suelo saturado utilizada fue de 2,08 tonf/m^3 (~130 pcf), lo cual es típico para muchas mezclas de suelo saturado. Suelos con mayor peso específico reducirán la posibilidad de flotación.
4. Se asume que el nivel freático estará en la rasante del terreno, como se ilustra en la Figura 1 (c), simulando un suelo completamente saturado. Esta suposición crea una condición de «más desfavorable» para producir resultados más conservadores.
5. El prisma para determinar la carga del suelo que se opone a la flotación se muestra en la Figura 2 (a).
6. Para fines estructurales, se aplicará una cubierta mínima de 12 "(0.3 m) para tuberías de 4" -48 "(100-1200 mm) y 24" (0.6 m) para tuberías de 60 "(1500 mm).
7. Los recubrimientos mínimos fueron calculados utilizando un factor de seguridad 1,5.
8. El responsable del proyecto o el ingeniero que suscribe el diseño puede utilizar, bajo su responsabilidad, otros criterios diferentes a los indicados entre los puntos 1 y 7.
9. Para aplicaciones donde las condiciones de instalación son diferentes a las expuestas, la posibilidad de flotación debe ser revisada en base a las condiciones específicas de cada proyecto.

Ejemplo 1: Calcular el recubrimiento mínimo requerido para prevenir la flotación de una tubería TIGRE-ADS DrenPro Infra o HD de 1.200 mm (48'') de diámetro, cuando la napa freática llega hasta la superficie. El peso unitario del suelo seco y saturado son 1.760 kgf/m^3 (110 lb/ft^3) y 2.080 kgf/m^3 (130 lb/ft^3), respectivamente.

Solución: $U \leq W_{suelo} + W_{tubo}$

W_{tubo} = 45,61 kgf/m (ver Tabla 1)

$$U = \frac{\pi}{4}(1{,}369\text{m})^2 \left(1.000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}\right) = 1.472 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

Considerando que la napa freática llega hasta la superficie, por lo tanto, aplica la Figura 1(c). Tenemos que Hs = 0, por lo tanto, el primer término de la Ecuación (2) es cero:

Entonces, $W_{suelo} + W_{tubo} = (2.080\text{-}1.000)\,[H_{sum}+(0{,}1073)(1{,}369)](1{,}369) + 45{,}61$

La Ecuación 3 queda, $1.472 = 1.478{,}5H_{sum} + 262{,}8$

Por lo tanto, H_{sum} = 818 mm

¡Mejoramos la calidad de **vida**, desarrollando soluciones que cuidan el **agua** y el **medio ambiente**!

Finalmente, calculando el recubrimiento mínimo de la Ecuación (4) y aplicando un factor de seguridad igual 1,5 (ver Bases de Cálculo de la Tabla 2):

$$H_{sum} = 1.227 \text{ mm}$$

El cálculo anterior es conservador dado que el ángulo de fricción interna del suelo, φ, y el coeficiente de esfuerzo lateral del suelo, K_o, no están siendo considerados. La definición de estos parámetros se debe dejar en manos del ingeniero geotécnico. Si estos parámetros fuesen incluidos en los cálculos anteriores, la altura de recubrimiento requerida se reduciría. Además, el responsable del proyecto o el ingeniero que suscribe el diseño puede utilizar, bajo su responsabilidad, otros criterios diferentes a los indicados entre los puntos 1 y 9 de la Tabla 2.

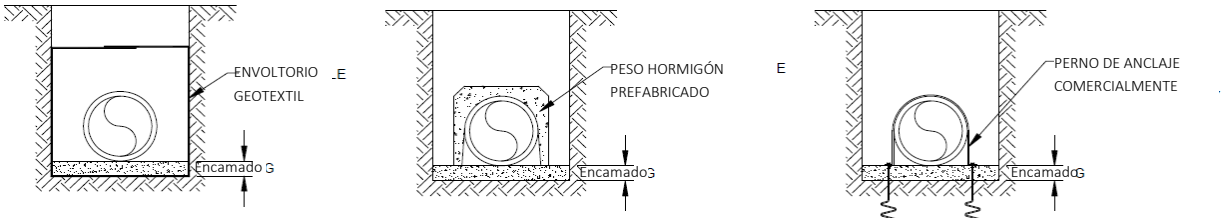
Sistema de anclaje

En muchos casos, la flotación de tuberías simplemente se puede abordar con una cobertura adecuada. En aquellas situaciones en las que no se puede lograr una cobertura adecuada, existen varios métodos alternativos aceptables para restringir la flotación de la tubería. Varios ejemplos se muestran en la Figura 3.

Debido a las variaciones en las densidades del suelo in situ, las alturas de la capa freática y la fuerza de restricción de los anclajes, el ingeniero debe evaluar las condiciones específicas del proyecto para evitar la flotación y determinar el tipo de anclaje requerido y la separación para evitar la flotación.

El espacio máximo entre los soportes de anclaje no debe exceder los 3 m aproximadamente. De esta manera, la tubería se apoya en cada junta y en el punto medio de cada longitud de tubería para garantizar una estabilización adecuada.

Figura 3. Alternativas de Estabilización de Tuberías



(a) ENVOLTORIO GEOTEXTIL (b) PESO HORMIGÓN (c) PERNO DE ANCLAJES

Flotación debido a Rellenos Fluidos

Los materiales de Resistencia Baja Controlada (CLSM, Controlled Low Strength Material, en inglés) son un tipo de relleno fluido que consiste principalmente en suelo cemento, arena, agua y cenizas volantes. El empuje vertical puede ser calculado mediante la Ecuación (5):

$$U = A_{desp}\delta_{CLSM} \qquad (5)$$

Donde A_{desp} = Área del tubo desplazada por el CLSM, m^2

δ_{CLSM} = Peso específico del CLSM, kgf/m^3

U = Empuje vertical debido al relleno CLSM, kgf/m

Dada la gran diferencia en los pesos específicos del agua y el CLSM, la fuerza de flotación ejercida por el CLSM puede ser hasta dos veces mayor que la fuerza de flotación hidrostática. Cuando se utiliza CLSM, la ausencia de carga de suelo de recubrimiento produce que la tubería flote, por lo tanto, ésta debe ser anclada para mantenerla con su alineamiento y pendiente adecuados. Comúnmente, esto se realiza mediante el anclaje de barras de refuerzo en forma de X sobre la parte superior de la tubería y en las paredes laterales de la zanja, utilizar CLSM seco como anclaje, u otro sistema de anclaje disponible en el mercado.

Debido a las grandes diferencias en los pesos unitarios entre el agua y el llenado fluido, la elevación causada por el llenado fluido puede ser más de dos veces mayor que la elevación hidrostática. Al rellenar con relleno fluido, la tubería flotará en ausencia de sobrecarga del suelo, ya que el peso de la tubería no compensará la flotación. Se deben tomar precauciones para garantizar que la tubería permanezca en su alineación y pendiente adecuada. Esto se hace comúnmente anclando la tubería o colocando el relleno fluido en elevaciones incrementales. Consulte la Nota técnica 5.02 para conocer los métodos de anclaje comunes e información técnica adicional relacionada con la colocación de relleno fluido.

El espaciamiento de los anclajes puede variar según el diámetro de la tubería, la altura de las capas de colocación del CLSM y el tipo de anclaje. El proyectista debe considerar estos factores para asegurar la posición correcta de la tubería en la zanja durante la colocación del relleno fluido. El espacio máximo entre anclajes no debiese superar los 3 metros, de modo de que la tubería al menos quede anclada en cada junta y en el punto medio de cada una de las tiras (de largo estándar 6 m), para asegurar una adecuada estabilización.

Después de determinar el espaciamiento entre anclajes, se debe escoger el tipo de anclaje basado en los esfuerzos que deben soportarse para prevenir la flotación. Dada la variación de mezclas de CLSM, de los pesos específicos del terreno y de las fuerzas de anclaje utilizadas, es el ingeniero geotécnico quien debe evaluar las condiciones particulares del proyecto para determinar tipo y espaciamiento de los anclajes para evitar la flotación.