



Pipelife Norge AS



Manual Técnico para instalaciones submarinas de tuberías de Polietileno



INDICE DE MATERIAS

0.0	INTRODUCCION	4
0.1	DIFERENTES TIPOS DE TUBERIAS SUBMARINAS.....	4
0.1.1	Tubería de admisión.....	4
0.1.2	Tubería de transporte.....	5
0.1.3	Tubería de emisario.....	6
0.2	HUNDIMIENTO DE UNA TUBERIA SUBMARINA de PE, EJEMPLO DE UN PROYECTO REAL. (ver Apartado 1.5).....	8
0.2.1	Introducción.....	8
0.2.2	Hundimiento de la tubería.....	8
0.2.3	Instalación del difusor.....	12
0.2.4	Condiciones climatológicas.....	13
0.2.5	Resumen.....	13
A.	DISEÑO HIDRAULICO Y TECNICO.....	15
A.1	CARACTERISTICAS TECNICAS PARA EL DISEÑO DE TUBERIAS DE POLIETILENO.....	15
A.2	DISEÑO HIDRAULICO.....	18
A.2.1	Coeficiente de fricción.....	18
A.2.2	Coeficiente de pérdidas de carga singulares.....	20
A.2.3	Pérdida de carga por densidad.....	22
A.2.4	Capacidad hidráulica.....	22
A.2.5	Velocidad de autolimpieza.....	25
A.2.6	Transporte de aire.....	25
A.3	DISEÑO ESTATICO.....	28
A.3.1	Presión interna.....	28
A.3.1.1	Dirección circunferencial.....	28
A.3.1.2	Dirección longitudinal.....	29
A.3.2	Cargas externas/pandeo.....	31
A.3.2.1	Pandeo en una tubería sin apoyo.....	32
A.3.2.2	Pandeo de una tubería bajo la presión de una zanja o del suelo.....	35
A.3.3	Golpe de ariete.....	36
A.3.4	Tensiones térmicas.....	38
A.3.5	Tensiones de flexión.....	40
A.3.5.1	Pandeo de las tuberías de PE durante la flexión.....	41
A.3.6	Otras tensiones.....	43
A.3.6.1	Fuerzas debidas a las corrientes y al oleaje.....	44
A.3.6.2	Tuberías suspendidas.....	45
A.3.6.3	Cargas concentradas.....	45
A.3.7	Cargas combinadas.....	46

A.4	DISEÑO DE CARGA MEDIANTE LASTRES DE HORMIGON.....	48
A.4.1	Grado de carga.....	48
A.4.2	Tipos de lastres de hormigón.....	50
A.4.3	Estabilidad de las tuberías de PE en el fondo marino.....	51
A.4.4	“Tasa de llenado de aire” recomendada en tuberías submarinas.....	54
A.4.5	Fuerzas debidas a corrientes.....	55
A.4.6	Fuerzas debidas al oleaje.....	58
A.5	DISEÑO DE LOS PARAMETROS PARA EL HUNDIMIENTO.....	66
A.5.1	Presión interna del aire.....	67
A.5.2	Fuerza de tracción.....	67
A.5.3	Velocidad de hundimiento.....	71
B.	INSTALACION.....	76
B.1	UNION DE TUBERIAS DE POLIETILENO.....	76
B.2	SOLDADURA A TOPE DE LAS TUBERIA DE PE.....	77
B.2.1	Parámetros de soldadura.....	77
B.2.2	Capacidad de soldadura.....	78
B.3	INSTALACION.....	79
B.3.1	Tuberías de PE enterradas.....	79
B.3.2	Tendido de tuberías en el lecho marino.....	81
AUTOR : TOM A. KARLSEN, INTERCONSULT ASA.....		84
LISTA DE REFERENCIAS :		84

0.0 Introducción

Descripción de diferentes tipos de aplicaciones submarinas para tuberías de polietileno.

Las tuberías de polietileno submarinas se utilizan para transporte de agua potable y aguas residuales desde 1960.

Por aquel entonces, los tubos se fabricaban con una longitud de 12 m, se soldaban mediante fusión a tope, se lastraban con lastres de hormigón y se sumergían hasta el fondo del mar introduciendo agua por un extremo y liberando aire por el otro extremo.

El método es casi idéntico hoy en día. No obstante, se da más importancia al diseño y a los cálculos para garantizar una instalación segura y así evitar daños.

Otra innovación es el uso de tubos de gran longitud (hasta 500 m) con extrusión continua realizada en la fábrica, remolcados en barco hasta el emplazamiento y unidos mediante conexiones embridadas.

Esta solución se aplica con éxito ya en muy distintos países.

Desde 1960 también se han conseguido mejoras significativas en el desarrollo de materias primas y métodos de producción.

En consecuencia, las tuberías de polietileno son actualmente el material más comúnmente utilizado en instalaciones submarinas.

La combinación de flexibilidad y resistencia las hace superiores a otros materiales.

En Noruega, por ejemplo, más del 95% de las tuberías submarinas se hacen con tubos de polietileno. Los diámetros varían en un intervalo de Ø 50 mm - Ø 1600 mm, y la profundidad del agua puede alcanzar los 250m en casos especiales.

Muy rara vez se producen daños.

Esto se debe a:

- Materiales excelentes
- Diseño apropiado
- Contratistas con amplia experiencia
- Supervisores bien preparados

Este catálogo técnico aborda cuestiones relacionadas con el diseño.

Aquí encontrará teoría y fórmulas que le permitirán calcular y resolver los problemas más comunes que surgen en los proyectos de tuberías submarinas.

Con todo, a modo de introducción mencionaremos primero los diferentes tipos de instalaciones submarinas y describiremos brevemente un ejemplo de proyecto típico relativo al hundimiento de una tubería.

0.1 Diferentes tipos de tuberías submarinas

Siguiendo la dirección de transporte natural del agua para consumo, podemos dividir la instalación en 3 categorías :

- Tubería de admisión
- Tubería de transporte
- Tubería de salida o emisario

0.1.1 Tubería de admisión

Las tuberías de admisión se utilizan en aplicaciones tanto civiles como industriales.

Las fuentes pueden ser ríos, lagos y fiordos. Las profundidades de admisión oscilan entre 2 m y 250 m.

El agua se transporta normalmente en la tubería por gravedad hasta una cámara de toma.

En algunos casos, la tubería de admisión se conecta directamente a la bomba en una estación de bombeo.

Las tuberías de admisión están siempre expuestas a presión negativa.

Éstos son algunos problemas especiales que deben tenerse en cuenta:

- Presión insuficiente
- Incrustaciones
- Escapes de aire
- Corrientes
- Oleaje

En el extremo de admisión, la tubería incorpora habitualmente una pantalla.

La figura 0.1.1.1 muestra un ejemplo de tubería de admisión de agua de río. En la figura se aprecia una nueva toma de agua en el río Glomma. La tubería tiene un diámetro de 1200 mm y una longitud de 3 km. El material de fabricación de los tubos es polietileno PN80 SDR17. La capacidad hidráulica es 1,5 m³/seg. Toda la tubería está colocada en un foso de 2-3 m de profundidad como protección frente a las corrientes, la erosión, el hielo y los maderos flotantes. Se eligieron las tuberías de polietileno por su flexibilidad, su resistencia y su facilidad de instalación.

(Planta de tratamiento
Río Glomma

Tubería de admisión = Ø 1200 mm polietileno PNS)

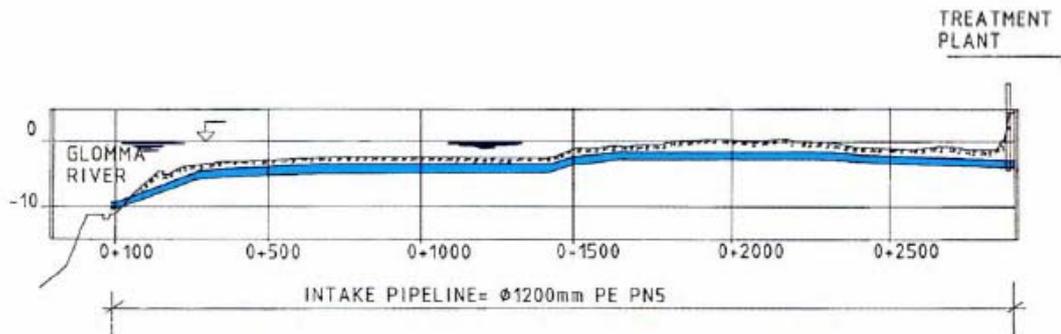


Fig. 0.1.1.1 River water intake

0.1.2 Tubería de transporte

En muchos casos puede resultar conveniente atravesar lagos y fiordos con tuberías submarinas en lugar de utilizar una ruta más larga junto a la orilla.

En otras situaciones, es necesario cruzar los ríos y los mares para aprovisionar ciudades e islas de agua, o para eliminar las aguas residuales.

El agua puede transportarse por gravedad o mediante bombeo. Durante esta operación hay siempre cierta sobrepresión en la tubería, excepto en caso de aumento brusco de la presión. Es normal instalar un registro/pozo en cada orilla para establecer una interconexión entre las tuberías submarinas. El equipo disponible en los pozos dependerá del nivel de servicio. Lo habitual es instalar válvulas de retención.

Éstos son algunos problemas especiales a tener en cuenta en las tuberías de transporte:

- Presión
- Transporte de aire
- Corrientes
- Oleaje
- Equipos de pesca
- Anclajes

La figura 0.1.2.1 ilustra el cruce de un río. En la figura aparece el perfil de una tubería de polietileno, un cruce del sistema de alcantarillado del Glomma, el río más largo de Noruega. El diámetro de la tubería es de 600 mm y el grosor de pared de 55 mm. (PN10). La longitud lineal

es 450 m. Se necesitó una zanja de cinco metros de profundidad en el fondo del río para evitar daños en la tubería causados por las anclas de las barcazas. Se eligieron tubos de polietileno por su flexibilidad, que posibilitó la fabricación de toda la longitud en una sola pieza en la fábrica; después la tubería se remolcó hasta el emplazamiento y finalmente se sumergió dentro de la zanja en el fondo del río.

Tras el hundimiento, la zanja se rellenó con grava.

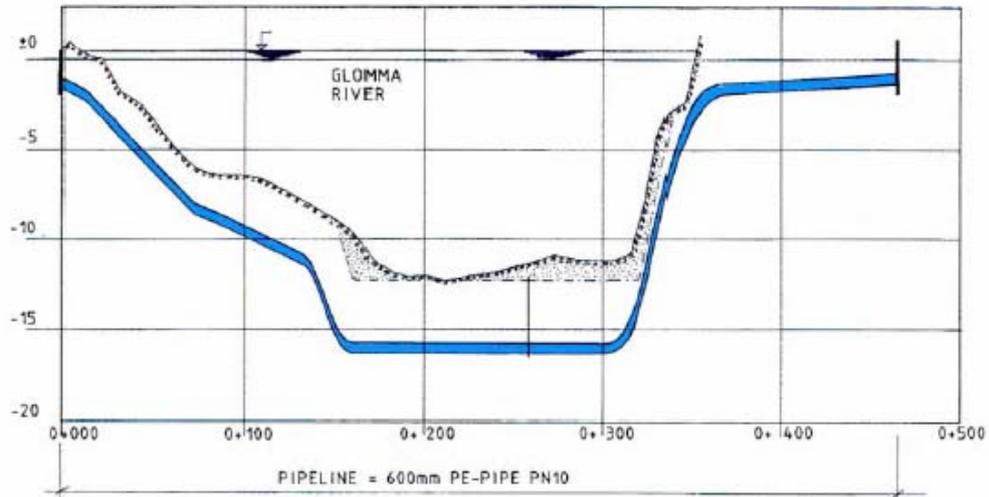


Figura 0.1.2.1 Cruce del sistema de alcantarillado en el río.

0.1.3 Tubería de salida - Emisario

Las aguas residuales tratadas se conducen normalmente hacia el área de descarga del medio receptor a una cierta profundidad y distancia de la costa. Una salida de agua profunda facilitará una dilución excelente de las aguas de desecho.

La profundidad de salida variará en un intervalo de 10-60 m, dependiendo de la capacidad de autopurificación del medio receptor.

El medio receptor puede ser un río, un lago, un fiordo o el mar.

El emisario empieza generalmente en la cámara de descarga de la zona costera, hacia donde se conducen las aguas residuales por gravedad o bombeo.

Es poco habitual recurrir al bombeo directamente en la tubería de salida y no es recomendable. Si resulta necesario bombear, la mejor solución será bombear las aguas residuales hasta la cámara de descarga y conducir las por gravedad hasta el medio receptor.

El cometido principal de la cámara de descarga es evitar que el aire entre en la tubería.

El aire puede provocar la flotación de la tubería debido a la fuerza de empuje.

También conviene tener en cuenta las variaciones de las mareas altas y bajas cuando se diseña la cámara de descarga.

He aquí algunos problemas especiales a considerar en relación con las tuberías de salida:

- Arrastre de aire hacia el caudal de la tubería
- Incrustaciones biológicas
- Fuerzas inducidas por las corrientes y el oleaje
- Transporte de sedimentos.

La figura 0.1.3.1 representa un emisario industrial. En la figura se aprecia el sistema de descarga al mar desde una planta de acero al norte de Noruega. Los principales componentes del sistema de descarga son:

- Tubos de hormigón pretensado de 430 m con diámetro de 1.800 mm enterrados en el lecho marino a una profundidad del agua de 4 m. El extremo marino de la tubería de hormigón está

conectado a un macizo de anclaje de hormigón. El extremo terrestre está conectado a una cámara de descarga.

- Tubos de polietileno de 90 m PN3.2 con diámetro de 1.600 mm en el lecho marino inclinado desde el macizo de anclaje hasta una profundidad de 30 m.

La tubería de polietileno fue fabricada, transportada 1.200 km por ferrocarril y sumergida en una pieza. Se seleccionó el polietileno frente a otros materiales para tuberías debido a su flexibilidad y porque precisaba muy poco trabajo de construcción debajo del agua.

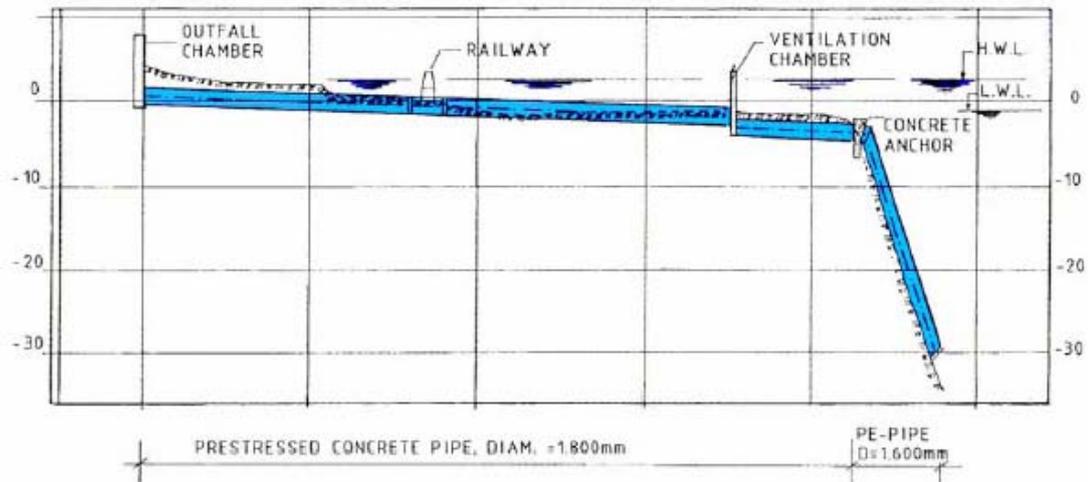


Figura 0.1.3.1 Sistema de descarga al mar desde una planta de hierro.

El ejemplo superior no es muy característico de un emisario. Normalmente, la tubería de polietileno comienza en la cámara de descarga.

0.2 Hundimiento de una tubería submarina de polietileno, ejemplo de un proyecto real (ver Apartado A.5).

En la siguiente secuencia incluimos un ejemplo típico de hundimiento de una tubería de polietileno de gran longitud. El ejemplo hace alusión a una tubería de salida.

0.2.1 Introducción

El proyecto tiene las siguientes características:

- Material de la tubería: polietileno 100 SDR26, Ø1200 mm
- Longitud de la tubería: 4600 m
- Longitud del difusor: 400 m
- Profundidad máxima: 61 m
- Porcentaje de carga: 20%

La presente descripción está relacionada con el proceso de hundimiento y las precauciones necesarias para garantizar una instalación segura en el fondo.

Se han utilizado dos métodos distintos; uno para la propia tubería y otro para el difusor.

El hundimiento de la tubería se lleva a cabo básicamente con las propias fuerzas de la naturaleza, es decir, la gravedad, la flotabilidad y la presión del aire, mientras que el difusor se hunde con ayuda de las grúas.

Esta nota es solo una descripción sucinta de los principales elementos que participan en la fase de hundimiento. Antes de la instalación real debe estar preparado el procedimiento de inmersión detallado.

0.2.2 Hundimiento de la tubería

Los tubos se llevan en remolcadores desde la planta de fabricación en Noruega hasta el lugar de instalación.

La tubería se entrega en tramos de 400-600 m. A su llegada, los tramos se almacenan a nivel superficial, tal y como se indica en la figura 0.2.2.1 inferior.



Figura 0.2.2.1 Almacenamiento de tramos de tubería.

Es importante encontrar un emplazamiento para montaje que esté guarnecido del oleaje y las corrientes. Cada tramo permanece relleno de aire e incorpora casquillos y bridas de obturación en los extremos.

La siguiente fase de trabajo consiste en instalar los contrapesos de hormigón, que se fijan a la tubería a una determinada distancia entre centros. Esta distancia puede variar a lo largo de la tubería en función de las fuerzas calculadas para operar a una profundidad especial. Los contrapesos se pueden instalar en tierra o en alta mar. La figura 0.2.2.2 muestra una instalación donde los contrapesos de hormigón se fijan a la tubería en tierra y se trasladan hasta la superficie del agua con grúas o excavadoras. **Normalmente, los contrapesos tienen forma rectangular y no redondeada.**



Figura 0.2.2.2 Fijación de contrapesos de hormigón a la tubería.

Cuando todos los tramos están lastrados, se procede a unirlos mediante bridas o manguitos de soporte. Este trabajo se realiza por regla general en alta mar con ayuda de barcasas y grúas. La figura 0.2.2.3 muestra una instalación típica.



Figura 0.2.2.3 Embridado de dos tramos de tubería.

Cuando todos los tramos de la tubería están encajados, se dice que está lista para el proceso de hundimiento. La tubería está equipada con bridas de obturación a cada lado. En el extremo exterior, la brida de obturación incorpora además tubos y válvulas para evacuación y llenado de aire. Antes de comenzar el hundimiento, es imprescindible marcar la ruta correctamente con boyas flotantes en la superficie del mar. También es muy importante escuchar la previsión del tiempo local. El viento debe ser suave y las olas escasas durante el proceso de hundimiento.

La tubería completa se coloca en la ruta correcta con ayuda de barcos, barcazas y pequeños botes. El extremo interior se conecta a la brida en el pozo del emisario. Debe haber un tubo en la pared del pozo para que el agua marina pueda entrar en el pozo durante el hundimiento. Es posible instalar una válvula para regular el caudal.

Antes de proceder a la conexión con bridas, la presión interna del aire en la tubería debe ajustarse con la presión a la profundidad de conexión (por ejemplo, +0,3 bar si la profundidad inicial es 3 m). Un compresor efectúa este ajuste. De este modo se evitan “escapes” en la tubería.

También es importante aplicar una fuerza de tracción en el extremo exterior de la tubería antes de que comience el hundimiento.

Esta fuerza puede variar a lo largo de la operación de hundimiento y se calculará con especial precisión de antemano.

Los cálculos preliminares indican que la fuerza de tracción máxima será de aproximadamente **40 toneladas**.

El hundimiento comienza abriendo con cuidado la válvula de aire en el extremo exterior y controlando la presión interna con un manómetro si es necesario para cargar la tubería con aire comprimido. Antes se habrá calculado una curva que señale la presión de aire necesaria como función de la profundidad de hundimiento. Regulando la presión interna de acuerdo con esta curva, tendremos un hundimiento controlado con una velocidad casi constante. La velocidad de hundimiento aproximada puede ser de **0,3m/seg.**

La configuración en forma de S expresa un equilibrio entre las fuerzas descendentes (contrapesos de hormigón) y las fuerzas ascendentes (flotabilidad de la sección rellena de aire). Esta situación se ilustra en la figura 0.2.2.4.

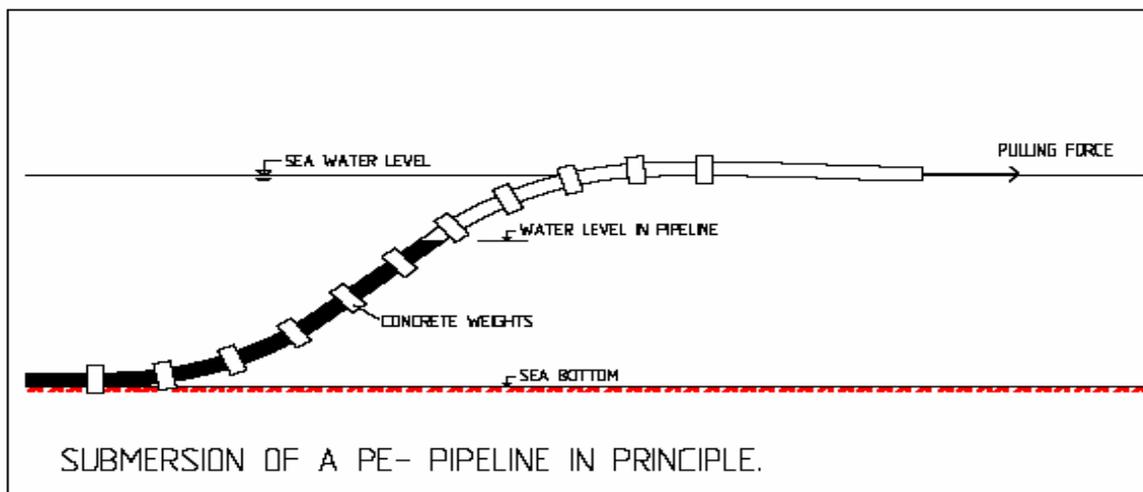


Figura 0.2.2.4 Tubería de polietileno durante el proceso de hundimiento.

El factor crítico es el radio de la curvatura en la superficie marina. Si este radio es inferior a **50 m** aproximadamente en este caso, la tubería corre el riesgo de deformarse por pandeo (coeficiente de seguridad = 2).

Es necesario realizar la operación de hundimiento como un proceso continuo. Si el hundimiento se detiene, el módulo elástico del material de polietileno disminuirá con el tiempo y el radio mínimo de la curvatura se reducirá análogamente. Esto puede provocar una deformación por pandeo en la tubería. Si por cualquier motivo fuera preciso interrumpir la instalación, habrá que arrancar el compresor y dar marcha atrás al proceso de hundimiento.

Esta acción debe llevarse a cabo en un plazo máximo de **15 minutos**. El compresor ha de poder funcionar a 7 bares.

Como es de imaginar, la configuración en S se transformará en una configuración en J cuando se haya hundido el extremo exterior de la tubería. En esta posición hemos de aplicar una fuerza de tracción y una velocidad de hundimiento correctos para evitar fuerzas de aceleración dinámicas cuando el último volumen de aire salga de la tubería. La longitud del hilo de tracción también debe ser acorde con la profundidad máxima, a fin de garantizar un “aterrizaje” seguro del extremo de la tubería en el fondo. El “aterrizaje” se produce cuando la fuerza de tracción se reduce gradualmente hasta cero.

Las figuras 0.2.2.5 y 0.2.2.6 muestran la tubería durante el proceso de hundimiento. Cabe prestar atención al bote de asistencia y al cable de tracción desde el remolcador en el extremo exterior.

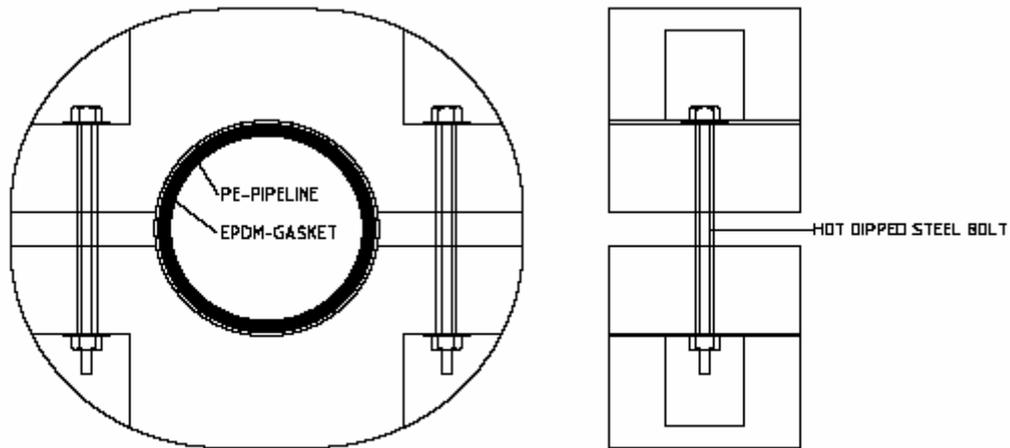


Figura 0.2.2.5 El proceso de inmersión ha comenzado.



Figura 0.2.2.6 Poco antes, el extremo de la tubería se aleja de la superficie.

Hay que mencionar también que los contrapesos de hormigón deben sujetarse correctamente a la tubería para impedir deslizamientos durante la instalación. Para aumentar el coeficiente de fricción y no arañar la superficie de la tubería, instalamos una junta de goma EPDM entre los tubos y los contrapesos de hormigón. En la figura 0.2.2.7 se muestra un ejemplo de sistema de contrapesos de hormigón.



EXAMPLE OF ROUND CONCRETE WEIGHT FOR PE- SUBMARINE PIPELINE

Figura 0.2.2.7 Sistema de contrapesos de hormigón.

El momento de torsión para los pernos se calcula para garantizar que el perno tenga suficiente fuerza. En ocasiones también es adecuado utilizar amortiguadores de goma en los pernos.

0.2.3 Instalación del difusor

El hundimiento del difusor se hace de distinto modo que la tubería.

El difusor se fabrica o se monta en una pieza de 406 m de largo, y se remolca hasta el emplazamiento de la misma forma que las secciones de tubería. El material de los tubos es polietileno 100 SDR26 y el diámetro se escalona de Ø1200mm a Ø500mm. El contratista taladrará los agujeros en el difusor in situ.

Los contrapesos de hormigón y los elementos de flotación se fijan a la tubería antes del hundimiento.

La capacidad de los elementos de flotación ha de ser mayor que el peso de la tubería, incluyendo los contrapesos ya sujetos.

La inmersión se realiza bajando la tubería como una viga desde las barcasas. La figura 0.2.3.1 muestra el principio básico de instalación.

La sección del difusor no debe levantarse del agua. De lo contrario, las tensiones sobre el material de polietileno 100 serían excesivas y el difusor sufriría daños.

Hay que llevar a cabo un cálculo preciso del sistema estático durante la inmersión.

Este cálculo incluye el número de puntos de fijación y puntos de enganche necesarios para garantizar una instalación segura.

Por el momento, suponemos que son 3 o 4 puntos de enganche. Esto significa que necesitaremos 4 botes/barcasas con grúas si el difusor va a sumergirse en una sola pieza. Otra alternativa es dividir el difusor en 4 piezas y hundirlas por separado. En tal caso, las piezas se “acoplarán” entre sí con conexiones embridadas en el fondo marino o a cierta distancia superior.

La elección del método dependerá de los recursos disponibles y de la evaluación de costes / riesgos.

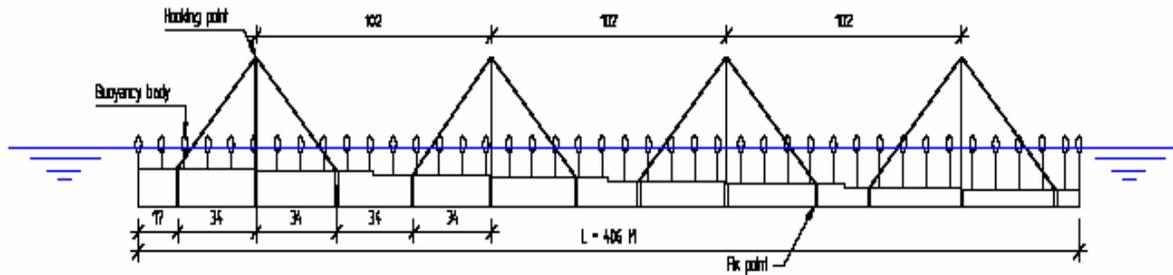


Figura 0.2.3.1 Principio de hundimiento del difusor como una viga.

Si la proporción entre el radio de curvatura y el diámetro de la tubería (R/D) es 20, la tubería se derrumbará o se deformará por pandeo. El esfuerzo máximo tolerable para el material de la tubería durante la fase de hundimiento no debe sobrepasar los 10 MPa.

Los cálculos preliminares demuestran que no es posible realizar el hundimiento sin ayuda de cuerpos de flotación. Eso significa que solo es posible retirar una parte de los cuerpos de flotación instalados durante la operación en la superficie del mar antes de proceder a la inmersión con grúas. En los cálculos del apoyo necesario de estos cuerpos, el coeficiente de seguridad contra deformación por pandeo no podrá ser inferior a 3, teniendo en cuenta que el proceso de hundimiento se verá influido además por el oleaje y las corrientes.

Coficiente de seguridad contra deformación por pandeo = 3,0; por consiguiente: R/D mín. = 60.

Se presupone que los módulos de elasticidad para el polietileno son 300 MPa. Este valor corresponde a un 1,5% de tensión del material durante 24 horas aproximadamente a una temperatura de 30 °C. Si el hundimiento tarda más, la situación será más desfavorable debido a la disminución en los módulos de elasticidad.

Los cuerpos de flotación deben soportar la presión del agua a una profundidad de 60 m. No se permite que se deslicen por la tubería durante el hundimiento.

Como se indica en la figura 0.2.3.1, las grúas que operan simultáneamente harán bajar el difusor. Este método requiere un sistema de comunicación seguro entre los operarios.

0.2.4 Condiciones climatológicas

El plazo de duración previsto para todo el proceso con la tubería principal, incluyendo la conexión de las distintas secciones y el hundimiento, es de 3 a 5 días aproximadamente. El proceso de hundimiento precisará un periodo de calma entre periodos tormentosos de 12 horas.

El plazo de duración previsto para el hundimiento del difusor es de 12 horas. Incluyendo la preparación para el hundimiento, el plazo de duración previsible será de 1 o 2 días.

Los datos de la previsión meteorológica y del oleaje son esenciales para preparar el proceso de hundimiento. La altura de las olas no podrá sobrepasar el metro durante la inmersión de la tubería. Si la acción de las olas es lo más reducida posible, aumentará el coeficiente de seguridad contra daños de los tubos.

0.2.5 Resumen

Durante el hundimiento de la tubería de salida en este ejemplo había que considerar estos factores:

- Es preciso elaborar un procedimiento detallado del hundimiento, incluyendo los parámetros técnicos, recursos necesarios, sistemas de comunicación y procedimientos de emergencia
- Hay que realizar cálculos detallados de las curvaturas de hundimiento con programas informáticos
- La fuerza de tracción en el extremo será de 40 toneladas aproximadamente
- La velocidad de hundimiento no podrá exceder los 0,3 m/seg.
- El compresor trabajará a una presión máxima de 7 bars
- Se calculará la curva de presión del aire en función de la profundidad
- El radio crítico de curvatura es de 50 m aproximadamente
- El hundimiento se efectuará como un proceso continuo
- Los contrapesos de hormigón deben sujetarse de manera segura
- Las condiciones climatológicas deben ser satisfactorias
- El difusor debe instalarse como un sistema de viga con ayuda de grúas
- Es necesario calcular el sistema estático mientras se está bajando el difusor
- Hay que “acoplar” el difusor a la tubería principal en el fondo del mar
- El hundimiento se efectuará con la asistencia de un supervisor que tenga experiencia en este campo

En general se recomienda hacer la mayor parte posible del trabajo de instalación desde la posición sobre la superficie del mar. Conviene minimizar el recurso a los buzos. También resulta favorable hacer toda la soldadura a tope en la planta del fabricante a ser posible.

Esperamos que esta introducción aporte al lector una idea de cómo utilizar las tuberías de polietileno en aplicaciones submarinas.

En los apartados siguientes abordaremos los problemas de diseño.

A. Diseño hidráulico y técnico

A.1 Características técnicas para el diseño de tuberías de polietileno

Para realizar los cálculos necesitaremos cifras de las propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas esenciales se describen en términos de:

E_0 = módulo de elasticidad en tiempo de carga cero y baja carga (MPa)

E_C = módulo de fluencia, tiempo > 0 , esfuerzo $\sigma > 0$ y constante (MPa)

E_R = módulo de relajación, tiempo > 0 , deformación $\epsilon > 0$ y constante (MPa)

σ_0 = resistencia a los reventones en tiempo cero (MPa)

σ_C = resistencia a la fluencia en tiempo > 0 (MPa) (también denominado resistencia a los reventones)

$$\nu = \text{Índice de Poisson} = \frac{\epsilon_l}{\epsilon_r}$$

ϵ_l = tracción en dirección axial

ϵ_r = deformación circunferencial

α = expansión térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Por motivos prácticos, se presupone que el módulo de relajación (E_R) y el módulo de fluencia (E_C) son iguales.

$E_R = E_C = E$ (módulo E) como función de la carga y el tiempo de carga

Las propiedades mecánicas de una tubería de polietileno dependen además de la temperatura. Normalmente las propiedades se dan a 20°C o 23°C .

Las figuras A.1.1 y A.1.2 muestran ejemplos de cómo varían el módulo E y la resistencia a la fluencia (resistencia a los reventones) como función del tiempo y el esfuerzo. Para la resistencia a la fluencia también se indica la influencia de la temperatura.

Las curvas se han tomado del libro Borealis "Tuberías de plástico para suministro de agua y eliminación de aguas residuales", escrito por Lars-Eric Janson [1].

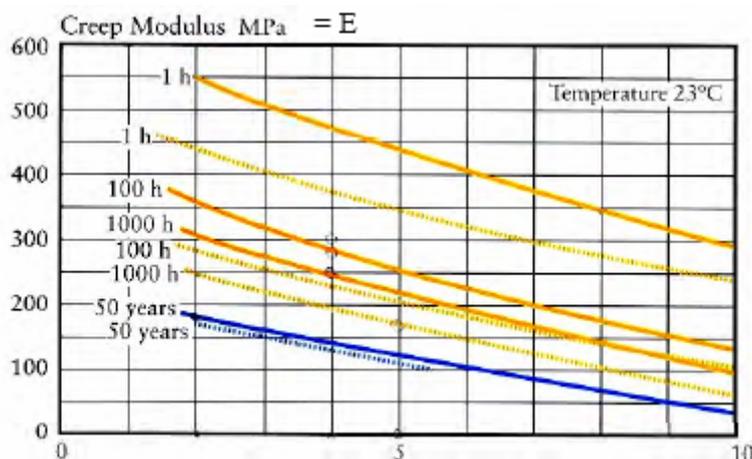


Figura A.1.1 Relación entre módulo E de fluencia y tensión de tracción con el tiempo como parámetro para barras HDPE tipo HE2467 (líneas continuas) y barras HDPE tipo 2 HE2467-BL (líneas punteadas) a 23°C [1].

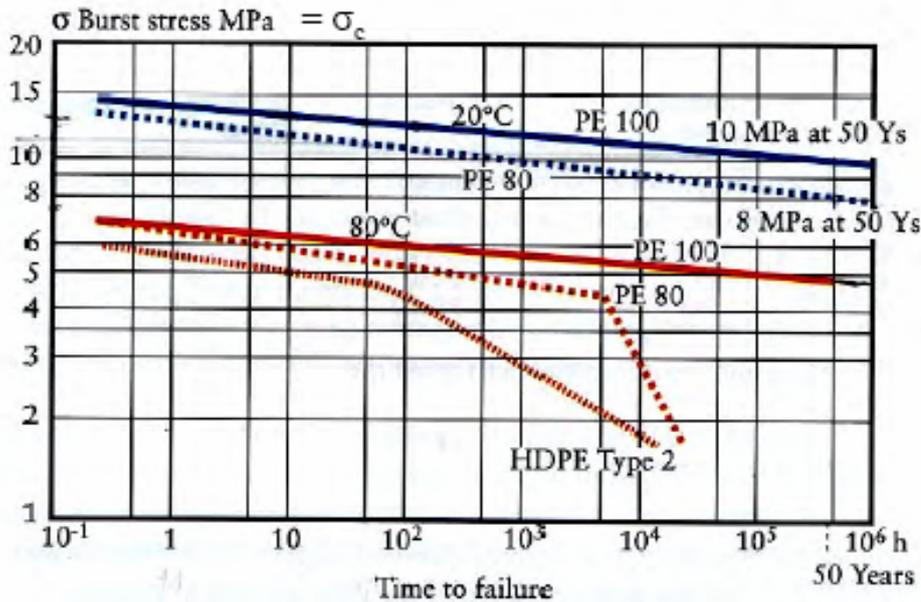


Figura A.1.2 Curvas principales de tensión/tiempo para tuberías de polietileno 80 y 100 a 20°C y 80°C. La curva estándar para HDPE Tipo 2 a 80°C (según DIN8075) se indica a efectos de comparación. La resistencia mínima necesaria (MRS) a 20°C y 50 años es 10 MPa para el polietileno 100 y 8 MPa para el polietileno 80, con un tensión de régimen de 8 MPa y 6,3 MPa, respectivamente.

Para las tuberías de polietileno se elige habitualmente una vida útil de 50 años como tiempo de funcionamiento total.

El esfuerzo de régimen (σ_d) se introduce con la fórmula:

$$\sigma_d = \frac{\sigma_{c,50\text{años}}}{C}$$

A.1-1)

$\sigma_{c,50\text{años}}$ = resistencia a los reventones (resistencia a la fluencia) para el polietileno para una carga constante durante 50 años.

C = coeficiente de proyecto (coeficiente de seguridad)

El coeficiente de seguridad varía de país a país, dependiendo de las normas nacionales. Los valores normales son C = 1,25 o C = 1,6.

En la actualidad las calidades del material de polietileno son principalmente PE80 y PE100. Estos materiales presentan una resistencia a los reventones de 8MPa y 10MPa respectivamente para una tensión constante durante 50 años a 20°C.

Las tensiones de régimen se indican en la tabla A.1.1:

Material	Esfuerzo de régimen C = 1,6	Esfuerzo de régimen C = 1,25
PE80	5,0 Mpa	6,4 Mpa
PE100	6,3 Mpa	8,0 Mpa

Tabla A.1.1 Esfuerzo de régimen

El cliente debe evaluar los riesgos de su proyecto cuando decida el coeficiente de proyecto.

Para aplicaciones submarinas, utilizamos normalmente un coeficiente de proyecto de 1,6.

En la tabla A.1.2 incluimos una lista de las propiedades mecánicas orientativas para materiales de polietileno que deben utilizarse en los cálculos (T = 20°C).

Propiedad	Unidad	PE80	PE100
Densidad	kg/m ³	950	960
Tensión de régimen 50 años $\sigma_{d,50}$	MPa	5,0/6,4 *	8,0/6,3 *
Esfuerzo de régimen en tiempo cero $\sigma_{d,0}$	MPa	8,0/10,4 *	9,4/12,0 *
Módulo de elasticidad en tiempo cero E0	MPa	800	1050
Módulo de elasticidad tras 50 años E50	MPa	150	200
Índice de Poisson ν	-	0,4-0,5	0,4-0,5
Coefficiente medio de expansión térmica α	°C ⁻¹	0,2.10 ⁻³	0,2. 10 ⁻³

* Los coeficientes de seguridad son 1,6 y 1,25 respectivamente.

Tabla A.1.2 Propiedades mecánicas para tuberías de polietileno.

Los materiales de polietileno se someten a una mejora y un desarrollo continuos. En este caso concreto, recomendamos que contacte con el fabricante de las tuberías o de las materias primas para obtener cifras exactas sobre las propiedades.

Otro factor importante es la rugosidad según Nikuradse, en lo relativo a los cálculos de la capacidad hidráulica de la tubería.

Una tubería nueva tendrá una rugosidad baja, pero pueden generarse incrustaciones debido al paso del tiempo y aumentar así el factor de rugosidad.

La calidad del agua que fluye por las tuberías es relevante en la evolución de la rugosidad.

Normalmente distinguimos entre agua potable y aguas residuales.

Para una tubería nueva, el valor de rugosidad puede ser tan bajo como 0,05 mm, pero esta cifra solo tiene un interés teórico.

En la tabla A.1.hemos propuesto valores de régimen para una rugosidad equivalente basándonos en nuestra experiencia en Noruega.

Tipo de agua	Tipo de tubería de polietileno		
	Admisión	Transporte	Salida
Potable	2 mm	0,25 mm	-
Residual	-	0,50 mm	1 mm

Tabla A.1.3 Valores de régimen para rugosidad equivalente (ϵ).

Si las tuberías se limpian regularmente con chorro de agua utilizando un raspador, sería posible reducir los valores de la tabla A.1.3.

A.2 Diseño hidráulico

La pérdida de carga (Δh) en una tubería se describe generalmente mediante la fórmula:

$$\Delta h = f \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + \sum k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \cdot y$$

.2-1)

f = coeficiente de fricción (ver diagrama figura A.2.1.1)

L = longitud de la tubería (m)

D = diámetro interno (m)

v = velocidad en la tubería (m/s)

g = aceleración de la gravedad (= 9.81 m/s²)

Σk = suma de coeficientes para pérdidas de carga singulares

$\Delta \rho$ = diferencia de densidad entre el agua dentro de la tubería y el agua en el medio receptor (kg/m³)

ρ_0 = densidad del agua dentro de la tubería (kg/m³)

y = profundidad del agua en el punto de salida del medio receptor

A.2.1 Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción (f) depende del número de Reynolds (R_e): $R_e = \frac{v \cdot D}{\nu}$

v = velocidad

D = diámetro interno (m)

ν = viscosidad del agua (m²/s)

La viscosidad del agua depende de la temperatura.

T = 20°C $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6}$ m²/s

T = 10°C $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ m²/s

Recomendamos aplicar el valor para una temperatura de 10°C.

La velocidad (v) puede calcularse con la fórmula: $v = \frac{4 \cdot Q}{\pi D^2}$ A.2-3)

Q = caudal (m³/s)

Como se indica, es posible calcular el número de Reynolds conociendo el caudal y el diámetro interno.

Ejemplo 1

Número de Reynolds de destino para un caudal de 100 l/s en una tubería con diámetro interno de 327,2 mm. T = 10°C.

Solución:

Primero calculamos la velocidad, v, a partir de A.2-3) $v = \frac{4 \cdot 0,100}{\pi \cdot 0,3272^2} \text{ m/s} = 1,19 \text{ m/s}$

El número Reynolds se averigua a partir de A.2-2) $R_e = \frac{1,19 \cdot 0,3272}{1,31 \cdot 10^{-6}} = 2,09 \cdot 10^5$

Una vez conozcamos el número de Reynolds, podremos calcular el coeficiente de fricción con ayuda del diagrama de Moody, figura A.2.1.1.

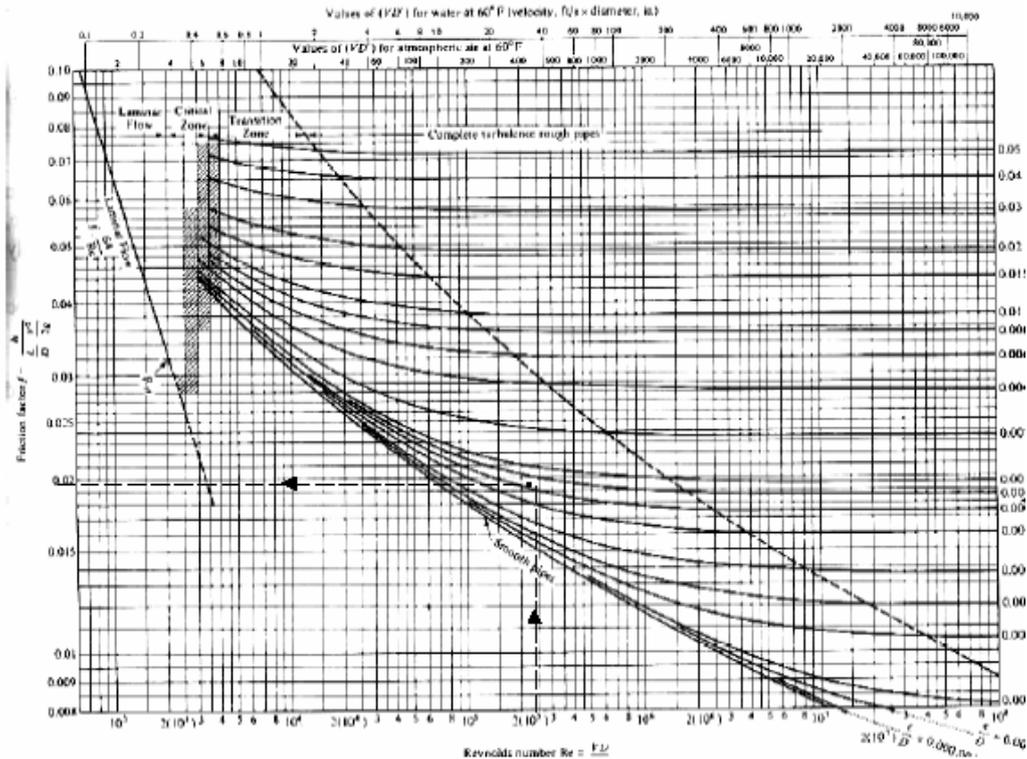


Fig. A.2.1.1 The Moody chart for pipe friction with smooth and rough walls

The entrance parameter on the horizontal axis (x-axis) is the Reynolds number.

Figura A.2.1.1 Diagrama de Moody para fricción de tuberías con paredes suaves y rugosas.

El parámetro de entrada en el eje horizontal (eje x) es el número de Reynolds.

Para encontrar la curva correcta, tenemos que decidir cuál es la rugosidad relativa (r_r) para la pared de la tubería.

$$r_r = \frac{\varepsilon}{D} \tag{A.2-4}$$

ε = rugosidad absoluta, tomada de la tabla A.1.3 (mm)
D = diámetro interno (mm)

A la derecha del diagrama de Moody se indican cifras para la rugosidad relativa representando distintas curvas.

El punto de intersección entre el número de Reynolds y la curva de rugosidad relativa nos da el coeficiente de fricción (f). El valor para (f) se encuentra en el eje vertical (eje y), a la izquierda del diagrama de Moody.

Ejemplo 2

Supongamos que el ejemplo 1 representa una tubería para transporte de agua potable que cruza un fiordo. Averiguar el coeficiente de fricción (f).

Solución:

Ya hemos calculado el número de Reynolds en el ejemplo 1 $Re = 2,97 \cdot 10^5$

Ahora tenemos que averiguar la rugosidad relativa (r_r): $\varepsilon = 0,25$ mm

Por lo tanto:

$$r_r = \frac{0,25}{327,2} = \underline{0,0008}$$

Conociendo Re y r_r , tomamos f de la figura A.2.1.1, tal y como se indica en el diagrama de líneas punteadas y flechas.

El resultado es: $f \approx 0,02$

Para estimaciones aproximadas sin ningún diagrama de Moody a mano, lo habitual es utilizar $f = 0,02$ como valor medio.

Conociendo f , podemos calcular la pérdida de carga por fricción (Δh_f) para la tubería a partir de la primera parte de la fórmula A.2-1)

$$\Delta h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

A.2-5)

Ejemplo 3

Calcule la pérdida de carga por fricción para la tubería descrita en los ejemplos 1 y 2 si la longitud es de 2.500 m.

Solución:

La fórmula A.2-5) nos da el resultado en la unidad mca (metros columna agua) :

$$\Delta h_f = 0,02 \cdot \frac{2500}{0,3272} \cdot \frac{1,19^2}{2 \cdot 9,81} \text{ mwc} = \underline{11,03 \text{ mwc}}$$

Para convertir esta unidad a Pa (N/m²) introducimos la relación:

A.2-6)

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

p = presión (N/m² = Pa)

ρ = densidad del agua (1.000 kg/m³)

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

Esto da un resultado de: $p = 1.000 \cdot 9,81 \cdot 11,03 \text{ Pa} = \underline{108204 \text{ Pa}}$

Si dividimos esta cifra por 10⁵ obtendremos la unidad (bar), y si la dividimos por 10⁶ obtendremos la unidad MPa.

$$p = \frac{108204}{100000} \text{ bar} = \underline{1,08 \text{ bar}}$$

$$p = \frac{108204}{1000000} \text{ MPa} = \underline{0,108 \text{ MPa}}$$

A.2.2 Coeficiente de pérdidas de carga singulares

La segunda parte de la fórmula A.2-1) representa las pérdidas de carga singulares (Δh_s):

A.2-7)

$$\Delta h_s = \sum k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

La expresión $\sum k$ hace referencia a la suma de pérdidas de carga discretas.

Las pérdidas de carga se producen, por ejemplo, en los codos, en los cambios de diámetro, en la entrada y salida de la tubería, en los rebordes, en las válvulas, en las pantallas, en los contadores de agua y en los difusores.

La tabla A.2.1.1 aporta valores orientativos para coeficientes singulares.

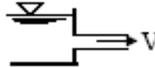
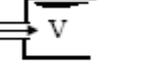
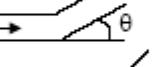
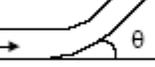
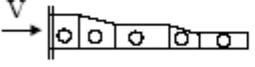
Singular headloss k-factor		k-factor
 Inlet 1		$k = 1,0$
 Inlet 2		$k = 0,5$
 Outlet		$k = 1,0$
 Elbow		$k = 1,1 \cdot \left(\frac{\theta}{90^\circ}\right)^2$
 Smooth bend		$k = 0,2 \cdot \sin \theta$ (rough) $k = 0,1 \cdot \sin \theta$ (smooth)
 Diffuser		$k = 16$
 Intake screen		$k = 0,03$
Bead		$k = 0,03$
Gate valve (open)		$k = 0,2$
Non return valve		$k = 10$

Tabla A.2.1.1 Coeficientes orientativos para pérdidas de carga singulares.

Ejemplo 4

La tubería descrita en el ejemplo 1 está equipada con un codo de 3x90°, 25 rebordes y tiene una salida en un depósito elevado. Calcule la pérdida de carga total.

Solución:

En la tabla A.2.1.1 encontramos los coeficientes:

Codo 90° $\Rightarrow k = 1,1 \cdot (90/90)^2 = 1,1$

Reborde $\Rightarrow k = 0,03$

Salida $\Rightarrow k = 1,0$

La suma total de los coeficientes es la siguiente: $\Sigma k = 3 \cdot 1,1 + 25 \cdot 0,03 + 1,0 = \underline{5,05}$

Pérdida de carga singular total:

$$\Delta h_s = 5,05 \cdot \frac{1,19^2}{2 \cdot 9,81} \quad \text{mwc} = \underline{0,36 \text{ mwc}}$$

A.2.3 Pérdida de carga por densidad

El tercer término de la fórmula A.1) describe la pérdida de carga por densidad (llamada **resistencia del agua salada**) cuando el agua fluye a un medio receptor donde la densidad del agua (por ejemplo, agua salada) es mayor.

$$\Delta h_{\rho} = \frac{\Delta \rho}{\rho_o} \cdot y \quad \text{A.2-8)}$$

Normalmente, este término sólo se tiene en cuenta cuando se trata de tuberías para emisarios si existe diferencia de densidad entre las aguas residuales y el agua del medio receptor.

La diferencia de densidad puede ser debida al contenido de sal en el agua o a diferencias de temperatura.

Ejemplo 5

Calcular la resistencia del agua salada para una tubería de salida instalada a una profundidad de 50, en el mar. La densidad de las aguas residuales es de 1000 kg/m³.

Solución:

Aplicando la fórmula A.2-8) obtenemos el siguiente resultado:

$$\Delta h_{\rho} = \frac{1025 - 1000}{1000} \cdot 50 \text{ mwc} = \underline{1.25 \text{ mwc}}$$

Como puede verse, la resistencia del agua salada alcanza un valor significativo y ha de tenerse en cuenta siempre en las tuberías para emisarios que descargan a medios receptores de agua salada.

A.2.4 Capacidad hidráulica

En capítulos anteriores se han calculado las caídas de presión para un diámetro de tubería determinado y para un caudal de régimen dado.

En ocasiones, el caso es el opuesto. Conocemos la presión y el caudal y queremos decidir el diámetro.

Calcularemos el diámetro a partir de las fórmulas A.2.-1) y A.2-3):

Esto nos da la ecuación

$$g \cdot \left(\Delta h - \frac{\Delta \rho}{\rho_o} \cdot y \right) \cdot \pi^2 \cdot D^5 - \sum k \cdot 8 \cdot Q^2 \cdot D - 8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L = 0 \quad \text{A.2-9)}$$

La ecuación de 5º grado para el diámetro, D, no puede resolverse directamente.

Así pues, hemos de hacer una simplificación.

Puesto que, normalmente, la pérdida de carga singular es pequeña en comparación con la pérdida por fricción, despreciamos el segundo término de la ecuación A.2-9) y hallamos un diámetro aproximado:

$$D = \left[\frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{g \cdot \pi^2 \left(\Delta h - \frac{\Delta \rho}{\rho_o} \cdot y \right)} \right]^{\frac{1}{5}} \quad \text{A.2-10)}$$

Se elige un factor f de 0,02.

Una vez que hemos decidido el diámetro teórico a partir de A.2-10), escogemos el diámetro estándar superior más próximo del programa de fabricación.

Este diámetro se introduce en la fórmula A.2-1 para comprobar que la caída de presión total es menor que el máximo permitido.

Otro enfoque del problema es resolver el caudal (Q) a partir de la ecuación A.2-9)

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \left[\frac{2 \cdot (\Delta h - \frac{\Delta p}{\rho_o} \cdot y) \cdot D \cdot g}{f \cdot L + \sum k \cdot D} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{A.2-11}$$

Si escogemos el valor $f = 0,02$, sólo se desconoce el diámetro D del lado derecho de la ecuación A.2-11). Si escogemos distintos valores, por pasos, para D, será posible resolver el problema por iteración.

El diámetro (D) con el que se obtenga el caudal (Q) correcto será la solución de la ecuación.

Para determinar el “valor de partida” para el proceso de iteración, se aplica la ecuación A.2-10).

Una vez conocidos el caudal y el diámetro, puede ser útil controlar el coeficiente de fricción a partir del diagrama de Moody, Fig. A.2.1.1.

Si es necesario, el valor se corrige y se lleva a cabo una nueva iteración.

Ejemplo 6

Hallar el diámetro óptimo, D, para las caídas de presión dadas en los ejemplos 3, 4 y 5 para un caudal solicitado de $Q = 100$ l/s. SDR (relación entre espesor de pared y diámetro exterior) = 11

Solución:

Obtenemos el diámetro aproximado a partir de A.2-10)

$$D = \left[\frac{8 \cdot 0.02 \cdot 0.1^2 \cdot 2500}{9.81 \cdot \pi^2 (11.03 + 0.36 + 1.25 - 1.25)} \right]^{\frac{1}{5}} \text{ m} = 0.325 \text{ m} = \underline{\underline{325 \text{ mm}}}$$

El diámetro estándar inmediato superior para SDR11 es 327,2 mm (ϕ 400 mm). Introducimos este valor de diámetro en la ecuación A.2-11).

$$Q = \frac{\pi \cdot 0.3272^2}{4} \cdot \left[\frac{2 \cdot (11.03 + 0.36 + 1.25 - 1.25) \cdot 0.3272 \cdot 9.81}{0.02 \cdot 2500 + 5.05 \cdot 0.3272} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.1 \text{ m}^3 / \text{s} = \underline{\underline{100 \text{ l/s}}}$$

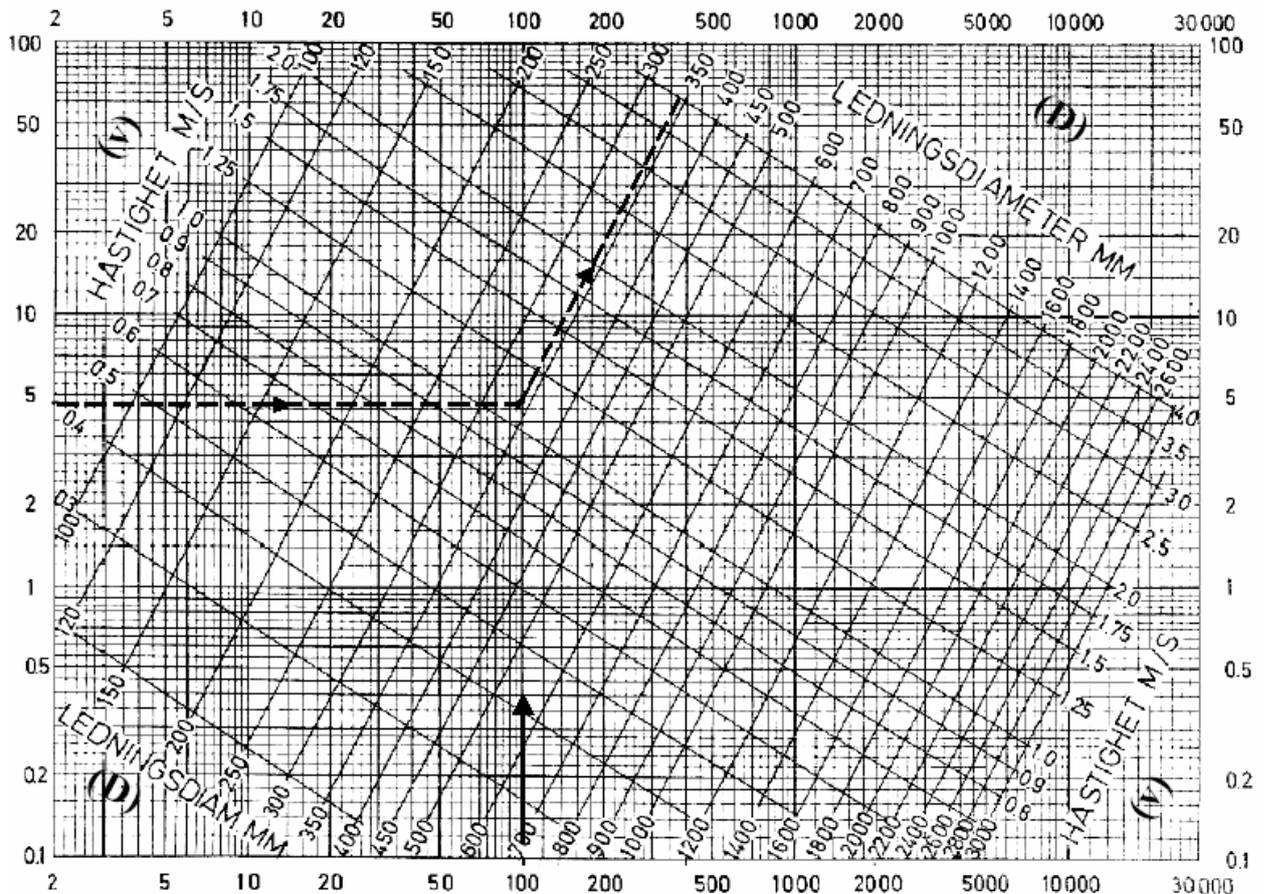
Mediante el sistema de ecuaciones descrito anteriormente en el capítulo A.2., podremos realizar cálculos hidráulicos exactos para las tuberías subacuáticas.

En casos en los que se precise un cálculo aproximado se podrán utilizar los diagramas basados en los trabajos realizado por Colebrook-Prandtl-Nikuradse.

La Fig. A.2.4.1 muestra un diagrama para rugosidad absoluta $k=1,0$ mm [3].

Si conocemos la pérdida por fricción en ‰ ($= \frac{\Delta h}{L} \cdot 1000$)) podremos hallar el diámetro necesario, dado el caudal.

Generalmente podemos resolver una de las incógnitas Q, Δh , D cuando 2 de ellas se conocen. En el diagrama puede leerse también la velocidad.



Q = Caudal

Fig. A.2.4.1 Capacidad hidráulica, $\epsilon = 1 \text{ mm}$

Ejemplo 7

Una tubería para emisario tiene una longitud de 2500 m y termina a 50 m de profundidad. El caudal de régimen es 100 l/s y la pérdida de carga disponible es 13 mca. La densidad del agua del mar es 1025 kg/m³. Calcular el diámetro de tubería necesario si se desprecian las pérdidas de carga singulares.

Solución:

En primer lugar calculamos la pérdida por densidad: $\Delta p = \frac{1025 - 1000}{1000} \cdot 50 \text{ mca} = 0,25 \text{ mca}$

La pérdida por fricción total disponible es: $\Delta h_f = (13 - 0,25 \text{ mca}) = 12,75 \text{ mca}$

Hallamos la pendiente de la línea de pérdida por fricción (I): $I = 12,75 / 2500 \times 1000 \text{ ‰} = 5,1 \text{ ‰}$

Llevamos estas cantidades al diagrama A.2.4.1 – Q = 100 l/s e I = 5,1 ‰.

El punto de intersección da: D = 340 mm

Elegimos el diámetro estándar inmediatamente superior para incluir las pérdidas de carga singulares. Para SDR11, esto nos da un diámetro de 450 mm. $d_i = 368,2 \text{ mm}$.

El ejemplo 6 es similar al ejemplo 7. En el último caso hemos obtenido un diámetro inmediatamente superior. La diferencia de coste aproximada entre los dos resultados, para una tubería de 2500 m de largo es de 70.000 €. Este ejemplo refleja lo importante que es llevar a cabo unos cálculos hidráulicos correctos.

A.2.5 Velocidad de autolimpieza

Otro factor importante en las tuberías submarinas es evitar la formación de depósitos en el interior de la tubería y evitar la acumulación de aire/gas. Para comprobar la capacidad de autolimpieza de la tubería, tendremos en cuenta el esfuerzo cortante del caudal (τ):

$$\tau = \rho g \cdot D/4 \cdot I \quad \text{A.2.12)}$$

ρ = densidad del agua (kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad ($= 9,81 \text{ m/s}^2$)

D = diámetro interior (m)

I = pendiente de la línea de pérdida por fricción $\Delta h/L$

Para que la tubería sea autolimpiable, el esfuerzo cortante ha de ser $\geq 4 \text{ N/m}^2$

Ejemplo 8

Comprobar si la tubería de PE SDR11 de 400 mm de diámetro del ejemplo 6 es autolimpiable.

Solución:

Debemos hallar la pendiente de la línea de pérdidas por fricción: $I = \frac{11,03}{2500} = 0,0044$

Utilizando A.2.12): $\tau = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,3272}{4} \cdot 0,0044 \text{ N/m} = 3,5 \text{ N/m}^2$

Como podemos apreciar, el esfuerzo cortante es $< 4,0$, por lo tanto, debemos esperar que se forme algún depósito en la tubería. En estos casos puede ser útil instalar equipos para el lavado por descarga de agua y usar rascadores para limpieza.

A.2.6 Transporte de aire

Las acumulaciones de aire y de gas son los “peores enemigos” de las tuberías subacuáticas. Para solucionar estos problemas existen 2 posibles soluciones:

- Evitar que entre aire en la tubería
- que haya la suficiente velocidad en la tubería para transportar el aire/gas a través de la misma

Las acumulaciones de aire/gas en una tubería implicarán:

- disminución de la capacidad hidráulica
- “flotación” o desplazamiento vertical

Si es posible, recomendamos el método a) como mejor solución. Para las tuberías de emisarios, la cámara de salida debe construirse de tal modo que el aire no pueda entrar en la tubería. Esto significa que hay que tener en cuenta:

- el nivel normal del agua más bajo, en el medio receptor/fuente (LLW)
- vértice
- fluctuaciones en el nivel del agua debidas a cambios bruscos de caudal

En la mayoría de los casos, esto implica que la parte superior del emisario en el punto en el que deja la cámara debe estar en unos límites de 0,5-1,5 m por debajo del nivel normal del agua más bajo.

Para tuberías de entrada, la sub-presión máxima debe ser menos de 4 mca para evitar la liberación de aire procedente del agua. Como norma general, no se recomienda la construcción de sifones.

Tanto para tuberías de emisarios como para tuberías de admisión, recomendamos evitar los puntos altos en el trazado.

Para tuberías de transporte, deberá ser posible eliminar el aire de los agujeros de hombre situados en la línea de costa cuando se inicia el transporte de agua durante el funcionamiento general y en caso de trabajos de reparación.

Para el transporte de aguas residuales el periodo de retención no debe exceder el tiempo límite de emisión de H₂S. A título indicativo, el tiempo de retención no deberá sobrepasar las 4 horas (depende, no obstante, de la temperatura de trabajo).

En la solución b) el caudal debe alcanzar la velocidad crítica U_c, para eliminar las burbujas de aire presentes en la tubería.

La velocidad crítica del agua, U_c, viene dada por: $U_c = f(D_i \text{sen} \alpha)$

A.2.13)

D_i = diámetro interno de la tubería (m)

α = gradiente de la tubería

Mediante una expresión simplificada, relacionamos U_c en función de $\sqrt{gD_i}$

$$U_c = k \cdot \sqrt{gD_i} \quad \text{A.2.14)}$$

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

El factor k se representa en la Fig. A.2.6.1 como función de $\sqrt{\text{sen} \alpha}$

La curva k de la Fig. A.2.6.1 es aplicable para α = 0° → 90°.

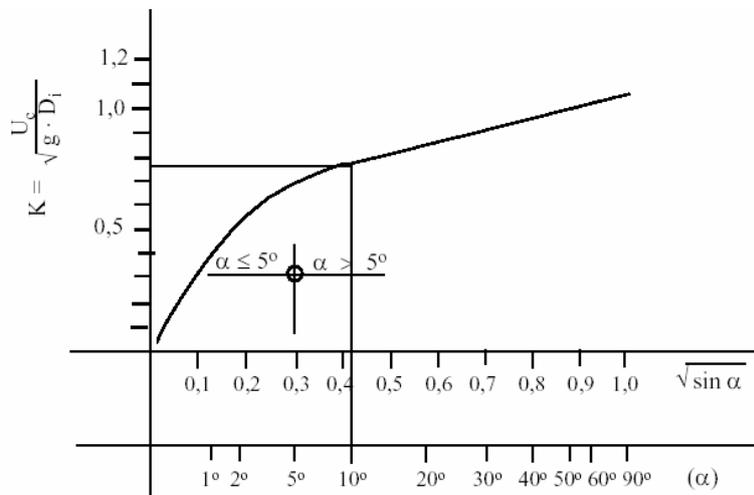


Fig. A.2.6.1 Velocidad crítica para el transporte del aire en el interior de una tubería

Ejemplo 9

Calcular la velocidad crítica para el transporte del aire en el interior de una tubería con una pendiente de α = 10° y un diámetro interno D_i = 500 mm.

Solución:

De la fig. A.2.6.1 se determina que: k = 0,75

Al introducir este valor en la ecuación a.1-13 obtenemos: $U_c = 0,75 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 0,5} \text{ m/s} = 1,66 \text{ m/s}$

Como podemos ver, la velocidad del sistema ha de ser bastante elevada para transportar el aire.

Si la velocidad en el interior de la tubería es superior a 1,66 m/s, las burbujas de aire serán transportadas junto con el agua. Si la velocidad es inferior a 1,66 m/s, las burbujas de aire retrocederán para ser liberadas en tierra siempre que no haya puntos altos en el trazado.

Esta es una consideración teórica. En los casos reales, existe una transición difusa para U_c .
No obstante, la fórmula A.2-13 proporciona una indicación válida.

A.3 Diseño estático

En este capítulo presentaremos las fórmulas necesarias para decidir el espesor de pared de la tubería, teniendo en cuenta las fuerzas externas e internas que actúan sobre la tubería. El diámetro interno de la tubería se decide con las fórmulas indicadas en el capítulo A.2.

Hemos de señalar que en un proyecto real, no es preciso realizar más que unos pocos de estos cálculos. Es importante distinguir los factores significativos en relación con la vida útil de la tubería.

A.3.1 Presión interna

La presión interna creará tensiones en la pared del tubo tanto en dirección circunferencial como en dirección longitudinal. La tensión en dirección longitudinal depende de la forma en que puede moverse la tubería (fija o con libertad de movimiento).

A.3.1.1 Dirección circunferencial

La Fig. A.3.1.1.1 ilustra el sistema estático.

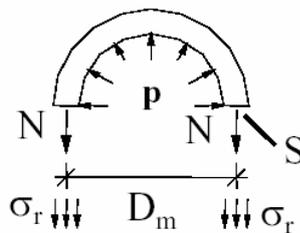


Fig. A.3.1.1.1 Sistema estático de la presión interna en un tubo cortado

No se producen esfuerzos cortantes debidos a la presión interna. Sólo se producirá un esfuerzo de tracción (N) en la dirección circular. Si integramos los componentes de la presión, obtenemos el siguiente resultado basado en el equilibrio de fuerzas:

$$2. N = p D_m \quad \text{A.3-1)}$$

N = Esfuerzo de tracción (N)

P = Presión (N/m² = Pa)

D_m = diámetro medio (m)

Si introducimos la tensión circular (σ_r) y el espesor de pared (s), podemos desarrollar las siguientes fórmulas:

$$N = \sigma_r \cdot S \quad \text{A.3-2)}$$

$$\sigma_r = \frac{p \cdot D_m}{2 \cdot S} \quad \text{A.3-3)}$$

$$S = \frac{p \cdot D_m}{2 \cdot \sigma_r} \quad \text{A.3-4)}$$

$$\text{Puesto que } D_m = D - s \quad s = \frac{p \cdot D}{(2 \cdot \sigma_r + p)} \quad \text{A.3-5)}$$

σ_r = tensión de diseño (ver tabla A.1.2)

D = diámetro exterior

Ejemplo 1

Hallar el espesor de pared para una tubería PE80 de 200 mm de diámetro sometida a una presión de proyecto de 1 MPa (10 bar). Coeficiente de seguridad de proyecto = 1,6.

Solución:

El espesor de pared (s) se halla con la fórmula A.3-5). σ se toma de la tabla A.1.2.

$$s = \frac{1,0,2}{(2,5 + 1)} m = 0,0182m = \underline{18,2mm}$$

El esfuerzo (σ) para una tubería dada en la dirección circunferencial, expuesta a una presión (p) puede calcularse a partir de la fórmula:

$$\sigma_r = \frac{p}{2}(SDR - 1) \quad \text{donde } SDR = \frac{D}{s} \quad \text{A.3-6)}$$

Ejemplo 2

Dada una tubería PE100, SDR 17,6, expuesta a una presión de 0,8MPa (8 bar), calcular la tensión en la pared del tubo y el coeficiente de seguridad a los reventones tras 50 años de carga.

Solución:

La fórmula A.3-6) nos da la tensión circular: $\sigma_r = \frac{0,8}{2}(17,6 - 1)MPa = \underline{6,64Mpa}$

Coeficiente de seguridad A-1-1): $C = \frac{10}{6,64} = \underline{1,50}$

Una tubería siempre está expuesta a más fuerzas, aparte de la presión interna. Por ejemplo, fuerzas debidas a la temperatura, fuerzas en codos y reductores, profundidad del relleno en zanjas, golpes de ariete, fuerzas debidas a las corrientes y al oleaje, fuerzas de instalación, etc.

Es preciso considerar el coeficiente de seguridad (coeficiente de diseño) teniendo en cuenta estas otras fuerzas.

El procedimiento consiste en calcular todas las fuerzas que actúan y hallar la fuerza combinada máxima. Este es el método adoptado en los siguientes capítulos.

A.3.1.2 Dirección longitudinal

La fig. 3.1.2.1 muestra las tensiones y esfuerzos de una tubería sometida a presión interna.

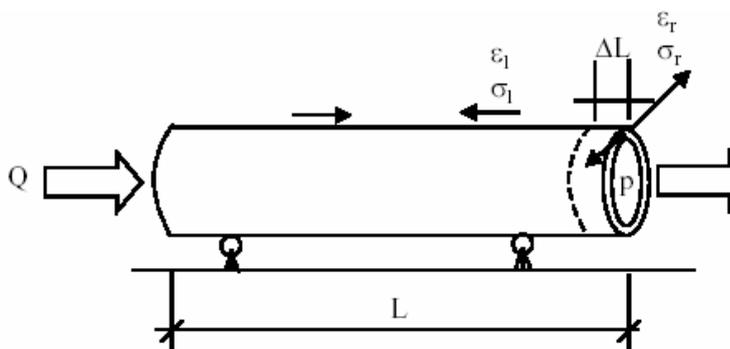


Fig. A.3.1.2.1 – Tubería expuesta a presión interna

La presión interna producirá una deformación en la dirección longitudinal si la tubería tiene libertad de movimiento. La tubería tenderá a acortarse debido a la contracción:

$$\varepsilon_1 = -\nu \cdot \varepsilon_r \quad \text{A.3-7)}$$

ε_1 = tracción longitudinal
 ε_r = deformación circunferencial
 ν = Índice de Poisson (0,4-0,5)

Si no existen fuerzas de fricción actuando contra el movimiento, no se producirá un esfuerzo permanente en la dirección longitudinal y el acortamiento ΔL se desarrollará plenamente, tal como se indica en la fórmula A.3-8). Este es el caso de una tubería colocada en superficie y que flota libremente:

$$\Delta L = -\nu \cdot L \cdot \varepsilon_r \quad \text{A.3-8)}$$

L = longitud de la tubería

Para calcular ε_r introduciremos la ley de Hook:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} \quad \text{A.3-9)}$$

σ_r = esfuerzo en la dirección circunferencial (ver fórmula A.3-6)
E = módulo de elasticidad (módulo de fluencia) (ver tabla A.1.2)

Ello nos da:

$$\varepsilon_r = \frac{P}{2 \cdot E} (SDR - 1) \quad \text{A.3-10)}$$

$$\Delta L = \frac{\nu \cdot L \cdot P}{2 \cdot E} (SDR - 1) \quad \text{A.3-11)}$$

Ejemplo 3

Calcular el acortamiento de una tubería PE80, SDR11 expuesta a una presión interna de $p=1,2$ MPa y que puede moverse libremente. La longitud de la tubería es 100 m. El módulo de elasticidad para cargas de corta duración puede fijarse en 800 MPa y el índice de Poisson es 0,5.

Solución:

Solucionaremos el problema aplicando la fórmula A.3-11)

$$\Delta L = \frac{-0,5 \cdot 100 \cdot 1,2}{2 \cdot 800} (11 - 1) m = \underline{\underline{-0,375 m}}$$

Como puede apreciarse, el acortamiento puede ser importante. Si el manguito del extremo de esta tubería no es resistente a la tensión, se producirán fugas. Vemos también que el resultado es independiente del diámetro.

En la mayoría de los casos, el movimiento de la tubería se evita mediante bloques de anclaje, cobertura con tierra, etc.

Ello significa que se producirán esfuerzos en la dirección longitudinal.

El máximo esfuerzo aparece cuando el alargamiento es cero:

$$\sigma_{\text{Imax}} = \nu \cdot \sigma_r \quad \text{A.3-12)}$$

$$\sigma_{\text{Imax}} = \frac{\nu \cdot P}{2} (SDR - 1) \quad \text{A.3-13)}$$

El esfuerzo será tensión.

Ejemplo 4

Calcular el esfuerzo longitudinal máximo para los datos dados en el ejemplo 3.

Solución:

$$\text{Utilizando la fórmula A.3-13) obtenemos: } \sigma_{\text{max}} = \frac{0,5 \cdot 1,2}{2} (11 - 1) \text{MPa} = \underline{3 \text{MPa}}$$

Como puede verse, el esfuerzo longitudinal puede alcanzar la mitad de la tensión circular.

El esfuerzo longitudinal descenderá con el tiempo debido a la relajación que se produce en el polietileno.

Esto se debe a una deformación permanente, mientras el módulo de elasticidad se reduce con el tiempo. Este hecho puede verse con la ley de Hook:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

← Constante
← Decrecientes

A-3-14)

Ejemplo 5

Hallar el esfuerzo a largo plazo en dirección longitudinal para una tubería fija, expuesta a una presión constante de 1MPa. Suponer SDR =11, módulo de elasticidad para cargas de corta duración = 800 MPa, módulo de elasticidad para cargas de larga duración = 150 MPa y $\nu = 0,5$.

Solución:

Primero calculamos el esfuerzo con la fórmula A.3-13):

$$\sigma_l = \frac{0,5 \cdot 1}{2} (11 - 1) \text{MPa} = \underline{2,5 \text{MPa}}$$

A continuación la deformación correspondiente con A.3-14):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{2,5}{800} \cdot 100\% = \underline{0,31 \text{MPa}}$$

El esfuerzo a largo plazo para esta deformación constante ficticia también puede obtenerse a partir de A.3-14):

$$\sigma_{l, \text{largo plazo}} = 150 \cdot 0,0031; \text{Pa} = \underline{0,465 \text{MPa}}$$

Como vemos, el esfuerzo a largo plazo es $\frac{0,465}{2,5} \cdot 100\% = 18,6\%$ del esfuerzo a

corto plazo en la dirección longitudinal. La relajación es significativa. En comparación con la tensión circular, que es constante a lo largo del tiempo, el esfuerzo en la dirección longitudinal alcanza el 0,3% ($0,465/5 \times 100\%$) a los 50 años de funcionamiento.

A.3.2 Cargas externas/pandeo

En este capítulo estudiaremos el riesgo de deformación por pandeo de una tubería de PE expuesta a cargas externas.

Estas cargas, en el caso de tuberías subacuáticas, puede ser:

- Subpresión
- Cubierta de tierra en la zanja

La subpresión puede crearse de distintas maneras:

- Pérdidas singulares y por fricción en las tuberías de admisión
- Golpes de ariete
- Subpresión durante el proceso de hundimiento de la tubería
- Presión del agua exterior sobre las tuberías llenas de aire utilizadas como elementos de flotabilidad.

El pandeo se produce cuando las fuerzas de compresión en dirección circunferencial de la tubería superan la estabilidad del material.

La Fig. A-3-2-1 muestra “imágenes de pandeo” de una tubería en una zanja en tierra firme y en tierra suelta/al aire/en agua.

Tierra firme Tierra suelta/
agua o aire

Fig. A.3.2.1 Diferentes tipos de pandeo

Hay una diferencia importante en la resistencia de una tubería al pandeo según esté instalada en una zanja o en un fondo marino.



$n > 2$

$n = 2$

A.3.2.1 Pandeo en una tubería sin apoyo

Una tubería, durante el proceso de hundimiento o de tendido sobre el fondo marino, puede considerarse sin apoyar en los tramos normales entre los contrapesos de hormigón.

La presión de pandeo para una tubería sin apoyo puede calcularse con la fórmula:

$$P_{buc} = \frac{2 \cdot E}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{s}{D_m}\right)^3 \cdot k \quad \text{A.3-15)}$$

P_{buc} = presión de pandeo (MPa)

E = módulo de elasticidad (para cargas de larga duración, se aplicará el módulo de fluencia. Para golpes de ariete elásticos aplicaremos el módulo de elasticidad para cargas de corta duración)

ν = Índice de Poisson (0,4-0,5)

s = espesor de la pared (m)

D_m = diámetro medio (m)

k = factor de corrección debido al ovalamiento- ver fig. A.3.2.1.1.

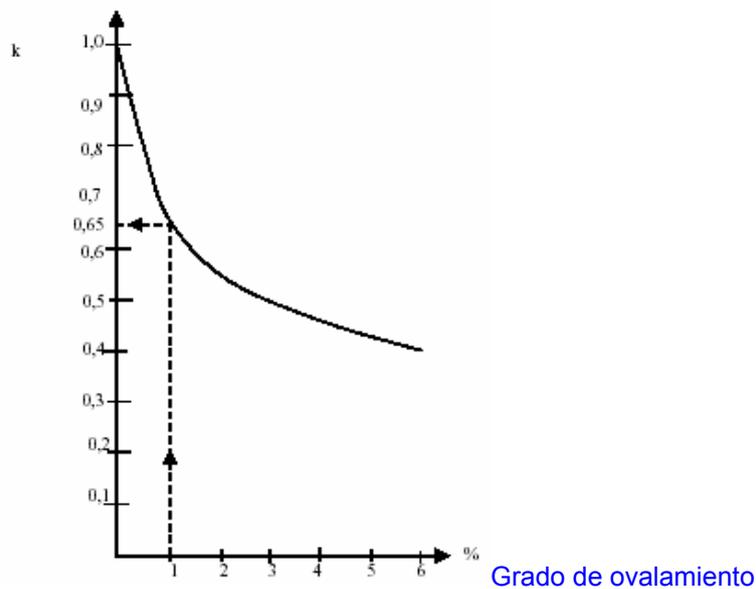


Fig. A.3.2.1.1 Factor de corrección debido al ovalamiento

Podemos transformar la fórmula A.3-15 sustituyendo al SDR por la fracción $\frac{D}{s}$:

$$P_{buc} = \frac{2.E}{1-\nu^2} \cdot \frac{k}{(SDR-1)^3} \quad \text{A.3-16)$$

De la Fig. A.3.2.1.1. podemos deducir que el ovalamiento de la tubería instalada tiene una importancia significativa en lo que respecta a la capacidad frente al pandeo. Para una tubería estándar, un ovalamiento correspondiente a 1-1,5% es aceptable. Esto nos da un factor de reducción de $k=0,65$.

Ejemplo 6

Calcular la capacidad de presión por pandeo. P_{buc} , para una tubería PE100, SDR26, de 900 mm de diámetro, sin apoyo, expuesta a golpes de ariete. El módulo de elasticidad para cargas de corta duración es 1050 MPa. Suponer un ovalamiento del 1% y $\nu = 0,4$.

Solución:

Utilizando la fórmula A.3-16) y la fig. A.3.2.1.1 obtenemos:

$$P_{buc} = \frac{2.1050}{1-0,4^2} \cdot \frac{0,65}{(26-1)^3} \text{Mpa} = 0,099 \text{Mpa} = \underline{10 \text{mwc}}$$

En la práctica, esto significa que la tubería puede resistir el vacío durante un breve periodo de tiempo. No obstante, es habitual introducir un coeficiente de seguridad, $F=2,0$, para estos cálculos.

No recomendaríamos exponer la tubería a una subpresión superior a

$$\frac{P_{buc}}{F} = \frac{10}{2} \text{mwc} = \underline{5 \text{mwc}}$$

Ejemplo 7

Calcular el coeficiente de seguridad contra el pandeo para una tubería PE100, SDR33, sin apoyo, cuya función es de tubería de admisión. La tubería está expuesta a una subpresión constante de 2mca en el punto más crítico. El módulo de elasticidad a largo plazo puede fijarse en 200 MPa. El ovalamiento es del 1% y $\nu=0,4$.

Solución:

A partir de la fórmula A.3-16 y la fig. A.3.2.1.1 obtenemos:

$$P_{buc} = \frac{2.200}{1-0,4^2} \cdot \frac{0,65}{(33-1)^3} \text{Mpa} = 0,0094 \text{Mpa} = \underline{1 \text{mwc}}$$

$$\text{Coeficiente de seguridad: } F = \frac{P_{buc}}{P_{appear}} = \frac{1}{2} = \underline{0,5}$$

La tubería sufrirá pandeo debido a la subpresión antes de que llegue a 50 años. Teóricamente, la tubería se pandeará cuando el módulo elástico sea igual a 400 MPa. Esto sucederá ya transcurridos 1-2 años de funcionamiento (ver. Fig. A.1.1.).

Los tubos subacuáticos expuestos a subpresión pueden ayudarse de contrapesos de hormigón si la distancia entre los contrapesos es lo suficientemente pequeña. De ese modo aumentará la capacidad frente al pandeo de la tubería.

Si la distancia (l) entre los soportes (contrapesos o aros) está entre los siguientes límites:

$$4 \cdot \sqrt{\frac{s \cdot D_m}{2}} < l \leq \frac{1,56 \cdot s}{(s/D_m)^{0,5}} \quad \text{A.3-17)$$

la presión de pandeo podría expresarse de la siguiente manera:

$$P_{buc1} = \frac{2,2 \cdot s \cdot \sqrt{E}}{1} \cdot \sqrt{P_{buc}} \cdot \frac{k}{F} \quad \text{A.3-18)}$$

l = distancia entre soportes (distancia entre centros – ancho del soporte)
 P_{buc} = presión de pandeo para tubería sin apoyos (ver fórmula A.3.16), $k=1,0$
 s = espesor de pared
 k = coeficiente de reducción debido al ovalamiento, ver fig.A.3.2.1.1
 F = coeficiente de seguridad (2,0)

Ejemplo 8

La tubería descrita en el ejemplo 7 está equipada con contrapesos de hormigón con una distancia entre centros de 3m. La anchura de los bloques es 0,4 m y el diámetro de la tubería es 600 mm. Calcular el coeficiente de seguridad contra el pandeo.

Solución:

El espesor de la pared es: $s = \frac{600}{33} \text{ mm} = \underline{18,2 \text{ mm}}$

Distancia entre soportes: $l = (3-0,4) \text{ m} = \underline{2,6 \text{ m}}$

Presión de pandeo para tubería sin apoyos, asumiendo que $k=10$ en la fórmula A.3.16):

$$P_{buc} = \frac{2.200}{1-0,4^2} \cdot \frac{1}{(33-1)^3} \text{ Mpa} = 0,0145 \text{ Mpa} \approx \underline{1,5 \text{ mwc}}$$

Aplicamos la fórmula A.3-18) considerando $F=1,0$:

$$P_{buc1} = \frac{2,2 \cdot 18,2 \cdot \sqrt{200}}{2600} \cdot \sqrt{0,0145} \cdot 0,65 \text{ MPa} = 0,017 \text{ MPa} \approx \underline{1,7 \text{ mwc}}$$

El coeficiente de seguridad contra el pandeo es: $F = \frac{1,7}{2,0} = \underline{0,85}$

Como puede verse, el coeficiente de seguridad ha aumentado de 0,5 a 0,85, pero la tubería seguirá deformándose por pandeo. El pandeo se producirá cuando el módulo de fluencia, E , es aproximadamente 275 MPa. Esto sucederá después de unos 10 años de funcionamiento (ver fig. A.1.1.).

Para alcanzar el coeficiente de seguridad en este caso en concreto se podrán considerar las siguientes soluciones:

- Reducir la distancia entre los bloques de hormigón
- Soporte de aros de acero
- Instalar la tubería en una zanja
- Incrementar el diámetro de la tubería para reducir la subpresión causada por la fricción.
- Aumentar el espesor de la pared para aumentar la capacidad frente al pandeo

La elección de la solución debe basarse en una evaluación técnico-económica. Si se precisan cálculos más avanzados, consultar [12].

En el siguiente capítulo estudiaremos el pandeo de una tubería instalada en una zanja.

A.3.2.2 Pandeo de una tubería sometida la presión de una zanja o del suelo

Una tubería instalada en una zanja tiene una capacidad significativamente superior frente al pandeo que una tubería sin apoyo. Los factores más importantes son:

- Rigidez circunferencial de la tubería
- Módulo de elasticidad para el suelo (módulo tangencial)

La presión de pandeo (q) puede calcularse a partir de la fórmula A.3.19) [8]:

$$q = \frac{5,63}{F} \cdot \sqrt{S_R \cdot E_t^1} \cdot \alpha \quad \text{A.3-19)}$$

$$\alpha = 1 - 3 \cdot \frac{\delta}{D} \quad \text{A.3-20)}$$

$S_R =$ rigidez circunferencial, corta duración

$$S_R = \frac{E}{12 \cdot (SDR - 1)^3} \quad \text{A.3.21)}$$

$E_t^1 =$ $2 E_s^1$ = módulo tangencial para el suelo
 $E_s^1 =$ modulo secante para el suelo (ver Fig. A.3.2.2.1)

$\frac{\delta}{D} =$ ovalamiento ($\approx 0,05$)

$F =$ coeficiente de seguridad (nunca deberá ser inferior a 2,0)

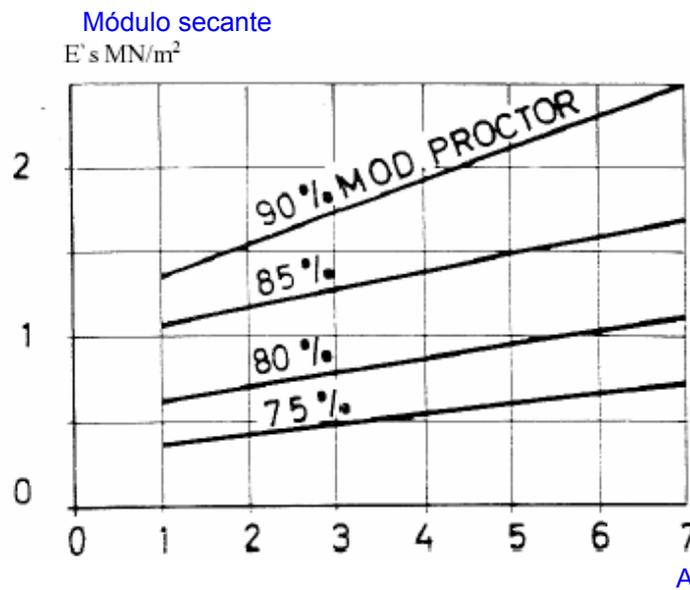


Fig. A.3.2.2.1 Módulo secante para suelo granular frente a altura de relleno en zanjas submarinas

Para una tubería instalada en una zanja, hemos de sumar la presión que ejerce la cubierta de suelo a la subpresión causada por el caudal hidráulico.

La presión del suelo (q_s) alrededor de la tubería de PE se considera uniformemente distribuida a lo largo de su perímetro.

$$q_s = (\gamma - \gamma_w) \cdot h \quad \text{A.3-22)}$$

$\gamma =$ peso específico del suelo

$\gamma_w =$ peso específico del agua

$h =$ altura de la cubierta de suelo

Ejemplo 9

Volvamos a los ejemplos 7 y 8. En este caso decidimos enterrar la tubería en una zanja con una cubierta de suelo de 1 m. Vamos a determinar el coeficiente de seguridad frente al pandeo en este caso. Supongamos un módulo de elasticidad

para cargas de corta duración para la tubería de 1000 Mpa, $\frac{\sigma}{D} = 0,05$, $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ y un Proctor para el suelo del 80%.

Solución:

En primer lugar, obtendremos la rigidez circunferencial de la tubería a partir de la fórmula A.3.21):

$$S_R = \frac{1000 \cdot 1000}{12 \cdot (33 - 1)^3} \text{ kPa} = 2,54 \text{ Pa}$$

El coeficiente de corrección, α , por ovalamiento se toma de A.3-20):
 $\alpha = 1 - 3 \cdot 0,05 = 0,85$

Hallamos E_s^1 a partir de la Fig. A.3.2.2.1: $E_s^1 = 600\text{kPa} \rightarrow E_t^1 = 2 \cdot 600\text{kPa} = 1200\text{kPa}$

Aplicando la fórmula A.3-19) y suponiendo $F=1,0$, obtenemos la presión de pandeo:

$$q = \frac{5,63}{1} \cdot \sqrt{2,54 \cdot 1200 \cdot 0,85} \text{ kPa} = \underline{264 \text{ kPa}} = \underline{0,264 \text{ MPa}} \approx \underline{27 \text{ mwc}}$$

La tubería, ahora, es capaz de soportar una presión externa correspondiente a aproximadamente 27 mca. En comparación con los ejemplos 7 y 8, hay una presión externa del suelo causada por la cubierta. Ver fórmula A.3-22)

$$Q = (20 - 10) \text{ kN/m}^2 = 10 \text{ kN/m}^2 = \underline{0,01 \text{ MPa}} \approx \underline{1 \text{ mca}}$$

La presión externa total es: $q_t = \text{sub-presión} + \text{presión del suelo} = (2\text{mca} + 1\text{mca}) = \underline{3\text{mca}}$

El coeficiente de seguridad contra el pandeo será: $F = \frac{q}{q_t} = \frac{27}{3} \approx 9$

Al instalar la tubería en una zanja con cubierta de suelo, el coeficiente de seguridad ha aumentado de 0,85 a ≈ 12 .

Esto indica que hemos de instalar las tuberías en zanjas siempre que vayan a estar expuesta a fuerzas externas importantes y la clase SDR es alta.

En lo que respecta a las tuberías subacuáticas, puede ser más favorable económicamente reducir la clase SDR de la tubería que instalarla en una zanja.

A.3.3 Golpe de ariete

En una tubería, el golpe de ariete se produce cuando se da un cambio repentino de caudal. El resultado es una onda de presión que se desplaza hacia atrás y hacia delante en el sistema. El motivo más frecuente de los golpes de ariete es la puesta en marcha o parada repentina de las bombas o el cierre y/o la apertura de válvulas. Aun si las bombas tienen instalados convertidores de frecuencia, el suministro eléctrico puede fallar. Los cálculos exactos son complicados y han de realizarse mediante programas informáticos.

No obstante, hay un método simplificado que nos da una indicación de la amplitud máxima y mínima de la onda de presión y que presentaremos a continuación. Para tuberías de admisión y emisarios, el golpe de ariete no suele ser un problema si las tuberías no están conectadas directamente a la bomba, pero deberá evitarse el cierre repentino de compuertas. Los cambios de caudal son amortiguados en las cámaras de entrada y salida. El área de la cámara deberá diseñarse teniendo en cuenta las variaciones de caudal que se prevén.

En tales casos, la amplitud de las fluctuaciones estará en la gama de un ± 1 m sobre el máximo y por debajo del mínimo nivel de funcionamiento respectivamente.

Para tuberías de transporte y para emisarios y tuberías de admisión que estén conectadas directamente a bombas, el golpe de ariete puede dañar la tubería si la clase de presión de la misma es demasiado baja. Lo más crítico es la sub-presión que puede alcanzar valores de >10 mca si existen puntos significativamente altos en el trazado.

Para reducir los golpes de ariete puede instalarse una masa giratoria en las bombas o conectar depósitos de presión. Estas soluciones son, por lo general, preferibles económicamente comparadas con la reducción del SDR de la tubería, pero dependen de la longitud de la misma y de su diámetro.

Es preciso señalar que los golpes de ariete también pueden producirse durante el proceso de hundimiento de las tuberías de PE [12].

La magnitud del golpe de ariete se determina a partir de la relación general

$$\Delta p = \frac{\Delta v \cdot c}{g} \quad \text{A.3-23)}$$

La presión de golpe de ariete es función lineal de la velocidad de la onda de presión, c , del agua del interior de la tubería. Δv es el cambio en la velocidad del caudal de agua (aceleración/retardo) y $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. La velocidad de la onda de presión, c , viene dada por:

$$c = \sqrt{\frac{E_o}{(1 - \nu^2) \cdot \rho} \cdot \left[\frac{s}{D_m} \right]^{1/2}} \quad \text{A.3-24)}$$

E_o = módulo de elasticidad para cargas de corta duración, ver tabla A.1.2

ν = 0,4-0,5 = índice de Poisson

ρ = densidad del agua

s = espesor de la pared

D_m = $D_o - e$

Rescribiendo la ecuación, obtenemos una ecuación de c en función de la clase SDR de la tubería:

$$c = \sqrt{\frac{E_o}{(1 - \nu^2) \cdot \rho} \cdot \frac{1}{(SDR - 1)^{1/2}}} \quad \text{A.3-25)}$$

El golpe de ariete es una circunstancia de corta duración (pocos segundos) durante la que una tubería de PE sometida a un esfuerzo por cargas de larga duración constante, vuelve a su módulo elástico inicial en tiempo cero.

En la tabla A.3.3.1 hemos calculado la velocidad de la onda de presión para dos tuberías, PE100 y PE80, en función de la clase SDR.

Tubería de Polietileno	Velocidad de la onda de presión del agua en el interior de una tubería de PE, cm/seg.			
	SDR33 (PM322)	SDR26 (PN4)	SDR17,6 (PN6)	SDR11 (PN10)
PE100 $E_o = 1050\text{N/mm}^2$	203	230	282	263
PE100 $E_o = 1050\text{N/mm}^2$	180	200	250	320
$\nu = 0,45$				

Tabla A.3.3.1 Velocidad de la onda de presión para PE

En la práctica, Δv en A.3-23) puede ser positivo o negativo:

- positivo, causado por el cierre de una válvula situada en el extremo de una línea de transmisión o por la puesta en marcha de una bomba

- negativo, causado por un fallo en una bomba o por un cambio brusco y repentino de las condiciones hidráulicas que reducen el caudal y la velocidad.

Ejemplo 10

Hallar la magnitud del golpe de ariete para una tubería PE100 de clase SDR 17,6 si el cambio de la velocidad del agua es 0,15 m/s (disminución).

Solución:

De la tabla A.3.3.1 obtenemos $c = 282$ m/s

Aplicando la fórmula A.3-23):

$$\Delta p = \frac{-0,15 \cdot 282}{9,81} = -4,3 \text{ mwh} = -0,44 \text{ bar}$$

Se trata, pues, de una subpresión.

Este resultado deberá ser sumado al resto de cargas externas, para verificar el riesgo de pandeo.

Suponiendo que el tiempo necesario para cerrar una válvula, en condiciones normales de funcionamiento es de uno a dos minutos, el golpe de ariete máximo estaría en los límites de:

$\Delta p_{\text{max}} = 10\text{-}15\%$ más de la presión de régimen PN (bar) de la tubería.

Si el golpe de ariete se repite de forma regular durante la vida de servicio de la tubería puede causar roturas por fatiga. A modo general, una tubería de polietileno puede resistir 10^7 oscilaciones de amplitud $\pm 0,5$ x la presión nominal, sin que su vida de servicio se acorte.

La subpresión nunca dará lugar a fatiga, sólo a ovalización.

A.3.4 Tensiones térmicas

Si una tubería está expuesta a cambios de temperatura, tratará de ajustar su longitud para poder moverse libremente. El cambio de longitud, ΔL , puede expresarse de la siguiente manera:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \tag{A.3-26}$$

α = coeficiente de dilatación térmica ($\approx 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
 L_0 = longitud inicial en el momento de la instalación
 ΔT = cambio en la temperatura

Como puede verse, el cambio de longitud es independiente del diámetro y del espesor de la pared.

Ejemplo 11

¿Cuál será el acortamiento de una tubería de PE instalada en agua de mar a 4°C cuando su longitud era de 3000 m, a 20°C , en la fábrica en la que se construyó?

Solución:

Aplicaremos la fórmula A.3-26 y obtenemos: $\Delta L = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 \cdot (4-20)\text{m} = -9,6\text{m}$

Se han dado casos reales en los que tuberías subacuáticas han quedado demasiado cortas debido a los cambios de temperatura.

Si esto no se detecta a tiempo puede ocasionar problemas y costes adicionales. A la hora de determinar la longitud de una tubería, es preciso tener siempre en cuenta los cambios de temperatura antes de hacer un pedido.

Si el movimiento de la tubería está restringido, se producirán tensiones en la pared de la misma. El movimiento de una tubería puede evitarse con contrapesos de hormigón, bloques de anclaje o cubriendo las zanjas.

Si la tubería está totalmente fija, la tensión σ_T puede expresarse de la siguiente manera:

$$\sigma_T = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad \text{A.3-27)}$$

E = módulo de elasticidad (módulo de fluencia) (MPa)

Los valores positivos se consideran tensiones de tracción. Como se deduce de A.3-27, la tensión es independiente de la longitud y del diámetro de la tubería. La tensión se reducirá con el tiempo a medida que disminuye el módulo de elasticidad debido a la relajación del PE.

Ejemplo 12

Una tubería submarina se instala en invierno, cuando la temperatura del mar es de 4°C. En el verano, la temperatura puede alcanzar 20 °C. Se trata de una tubería PE100 SDR11 de 315mm de diámetro y puede considerarse totalmente fija mediante contrapesos de hormigón. Calcular la tensión debida a la temperatura el primer verano, suponiendo que $E=500$ Mpa. ¿Qué sucederá transcurridos 50 años?

Solución:

Aplicando la fórmula A.3-27): $\sigma_T = -500 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot (20-4) \text{MPa} = -1,6 \text{MPa}$

Se producirá una tensión de compresión, puesto que el signo es negativo. A los 50 años, el módulo E se habrá reducido a 200 MPa. Ver tabla A.1.2. Esto nos daría:

$$\sigma_{T,50} = -200 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot (20-4) \text{MPa} = -0,64 \text{MPa}$$

Las tensiones actúan en las direcciones longitudinales de la tubería y han de sumarse/restarse del resto de esfuerzos causados por la tensión interna, golpes de ariete y cobertura con tierra.

Hasta ahora hemos considerado un cambio de temperatura homogéneo en toda la tubería. Otra situación sería la existencia de una diferencia de temperatura en la pared de la tubería. El agua que fluye a través de la tubería puede estar a una temperatura distinta de la del agua del exterior.

En este caso pueden producirse tensiones adicionales, tanto de tracción como de compresión.

Las tensiones actuarán en dirección circunferencial.

Las tensiones máximas pueden calcularse a partir de la fórmula A.3-28):

$$\sigma_r = \frac{E \cdot \alpha \cdot (T_{\text{exterior}} - T_{\text{interior}})}{2} \quad \text{A.3-28)}$$

Un signo negativo indicará que se trata de tensiones de compresión, mientras que un signo positivo implica tensiones de tracción. Estas tensiones también sufrirán una relajación a medida que transcurre el tiempo.

Ejemplo 13

Calcular la tensión máxima en la dirección circunferencial si la temperatura del agua en el interior de la tubería es de 20 °C y la temperatura del agua en el exterior es de 4 °C? Suponer $E=800$ MPa y $\alpha = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ \text{C}^{-1}$.

Solución:

Aplicamos la fórmula A.3-28) y obtenemos:

$$\sigma_r = \frac{800 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot (4 - 20)}{2} \text{MPa} = -1,28 \text{MPa}$$

Se trata de una tensión de compresión.

A.3.5 Tensiones de flexión

Una tubería de PE, gracias a su flexibilidad, puede doblarse hasta un determinado grado de curvatura. No obstante, hay un radio mínimo que no puede sobrepasarse si quiere evitarse el pandeo.

Durante la flexión se producirán tensiones y deformaciones tanto en dirección longitudinal como radial. Cuando el radio de curvatura es demasiado pequeño, la tubería se pandeará. Especialmente durante el proceso de hundimiento de una tubería subacuática, es necesario asegurarse de que el radio de curvatura es mayor que el radio crítico de pandeo.

Durante la instalación, el equilibrio entre fuerzas - peso de los bloques de hormigón, fuerzas originadas por los barcos, fuerzas hidráulicas, fuerzas de las corrientes y el oleaje u otras fuerzas – define la configuración y la curvatura máxima.

Cuando una tubería se dobla hasta una curvatura de radio R en la dirección axial, se producirá una deformación ϵ_a en la pared de la tubería. Esta deformación puede expresarse de la siguiente manera:

$$\epsilon_a = \frac{r}{R} = \frac{D}{2.R} \quad \text{A.3-29}$$

- r = radio de la tubería
- R = radio de curvatura
- D = diámetro exterior de la tubería

Se ilustra un ejemplo en la Fig. A.3.5.1

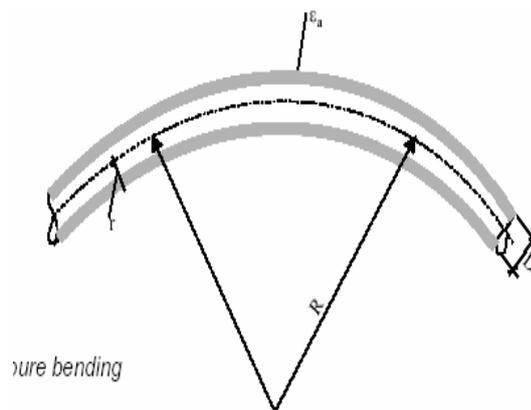


Fig. A.3.5.1 Tubería de PE bajo flexión pura

Para doblar esta tubería hasta un radio R debe estar sometida a un momento externo originado por las fuerzas mencionadas. El momento (M) puede expresarse;

$$M = \frac{E.I}{R} \quad \text{A.3-30}$$

E = módulo de elasticidad (módulo de fluencia)

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) \quad \text{(momento de inercia)} \quad \text{A.3-31}$$

D = diámetro exterior

d = diámetro interior

La tensión máxima en la pared de la tubería puede calcularse con la ley de Hook (ver. A.3-14):

$$\sigma_a = E \cdot \epsilon_a = E \cdot \frac{r}{R} = E \cdot \frac{D}{2.R} \quad \text{A.3-32}$$

La tensión es tracción en la curva exterior y compresión en la interior. El valor de la tensión disminuirá con el tiempo debido a la relajación del polietileno.

Introducimos la relación $\frac{R}{D} = a$.

Las fórmulas A.3-29) y A.3-32) pueden re-escribirse de la siguiente manera:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2.a} \quad \text{A.3-33)}$$

$$\sigma_a = \frac{E}{2.a} \quad \text{A.3-34)}$$

Nótese que la tensión y la deformación en la dirección longitudinal son independientes de la clase SDR de la tubería.

Ejemplo 14

Calcular la tensión de tracción máxima en una tubería PE100 de 1200 mm de diámetro flexionada hasta un radio de 30.D durante su proceso de hundimiento. Asumir un módulo elástico de 700 MPa.

Solución:

Primero determinamos el radio de curvatura: $R = 30 \cdot 1,2 \text{ m} = 36 \text{ m}$.

La tensión se calcula, por ejemplo, a partir de la fórmula A.3-32):

$$\sigma_a = 700 \cdot \frac{1,2}{2,36} \text{ MPa} = 11,71 \text{ MPa}$$

Si consultamos la tabla A.1.2, encontramos que la tensión de reventón para cargas de corta duración es 15 MPa.

El coeficiente de seguridad contra roturas es $F = 15/11,7 = 1,3$

A efectos prácticos, un radio de curvatura de 30 . D puede considerarse el radio mínimo para una tubería de PE durante su hundimiento (SDR<26).

Como hemos visto, las tensiones de flexión pueden ser importantes.

Cuando una tubería está instalada permanentemente en una curva, a lo largo de toda su vida de servicio, estas tensiones pueden contribuir a una reducción en la presión permisible.

A groso modo, en situaciones con cargas combinadas, por ejemplo, cargas por presión, por temperaturas, oleaje, etc. recomendamos:

$$R_{\min} = 60 \cdot D$$

Tal como se ha mencionado anteriormente, la relajación del PE reducirá las tensiones debido a una flexión superior a la reducción de la tensión de reventón para el material. Así pues, el coeficiente de seguridad aumentará con el paso del tiempo.

A.3.5.1 Pandeo de las tuberías de PE durante la flexión

Cuando una tubería sobre una flexión continuada, más tarde o más temprano acabará sufriendo pandeo. Teóricamente hay dos casos posibles:

- pandeo axial
- pandeo radial

Para tuberías subacuáticas, la deformación por pandeo radial será crítica a nos ser que la presión interna sea importante [12].

La deformación crítica para el pandeo radial en el estado de flexión pura puede expresarse de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{crit,r} = 0,28 \cdot \left[\frac{s}{D_m} \right] \quad \text{A.3-35)}$$

La relación entre la deformación axial y la radial viene dada por el índice de Poisson:

$$\varepsilon_r = \nu \cdot \varepsilon_a \quad \text{A.3-36)}$$

Si elegimos un valor de 0,50 para ν e introducimos A.3-36) en A.3-35) podemos obtener la deformación crítica en la dirección axial:

$$\varepsilon_{crit,r} = \frac{0,28}{\nu} \cdot \left[\frac{s}{D_m} \right] = \frac{0,56}{SDR - 1} \quad \text{A.3-37)}$$

SDR = D/s
D_m = diámetro medio
s = espesor de pared

Si combinamos A.3-37) y A.3-33) podemos determinar la relación de flexión crítica para una tubería de PE en la dirección axial:

$$a_{crit} = \frac{SDR - 1}{1,12} = 0,89(SDR - 1) \quad \text{A.3-38)}$$

Para estos cálculos es normal introducir el coeficiente de seguridad F = 1,5.

Por tanto, la relación de flexión permisible sería:

$$a_{permisible,F=1,5} = \frac{R}{D} = 1,34 \cdot (SDR - 1) \quad \text{A.3-39)}$$

Ejemplo 15

Confeccionar una tabla con la relación de flexión permisible (R/D) para las clases SDR 33, 36,22, 17, 11 y 9, suponiendo un coeficiente de seguridad de 1,5.

Solución:

Aplicamos la fórmula A.3-39) y obtenemos la tabla A.3.5.1.1. siguiente:

Clase SDR	Relación de flexión permisible R/D – F=1,5
33	44
26	34
22	36
17	21
11	13
9	11

Tabla A.3.5.1.1. Relación de flexión permisible durante el hundimiento

Si la tubería está expuesta a presión interna durante la flexión, el ovalamiento se reducirá y el valor de la deformación crítica aumentará.

La Fig. A.3.5.1.2 muestra el efecto sobre una tubería con sobrepresión interna de 1 bar, para las clases SDR 26, 17,6 y 11.

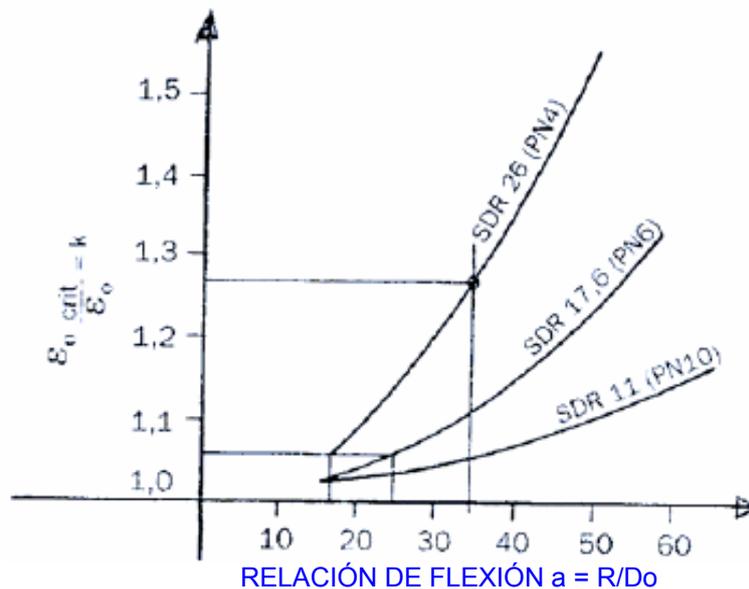


Fig. A.3.5.1.2 Aumento de la deformación permisible debido a una presión interna de 1bar.

La Fig. A.3.5.1.2 indica que la presión interna tiene un efecto estabilizador significativo sobre la clase SDR 26 (27%). Para una tubería de PE clase SDR11 o inferiores, el efecto estabilizador de la sobrepresión interna es casi insignificante.

Ejemplo 16

¿Cuál es la relación de flexión permisible (R/D) para una tubería SDR26 si está sometida a una presión interna de 1 bar durante el proceso de hundimiento? Suponer un coeficiente de seguridad de 1,5.

Solución:

En la tabla A.3.5.1.1. del ejemplo 15 encontramos la relación de flexión de la tubería sin presión interna, $a = 34$. Puesto que la relación de flexión está en relación inversa a la deformación permisible (ver. fórmulas A.3-37 y A.3-38)), aplicando la fig. A.3.5.1.1 obtenemos:

$$K = 1,27 \quad a_{p=1bar} = \frac{34}{1,27} = 27$$

Como puede observarse, la relación de flexión ha descendido de 35 a 28. Si la tubería hubiera tenido un diámetro de 100mm, el radio de curvatura habría disminuido de 35m a 28m.

Para tuberías de baja presión (\leq PN4) la presión interna significará un incremento del coeficiente de seguridad frente a las deformaciones por pandeo.

A.3.6 Otras tensiones

Hasta la fecha, hemos estudiado las tensiones causadas por:

- presión interna
- presión externa (agua y tierra)
- golpes de ariete
- flexión

No obstante, hay otras fuerzas que pueden actuar sobre una tubería subacuática, por ejemplo:

- cargas concentradas cuando la tubería está descansado sobre roca o piedra
- peso de las tuberías suspendidas
- fuerzas debidas a las corrientes
- fuerzas debidas al oleaje

A.3.6.1 Fuerzas debidas a las corrientes y al oleaje

En el siguiente capítulo se estudiarán las fuerzas debidas a las corrientes y al oleaje para el diseño de los contrapesos de hormigón. Estos elementos causarán fuerzas de resistencia al avance y de sustentación. Para una tubería tendida de forma estable sobre el fondo marino, puede considerarse que las fuerzas están uniformemente distribuidas a lo largo del tramo de la tubería entre los soportes (contrapesos de hormigón), pero limitado por la longitud de cresta de las olas.

La magnitud de estas fuerzas puede describirse a grosso modo mediante la fórmula:

$$f = C.D.\rho.\frac{v^2}{2} \quad \text{A.3-40)}$$

f = fuerza por metro de tubería

C = Coeficiente

D = diámetro externo

ρ = densidad del agua circundante

v = velocidad del agua circundante, vertical con respecto al eje de la tubería

En el caso de fuerzas de oleaje, también hemos de considerar las fuerzas de inercia, especialmente cuando se trata de grandes diámetros (ver capítulo A.4-6).

Ejemplo 17

Hacer un cálculo aproximado de la magnitud de las fuerzas de corriente y oleaje suponiendo una velocidad combinada máxima de 3 m/s y un coeficiente C=1,0. El diámetro de la tubería es 1,0 m y $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$.

Solución:

Aplicamos la fórmula A.3-40): $f = 1 \cdot 1 \cdot 1025 \cdot 3^2/2 \text{ N/m} = 4612 \text{ N/m} = 4,6 \text{ kN/m}$

Esto indica que estas fuerzas pueden ser importantes y deben ser tenidas en cuenta a la hora de decidir el coeficiente de diseño del proyecto.

Si la tubería del ejemplo 17 fuera de clase SDR 22, la masa unitaria es 140 kg/m \approx 1,4 KN/m en aire. En este caso, las fuerzas de la corriente y el oleaje son aproximadamente 3,3 veces el peso unitario de la tubería.

Para clases SDR superiores, esta proporción puede ser de 6 y para clases SDR inferiores puede llegar a 2,5.

Es preciso resaltar que el ejemplo de arriba constituye únicamente una indicación de la magnitud máxima de las fuerzas de la corriente y oleaje. Para un diseño correcto es necesario llevar a cabo unos cálculos completos. También es importante indicar que las fuerzas de oleaje disminuyen significativamente al aumentar la profundidad del agua.

Una vez conocida la fuerza uniforme por unidad de longitud de la tubería, podremos calcular las tensiones aplicando una serie de fórmulas bien conocidas correspondientes al análisis estático de vigas.

Si elegimos, por ejemplo, la fórmula para el caso de una viga fija, obtenemos:

$$\sigma_{\max} = \frac{4.f.l^2.D}{3.\pi.(D^4 - d^4)} \quad \text{A.3-41)}$$

f = fuerza por unidad de longitud

l = distancia entre soportes

D = diámetro externo

d = diámetro interno

Retomando el ejemplo 17 y asumiendo que SDR = 22 y l = 10m, obtenemos:

$$\sigma_{\max} = \frac{4,4,6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 \cdot 1}{3,3,14 \cdot (1^4 - 0,909^4)} \text{MPa} = 0,60 \text{MPa}$$

Comparado con una tensión de diseño de, por ejemplo, 5 MPa, esta tensión sería un 12%. Si la tubería fuera de una clase SDR 33, el porcentaje correspondiente llegaría a 17,5%

A.3.6.2 Tuberías suspendidas

Si volvemos al caso de una tubería suspendida, la situación sería bastante similar a lo que hemos visto respecto a la distribución uniforme de la carga relativa a las fuerzas de corrientes y oleaje. En este caso tenemos una componente más de la fuerza que procede los contrapesos de hormigón a lo largo de la longitud, l, entre soportes. Esto significa que las tensiones de la tubería también aumentarán. Estas situaciones pueden ser el caso en terrenos subacuáticos especialmente duros. Hay varios ejemplos en Noruega.

Si tomamos el ejemplo 17 y suponemos un porcentaje de carga igual al 30% del desplazamiento, el peso por unidad de longitud de los contrapesos de hormigón será de 2,4 kN/m. Esto representa casi el 50% de las fuerzas de las corrientes y oleaje.

No obstante, la componente correspondiente a la corriente actuará principalmente en la dirección horizontal en el caso de tuberías suspendidas, mientras que los contrapesos de hormigón actuarán en la dirección vertical. Las componentes de la fuerza del oleaje actuarán en todas las direcciones.

$$f_{\max} = \sqrt{(4,6,1/3)^2 + (0,5,4,6 + 4,6,1/3)^2} \text{ kN / m} = 5,6 \text{ kN / m}$$

Si introducimos este resultado en la fórmula A.3-41) obtendremos una tensión máxima de 0,73 MPa para una longitud de 10m. Si podemos admitir una tensión en la dirección longitudinal de, pongamos por caso, 2Mpa, la longitud máxima en este caso sería:

$$L_{\max} = 2/0,73 \times 10\text{m} = 27 \text{ m}$$

Este ejemplo pone de manifiesto que es importante dedicar esfuerzo a determinar el trazado y ubicación óptimos de una tubería subacuática.

A.3.6.3 Cargas concentradas

En los casos en que la tubería descansa sobre roca o sobre piedra, se producirán tensiones adicionales. La magnitud de las mismas dependerá principalmente de:

- o el número de contrapesos de hormigón suspendidos a ambos lados del punto de ataque
- o superficie del punto de ataque

Resulta aconsejable aliviar las cargas concentradas colocando material protector adicional entre la tubería y la roca/piedra.

La magnitud de la tensión causada por las cargas concentradas puede calcularse aproximadamente a partir de la fórmula siguiente:

$$\sigma_{con} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot s^2} \tag{A.3-42}$$

P = carga concentrada total

S = espesor de la pared

Como norma general recomendamos evitar el contacto con piedras. No obstante, en muchos casos, esta situación ideal es imposible sin que suponga unos costes enormes.

Ejemplo 18

Tenemos una tubería PE80 clase SDR 17,6, de 1000 mm de diámetro que descansa sobre piedra de tal modo que hay dos contrapesos de hormigón suspendidos a cada lado de la piedra. El peso en el agua de cada uno de los contrapesos es 14 kN. Calcular la tensión máxima en la pared de la tubería debida a la carga concentrada.

Solución:

En primer lugar calculamos el espesor de la pared: $s = 1000/17,6\text{mm} = 56,8\text{mm}$

A continuación aplicamos la formula: A.3-42) y obtenemos, suponiendo que 2 de los contrapesos contribuyen a la carga concentrada, lo siguiente:

$$\sigma_{con} = \frac{3.2.14.10^{-3}}{2.3.14.0,0568^2} MPa = 4,2MPa$$

Como puede verse, esta tensión puede ser importante y puede acortar la vida útil de la tubería.

El trazado de la tubería deberá desplazarse lateralmente hasta una ubicación mejor o bien se deberá colocar material de protección del suficiente grosor entre la piedra y la tubería.

A.3.7 Cargas combinadas

En el capítulo A.3 hemos considerado distintos tipos de fuerzas que pueden actuar sobre las tuberías subacuáticas en servicio.

Estas fuerzas crean tensiones y deformaciones en la pared de las tuberías. Algunas de las tensiones son de compresión y otras de tracción. Algunas actúan en dirección longitudinal y otras en dirección circunferencial. En algunas situaciones pueden darse también esfuerzos cortantes, que no trataremos en este catálogo técnico.

Para las tuberías subacuáticas, el esfuerzo cortante no es un elemento crítico.

Una vez calculadas todas las tensiones reales (ver A.31 a A.3.6), se suman las que actúan en dirección circunferencial y las que actúan en dirección longitudinal. Las tensiones de tracción tienen signo positivo y las de compresión, negativo.

$$\sigma_h = \sum_{i=1}^n \sigma_{i,h} \quad \text{A.3-43)}$$

$$\sigma_l = \sum_{i=1}^n \sigma_{i,l} \quad \text{A.3-44)}$$

σ_h = tensión total en dirección circunferencial

$\sigma_{i,h}$ = tensión nº i en dirección circunferencial

σ_l = tensión total en dirección longitudinal

$\sigma_{i,l}$ = tensión nº i en dirección longitudinal

Para hallar la tensión de combinación/comparación (σ_{comp}) utilizamos los criterios de Von Mises:

$$\sigma_{comp} = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_l^2 - \sigma_h \cdot \sigma_l} \quad \text{A.3-45)}$$

Puesto que la fórmula expresa una combinación de tensiones de compresión en una dirección y de tensiones de tracción en la otra se trata de una situación más crítica que si se tratase sólo de tensiones de tracción en ambas direcciones, o de tensiones de compresión en ambas direcciones.

Ejemplo 19

Calcular la tensión de comparación en una situación en la que la tensión total en dirección circunferencial es 4 MPa y en la dirección longitudinal es -2,5 MPa (compresión), para una tubería PE80.

Solución:

Aplicamos la fórmula A.3-45):

$$\sigma_{comp} = \sqrt{4_h^2 + (-2,5)^2} - 4 \cdot (-2,5) MPa = 5,7 MPa$$

Esta tensión de comparación deberá compararse con la tensión permisible para el PE (ver tabla A.1.1.).

Vemos que incluso si los valores de σ_l y σ_h son inferiores a la tensión de proyecto, 5,0Mpa, la tensión de comparación sobrepasa los 5,0 MPa.

Este es un motivo para incluir todas las tensiones pertinentes a la hora de realizar el diseño, especialmente cuando se manejan coeficientes de diseño bajos (ej. C = 1,25).

Tal como hemos mencionado anteriormente en este catálogo (p.ej. en el capítulo A.1, A.3.1.2) el material de polietileno sufrirá un proceso de relajación y de fluencia. Esto significa que las tensiones y las deformaciones debidas a determinadas situaciones de carga serán función del tiempo. Por lo tanto, habremos de verificar tanto las situaciones a corto plazo como a largo plazo.

A.4 Diseño de carga mediante contrapesos de hormigón

Las tuberías submarinas de PE flotan debido a su flotabilidad si no se cargan con contrapesos de hormigón, ya que el peso específico del polietileno es inferior al del agua que le rodea. El propósito de los contrapesos también es proporcionar estabilidad frente a:

- acumulaciones de aire y gas (aunque es preferible solucionar este problema mediante otros métodos)
- Fuerzas debidas a las corrientes
- Fuerzas debidas al oleaje

A.4.1 Grado de carga

Calcularemos la cantidad de carga dependiendo de las especificaciones técnicas del proyecto. Este grado de carga suele estar relacionado con el desplazamiento de la tubería:

$$A_D = \frac{W_{CM}}{D^2} \cdot 100\% \quad \text{A.4.1)}$$
$$\pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot \gamma_w$$

W_{cw} = peso de los contrapesos de hormigón en el agua, distribuido entre la tubería

D = diámetro exterior

γ = peso específico del agua circundante

Otra forma de describir el grado de carga es compararlo con la flotabilidad del volumen interno de la tubería. Esto se llama la tasa de llenado de aire y en Noruega es lo que se emplea casi siempre para describir el grado de carga:

$$a_a = \frac{W_{CM} + w_{tub.gua}}{d^2} \cdot 100\% \quad \text{A.4-2)}$$
$$\pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \gamma_w$$

$W_{tub,a}$ = peso de la tubería en agua (negativo)

d = diámetro interior

El grado de llenado de aire nos dice qué grado de volumen interno de la tubería ha de estar lleno de aire para que la tubería flote. Esta definición incluye también el peso de la tubería.

Es preciso señalar que una tasa de llenado de aire de, por ejemplo, un 30% no significa que debemos esperar que el 30% del volumen interno esté lleno de aire durante el funcionamiento, sino simplemente se trata de una forma práctica de describir el grado de carga.

La diferencia entre a_d y a_a no es tan grande. La Fig. A.4.1 nos da una indicación, basada en los siguientes supuestos:

P_{PE} =	950 kg/m ³	(densidad del PE)
P_C =	2400 kg/m ³	(densidad del hormigón)
$P_{w,sea}$ =	1025 kg/m ³	(densidad del agua marina)
P_w =	1000 kg/m ³	(densidad del agua dulce)

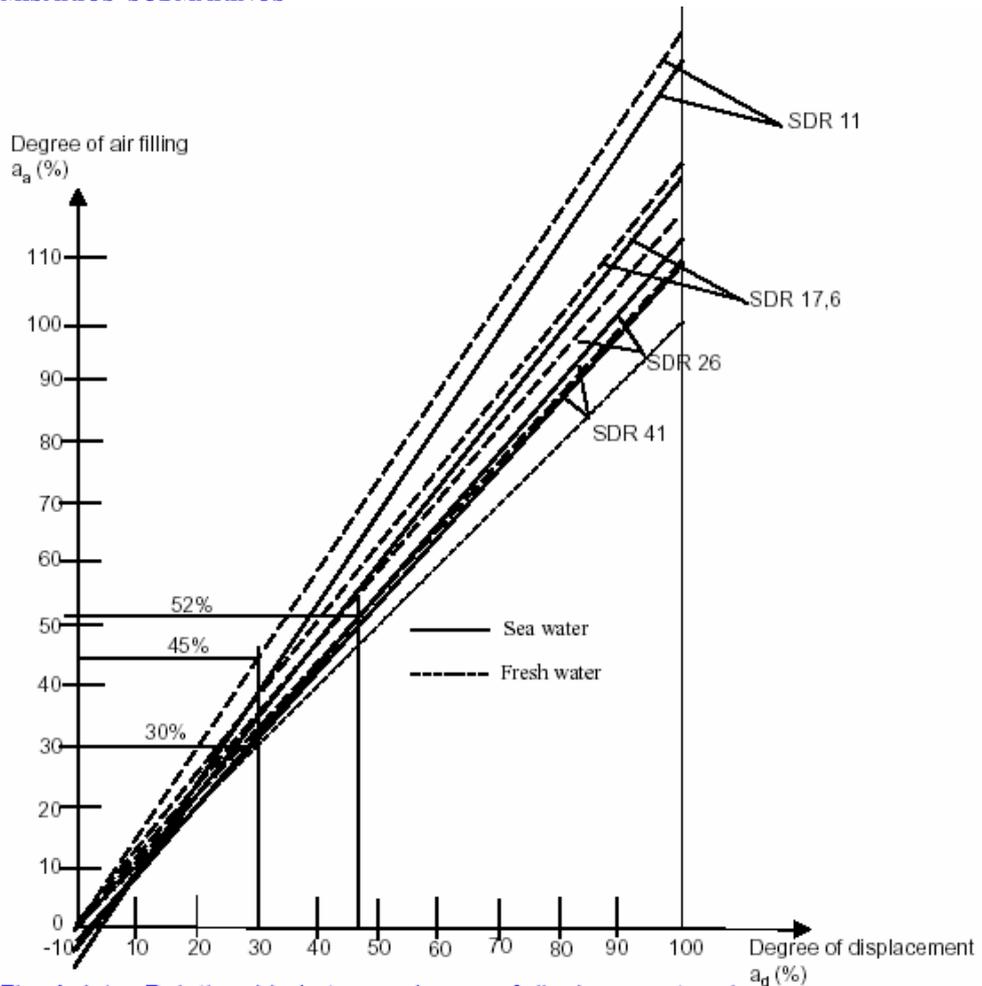


Fig. A.4.1 Relación entre el grado de desplazamiento y el grado de llenado de aire para determinar la carga con contrapesos de hormigón

Normalmente, hablaremos de tasas de llenado de aire entre 10 y 60%. Si una tubería es cargada de acuerdo a una tasa de llenado de aire del 30% significa que para obtener el equilibrio del sistema, el 30% del volumen interno de la tubería debe estar lleno de aire.

Puede ser útil conocer la relación entre el peso de un cuerpo en aire y en agua. Esto puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{w_w}{w_a} = \frac{\rho - \rho_w}{\rho} \quad \text{A.4.3)}$$

- w_w = peso en agua
- w_a = peso en aire
- ρ = densidad del cuerpo
- ρ_w = densidad del agua

Ejemplo 1

Una tubería PE80 SDR22 de 500mm de diámetro es lastrada con contrapesos de hormigón colocados a una distancia entre centros de 5 m. El peso en aire de cada contrapeso de hormigón es 5,6kN. El peso de la tubería en aire es 0,35 kN/m. Suponer $\rho_{PE} = 950 \text{ kg/m}^3$, $\rho_w = 1025 \text{ Kg/m}^3$ y $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$. Calcular la tasa de llenado de aire, a_a .

Solución:

En primer lugar hallamos el peso de los contrapesos de hormigón y de la tubería en el agua, utilizando A.4.3):

$$w_{cw} = 6,5 \cdot \frac{2400 - 1025}{2400} kN = 3,2 kN \quad (\text{una pieza})$$

$$w_{cw} = \frac{3,2}{5} kN / m = 0,64 kN / m \quad (\text{por metro de tubería})$$

$$w_{tub.a} = 0,35 \cdot \frac{950 - 1025}{950} kN / m = -0,28 kN / m$$

El diámetro interior de la tubería es:

$$d = (500 - \frac{2 \cdot 500}{22}) mm = 454,6 mm$$

A continuación aplicamos la fórmula A.4.2) para calcular el grado de llenado de aire:

$$a_a = \frac{(0,64 - 0,028) \cdot 100}{3,14 \cdot \frac{0,4546^2}{4} \cdot 1025 \cdot 9,81} \% = 37,5\%$$

El grado de desplazamiento correspondiente puede hallarse con ayuda de la fig. A.4.1, por interpolación entre SDR17,6 y SDR 26 para agua marina.

Esto nos da que: $a_d \approx 32\%$

Para todas las situaciones prácticas $a_a > a_d$

A.4.2 Tipos de contrapesos de hormigón

Dependiendo de su forma, hay tres tipos de contrapesos de hormigón:

- rectangulares
- circulares
- estrellados

En la fig. A.4.2.1 se muestra un esquema de estos tres tipos.



Fig. A.4.2.1 Distintos tipos de contrapesos de hormigón

Todos los contrapesos van empernados a la tubería. La fuerza de fijación deberá ser la suficiente para evitar su deslizamiento durante el hundimiento y el giro sobre el fondo marino. A título general, la fuerza de los pernos será unas 2-3 veces el peso del hormigón en aire.

Entre el contrapeso de hormigón y la pared de la tubería se colocará una banda de goma tipo EPDM o equivalente. En la mayoría de los casos, recomendamos también la colocación de compensadores de goma en los pernos para reducir las tensiones locales en la pared de la tubería causadas por presión interna.

Es evidente que los contrapesos mostrados en la Fig. A.4.2.1 tendrán un agarre distinto sobre el fondo marino cuando se sometan a la fuerza de las corrientes o del oleaje.

El contrapeso rectangular es el formato clásico. Presenta un buen rendimiento global y puede utilizarse en la gran mayoría de casos.

Los contrapesos circulares se utilizan en zanjas, en aguas tranquilas y en lugares donde se lleva a cabo pesca y anclaje.

Los contrapesos en forma de estrella pueden aplicarse con éxito en casos en los que el impacto de las olas y de las corrientes es importante. Su forma les da una estabilidad añadida.

A continuación enumeramos los coeficientes de fricción aproximados para los tres tipos de contrapesos de hormigón:

Tipo	Coefficiente de fricción
Rectangulares	0,5
Circulares	0,2
Estrellados	0,8

Tabla A.4.2.1 Coeficientes de fricción aproximados de los contrapesos de hormigón

A.4.3 Estabilidad de las tuberías de PE sobre el fondo marino

A continuación estableceremos una serie de fórmulas para comprobar la estabilidad de una tubería subacuática sometida a una acumulación de aire/gas y a fuerzas externas debidas a las corrientes y al oleaje. La situación se ilustra en la fig. A.4.3.1.

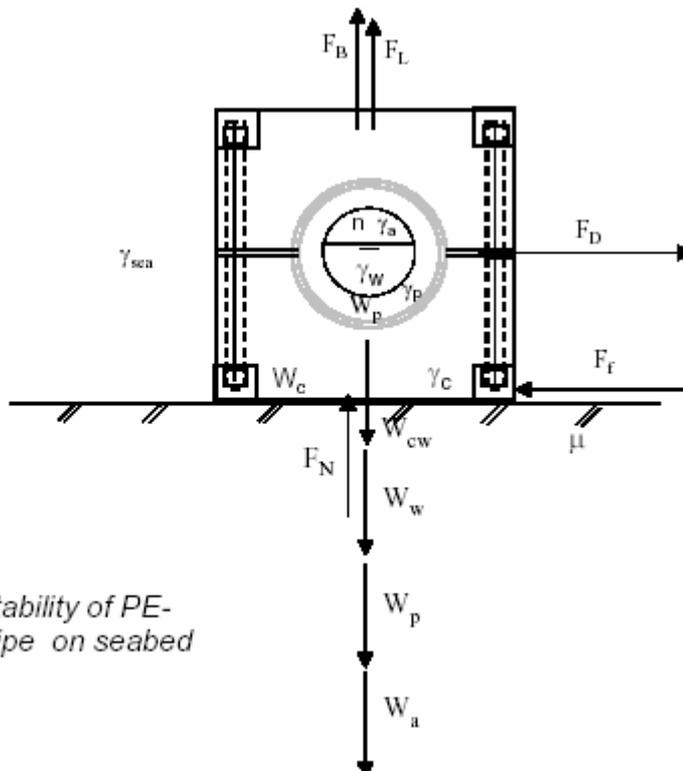


Fig. A.4.3.1 Stability of PE-pipe on seabed

Fig. A.4.3.º Estabilidad de una tubería de PE sobre el fondo marino

Supongamos que las fuerzas de las corrientes y del oleaje pueden descomponerse en una fuerza de resistencia al avance, F_D , en la dirección horizontal, y una fuerza de sustentación F_L , en dirección vertical, que actúan simultáneamente sobre la tubería. Para evitar el deslizamiento, estas dos fuerzas han de ser contrarrestadas por el peso del sistema y la fuerza de rozamiento entre los contrapesos de hormigón y el fondo marino.

El equilibrio de fuerzas verticales da:

$$F_N = w_{cw} + w_w + w_p + w_a - F_D - F_L \quad \text{A.4.4)}$$

F_N = fuerza normal contra el fondo marino
 w_{cw} = peso sumergido por m tubería de los contrapesos de hormigón
 w_w = peso en agua por m interior tubería
 w_p = peso de tubería por m en aire
 w_a = peso de aire/gas por m interior tubería
 F_D = flotabilidad de la tubería por m
 F_L = fuerza de sustentación

El equilibrio de fuerzas en la horizontal da : $F_f \geq F_D$ A.4.5)

Puesto que $F_f = \mu \cdot F_N$, obtenemos el criterio de estabilidad: $\mu \geq \frac{F_D}{F_N}$ A.4.6)

$$w_{cw} = w_{ca} - \frac{\gamma_c - \gamma_{sea}}{\gamma_c} \quad \text{A.4.7)}$$

w_{ca} = peso de los contrapesos de hormigón en aire por m de tubería
 γ_c = peso específico del hormigón
 γ_{sea} = peso específico del agua del mar

$$w_w = (1 - n) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \gamma_w \quad \text{A.4.8)}$$

n = cantidad de tramo lleno de aire ej. 30%, $n=0,3$
 d = diámetro interno
 γ_w = peso específico del agua del interior de la tubería

$$w_a = n \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \gamma_a \quad \text{A.4.9)}$$

γ_a = peso específico del aire del interior de la tubería
 w_a puede despreciarse en la mayoría de los casos.

$$F_B = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \gamma_{sea} \quad \text{A.4.10)}$$

D = diámetro externo de la tubería

Estas son las fórmulas a utilizar para verificar la estabilidad de la tubería sobre el fondo marino cuando se conocen la fuerza de resistencia al avance F_D y la fuerza de sustentación F_L . Para calcular F_D y F_L ver capítulo A.4.6.

Ejemplo 2

Una tubería PE100 SDR22 de 500 mm de diámetro está tendida sobre el fondo marino y sometida al ataque de corrientes y oleaje. La fuerza de resistencia al avance de diseño $F_D = 0,4 \text{ kN}$ y la fuerza de sustentación de diseño $F_L = 0,2 \text{ kN}$. El grado de acumulación de aire se calcula que es $n=0,15$. En la tubería hay un contrapeso de hormigón cada 3 m. El contrapeso de hormigón tiene un peso en aire de 5,6 kN. El peso de la tubería es de 0,345 kN/m.

Se supondrá un peso específico del hormigón de 23,5 kN/m³, un peso específico del agua marina de 10,05 kN/m³ y un peso específico de las aguas residuales de 10 kN/m³. El peso específico del aire/gas es despreciable. ¿Estará estable sobre el fondo marino?

Solución:

Para resolver el problema aplicaremos las fórmulas A.4.4) – A.4.10).

Primeramente calcularemos el peso de los contrapesos de hormigón por m de tubería en agua marina mediante la formula A.4.7):

$$w_{cw} = \frac{5,6}{3} \cdot \frac{23,5 - 10,05}{23,5} kN / m = 1,068 kN / m$$

A continuación aplicaremos la fórmula A.4.8) para obtener el peso del agua en el interior de la tubería, por metro:

$$w_w = (1 - 0,5) \cdot \frac{\pi \cdot 0,4546^2}{4} \cdot 10 k / N / m = 1,379 kN / m$$

La flotabilidad viene dada por la fórmula A.4.9):

$$F_B = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} \cdot 10,05 kN / m = 1,972 kN / m$$

La fuerza normal, F_N , se determina introduciendo estos valores en la fórmula A.4.4.):

$$F_N = (1,068 + 1,379 + 0,345 + 0 - 1,972 - 0,2) kN = 0,62 kN$$

El coeficiente de fricción mínimo se calcula a partir de A.4.6)

$$\mu_{\min} = \frac{0,4}{0,62} = 0,65$$

Para que el tubo no se deslice, el coeficiente de fricción entre los contrapesos de hormigón y el fondo marino debe ser superior a 0,65.

Si consultamos la tabla A.4.2.1, vemos que únicamente los contrapesos en forma de estrella podrán dar este coeficiente de fricción. La conclusión es pues que la tubería es estable sólo si los contrapesos de hormigón son del tipo estrellado. De lo contrario, la tubería se deslizará lateralmente.

Para conseguir que la tubería sea estable utilizando contrapesos rectangulares o circulares habremos de incrementar el peso de los contrapesos hasta 6,54 kN y 9,34 kN respectivamente. También es posible ajustar la distancia entre centro a 2,57 m y 1,8 m y mantener el peso inicial de los contrapesos. La tasa de llenado de aire correspondiente viene dada por la fórmula A.4.2):

$$\text{Contrapeso estrellado: } a_a = \frac{1,068 - 0,027}{\pi \frac{0,4546^2}{4} \cdot 10} \cdot 100\% = 64,2\%$$

$$\text{Contrapeso rectangular: } a_a = \frac{1,247 - 0,027}{\pi \frac{0,4546^2}{4} \cdot 10} \cdot 100\% = 75,2\%$$

$$\text{Contrapeso circular: } a_a = \frac{1,781 - 0,027}{\pi \frac{0,4546^2}{4} \cdot 10} \cdot 100\% = 108,1\%$$

Realmente no es posible la utilización de contrapesos circulares sin introducir elementos de flotabilidad temporalmente durante el proceso de hundimiento/instalación de la tubería.

A.4.4 “Tasa de llenado de aire” recomendada para tuberías subacuáticas

Tal como se ha mencionado anteriormente, el lastrado mediante contrapesos de hormigón de una tubería subacuática depende de lo siguiente:

- i) Flotabilidad del material de PE
- ii) Acumulación de aire/gas
- iii) Fuerzas debidas a las corrientes
- iv) Fuerzas debidas al oleaje
- v) Equipos de pesca

i) La flotabilidad de una tubería de PE depende del diámetro y de la clase SDR, pero normalmente estará en la gama de 0,3-2,5%, medida como “tasa de llenado de aire”, a_a

ii) La cantidad de aire/gas que se acumulará en una tubería submarina depende del diseño del proyecto y normalmente, debe ser calculada con exactitud. Especialmente en el caso de emisarios, la acumulación de aire/gas puede ser un problema. La topografía del trazado es crítica. Generalmente, aconsejaremos una “tasa de llenado de aire” según la tabla A.4.4.1 que damos a continuación:

Tipo de tubería	Tipo de transporte/topografía		
	Gravedad	Bombeo	Puntos elevados grandes
Agua potable	10%	15%	20%
Aguas residuales	25%	30%	50%

Tabla A.4.4.1 Guía de “tasas de llenado de aire” para tuberías subacuáticas con respecto a la acumulación de aire/gas

iii) Las fuerzas debidas a las corrientes pueden ser significativas en el caso de tuberías subacuáticas instaladas directamente sobre el fondo, especialmente de ríos. Si las fuerzas son demasiado grandes, la tubería deberá enterrarse en una zanja. Deben llevarse a cabo cálculos de estabilidad (ver A.4.3) para cada proyecto. Generalmente, en los ríos, las tuberías deben enterrarse especialmente cuando cruzan la dirección de la corriente. En el mar y en lagos, a menudo será suficiente con aumentar la “tasa de llenado de aire” en un 10% para conseguir la estabilidad. Esta cantidad extra debe sumarse a los valores de i) y ii).

iv) Las fuerzas debidas al oleaje deben calcularse aparte. Generalmente aconsejamos enterrar la tubería a la profundidad de agua donde rompen las olas. Normalmente esto implica 10-15m de profundidad en las zonas expuestas. Además, recomendamos una “tasa de llenado de aire” total de 70-30%, dependiendo de las características del proyecto. Esta carga se mantiene a una profundidad correspondiente a la mitad de la longitud de onda de la onda de diseño. Para aguas más profundas son aplicables las reglas generales dadas en i) y ii).

Puede aceptarse un pequeño desplazamiento de la tubería sobre el fondo marino cuando pasan las olas.

La experiencia nos demuestra que la tubería se moverá de forma limitada si se ha calculado correctamente la “tasa de llenado de aire”. En estos casos se deben utilizar siempre los contrapesos en forma de estrella. Los movimientos de la tubería son, en realidad, de rotación y de deslizamiento. Para realizar estos cálculos es necesario utilizar potentes programas informáticos.

v) No es normal diseñar la “tasa de llenado de aire” de modo que incluya la influencia de los equipos de pesca como redes normales y redes de arrastre. No obstante, los contrapesos de hormigón pueden diseñarse para evitar que dichos equipos de pesca se enganchen en la tubería. En estos casos se emplearán contrapesos circulares.

Resumiendo, podemos establecer que el grado de carga para tuberías subacuáticas de PE se corresponderá con una “tasa de llenado de aire” de entre 15-60%.

En algunos casos puede ser económicamente favorable asegurar la tubería frente a subpresiones (ver A.3.2.1) reduciendo la distancia entre centros de los contrapesos de hormigón. En estos casos, la “tasa de llenado de aire” será superior a la indicada arriba.

Ejemplo 3

Una tubería de vertido por gravedad PE80 clase SDR22 de 500 mm de diámetro debe ser instalada como emisario en un lago. En el trazado hay un punto alto importante. Podemos despreciar las fuerzas por corriente y oleaje. Diseñar la “tasa de llenado de aire”

Solución:

Pasaremos por los puntos i), ii), iii), iv) y v):

- i) $a_{ai} = 2,5 \%$ (suponer el valor más alto – puede calcularse)
- ii) De la tabla A.4.4.1 tomamos los valores correspondientes a:
 - tubería de aguas residuales
 - Puntos altos importantes $\rightarrow a_{a_{ii}} = 50\%$
- iii)
- iv) no aporta nada
- v)

Resultado global : $a_a = 52,5\%$

Es preciso señalar que esta “tasa de llenado de aire” sólo es representativa en la zona del punto alto. Generalmente sería más adecuado un valor de $a_a = 27,5\%$.

A.4.5 Fuerzas debidas a corrientes

Los cálculos de las fuerzas de las corrientes que actúan sobre una tubería pueden ser complicados. En el siguiente capítulo trataremos un método simplificado para calcular estas fuerzas a groso modo. Para conseguir unos cálculos concisos es necesario contactar con expertos en este campo.

Cuando una corriente ataca una tubería, ésta estará sometida a una fuerza. La fuerza puede dividirse en dos componentes: una fuerza de resistencia al avance F_D y una fuerza de sustentación F_L , ver fig. A.4.5.1.

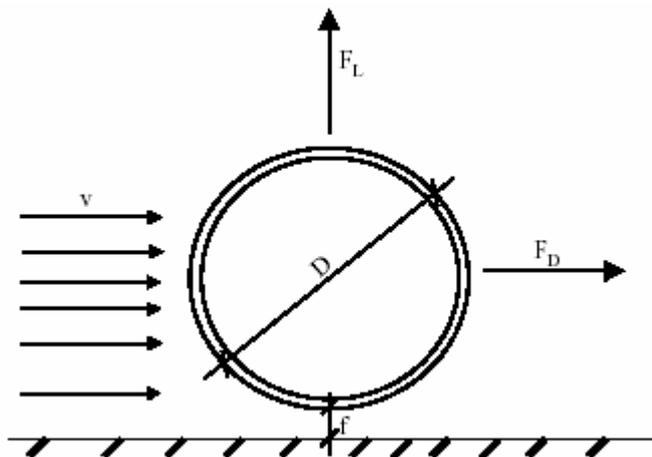


Fig. A.4.5.1 Fuerzas debidas a la corriente que actúan sobre una tubería

La magnitud de las fuerzas depende principalmente de:

- la velocidad de la corriente (v)
- el diámetro de la tubería (D)
- la densidad del agua que forma la corriente (ρ)
- distancia de la tubería al fondo marino (f)

Las fuerzas pueden expresarse matemáticamente de la siguiente manera:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot D \quad \text{A.4-10)}$$

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot D \quad \text{A.4-11)}$$

C_D = coeficiente de resistencia al avance

C_L = coeficiente de sustentación

ρ = densidad del agua de la corriente (kg/m³)

v = velocidad de la corriente (m/s)

D = diámetro externo de la tubería (m)

F_D = fuerza de resistencia al avance

F_L = fuerza de sustentación

Los coeficientes F_D y F_L en principio dependen del número Reynolds y de la rugosidad del fondo.

El número Reynolds (ver A.2-1) puede expresarse:

$$R_e = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad \text{A.4.12)}$$

Normalmente, los coeficientes variarán entre 0,5 – 1,2. Los valores para una tubería tendida sobre el fondo marino pueden obtenerse de las figs. A.4.5.2 y A.4.5.3.

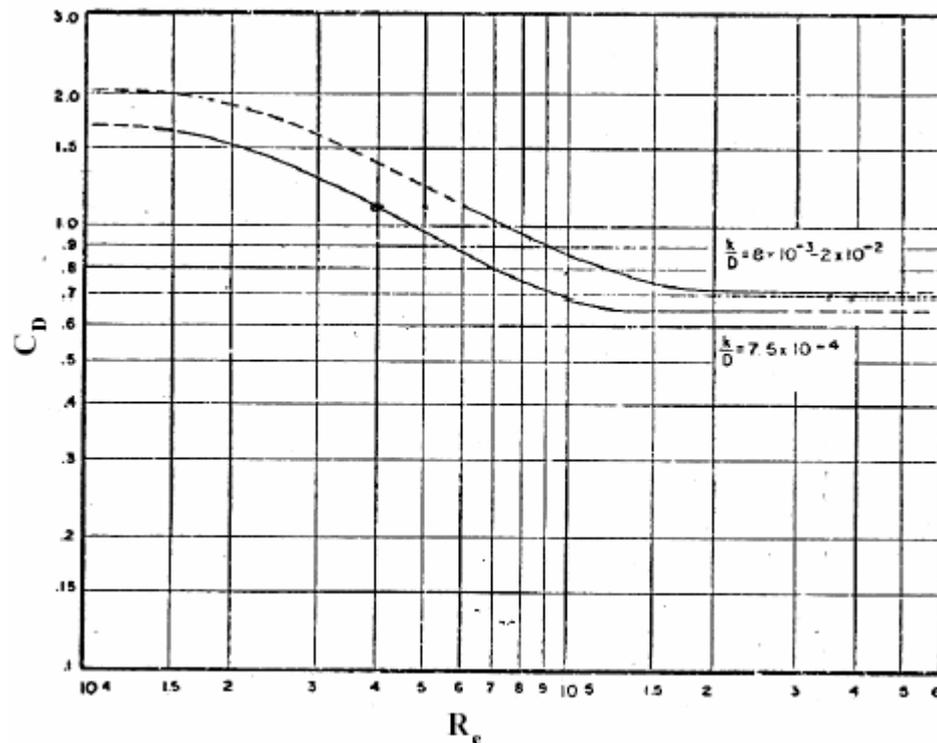


Fig. A.4.5.2 Coeficiente de resistencia al avance C_D

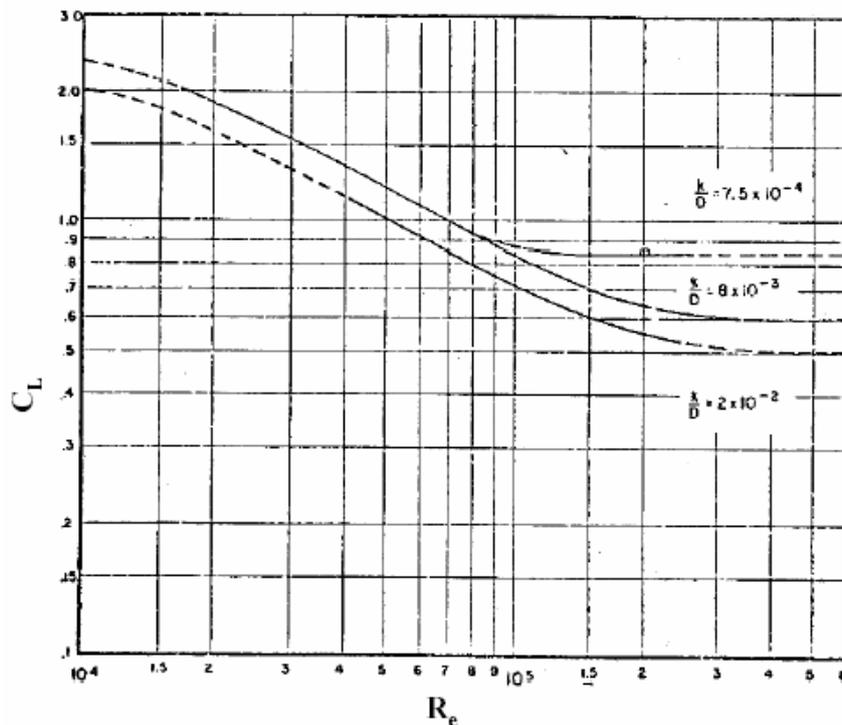


Fig. A.4.5.3 Coeficiente de sustentación, C_L

La fuerza de sustentación disminuirá a medida que aumenta la distancia (f) entre la tubería y el fondo. Si $f=0,5 D$ la fuerza de sustentación será aproximadamente el 10% de la fuerza de sustentación de una tubería que reposa directamente sobre el fondo. Este es un detalle esencial a la hora de diseñar los contrapesos de hormigón.

Ejemplo 4

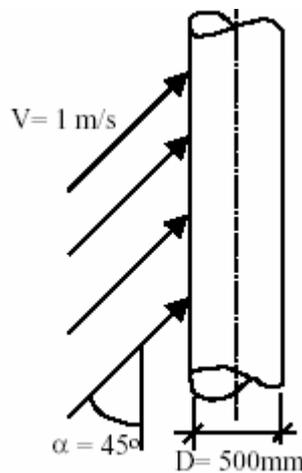
Una corriente ataca una tubería a un ángulo de 45° de la línea central, tal como se ilustra en la figura de la derecha.

El diámetro de la tubería es 500 mm, la densidad del agua 1000 kg/m³. Supóngase que $C_L = 0,20$ y $C_D = 1,0$.

Calcular la fuerza de resistencia al avance y la fuerza de sustentación.

Solución:

La componente de la velocidad perpendicular a la tubería puede expresarse como:



$$V_N = v \cdot \text{sen } \alpha \tag{A.4-13}$$

Si insertamos esta expresión en A.4-10) y A.4-11), obtenemos:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \text{sen}^2 \alpha \cdot D \tag{A.4-14}$$

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \text{sen}^2 \alpha \cdot D \tag{A.4-15}$$

Introduciendo los valores del ejemplo 4, obtenemos:

$$F_D = 1,0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 1^2 \cdot \text{sen}^2 45 \cdot 0,5 \text{ N / m} = 125 \text{ N}$$

$$F_L = 0,2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 1^2 \cdot \text{sen}^2 45 \cdot 0,5 \text{ N / m} = 25 \text{ N}$$

Como podemos ver, las fuerzas disminuyen significativamente si el ángulo de ataque α es pequeño. Por lo tanto, es buena idea evitar que la corriente discorra perpendicular a la tubería.

Por último, hemos de mencionar que las fórmulas A.4.14) y A.4.15) deben de corregirse teniendo en cuenta la forma y la superficie de los contrapesos de hormigón, si se realizan los cálculos completos. En este caso, podemos introducir un "coeficiente umbral" k . Normalmente, k tendrá un valor entre 1,0 y 1,5. Esto significa que las fuerzas calculadas en el ejemplo 4 pueden ser un 50% más altas si se tienen en cuenta los contrapesos de hormigón, dependiendo de su forma, dimensión y distancia entre centros.

A.4.6 Fuerzas debidas al oleaje

Las olas ejercerán grandes fuerzas sobre una tubería subacuática instalada directamente sobre le fondo marino.

Los factores principales son:

- altura de la ola
- periodo de la ola
- diámetro de la tubería
- distancia entre la tubería y el fondo marino
- ángulo entre la tubería y la dirección de desplazamiento de la ola
- profundidad del agua
- condiciones del fondo

Las olas, al aproximarse a la costa, estarán influenciadas por las condiciones del fondo y tarde o temprano llegan a una profundidad en la que rompen.

Una ola, al romper, libera gran cantidad de energía que puede dañar la estructura de la tubería.

Una buena norma es: "enterrar la tubería hasta una profundidad igual o superior a la profundidad a la que rompe la ola de diseño"

En la práctica, esto significa una profundidad de 5-15 m, dependiendo de las condiciones locales de la instalación.

La descripción del oleaje y las fuerzas debidas al mismo implica fórmulas muy complicadas. Hay varias teorías, pero una característica común es la división de las componentes de la fuerza en 3 elementos:

- fuerza de resistencia al avance
- fuerza de sustentación
- fuerza de inercia

El movimiento de las partículas de agua en una ola describe órbitas circulares o elípticas, tal como se ilustra en la fig. A.4.6.1.

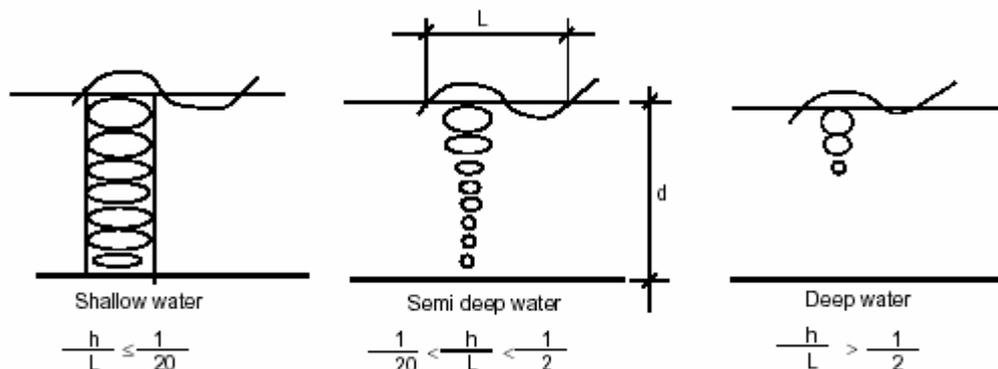


Fig. A.4.6.1 Movimiento de las partículas en una ola

Tal como se muestra en la fig. A-4-6-1, las órbitas de las partículas en aguas profundas son circulares. La profundidad es tan grande que el movimiento de la ola no “toca el fondo”.

Aguas profundas se definen como aquellas con una profundidad (h) superior a la mitad de la longitud de la ola en la superficie ($h > L/2$).

Las fuerzas de oleaje no afectarán nunca a las tuberías instaladas en aguas profundas. En aguas semiprofundas, ($L/20 < h < L/2$) las fuerzas pueden ser importantes cuando llegan a los valores extremos cercanos a aguas poco profundas ($h > L/20$).

Puesto que las partículas de la ola se mueven continuamente en el tiempo, las fuerzas debidas al oleaje cambiarán, tanto en dirección como en magnitud. En un momento determinado, las fuerzas que actúan en una dirección afectarán a un tramo de la tubería mientras que otro tramo estará expuesto a fuerzas que actúan en dirección contraria.

Para verificar la estabilidad de la tubería es suficiente con saber los valores extremos de las fuerzas. Estas pueden calcularse con las siguientes fórmulas:

$$F_i = \pi \cdot C_i \cdot f \cdot \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_o}{L_o} \quad \text{A.4-16)}$$

$$F_D = C_D \cdot f^2 \cdot \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_o}{L_o} \cdot \frac{H_o}{D} \quad \text{A.4-17)}$$

$$F_L = C_L \cdot f^2 \cdot \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_o}{L_o} \cdot \frac{H_o}{D} \quad \text{A.4-18)}$$

F_i = fuerza de inercia

F_D = fuerza de resistencia al avance

F_L = fuerza de sustentación

f = coeficiente de refracción

C_i = coeficiente de inercia

C_D = coeficiente de resistencia al avance

C_L = coeficiente de sustentación

γ = peso específico del agua (N/M³)

D = diámetro externo de la tubería (m)

H_o = altura de la ola en aguas profundas (m)

(distancia vertical desde la parte inferior de la ola hasta la cresta de la ola)

L_o = longitud de la ola en aguas profundas (m)

Hay un desfase entre F_i , F_D y F_L que indica que nunca se dan simultáneamente. Por ejemplo, F_i está desfasado 90° con respecto a la fuerza F_L .

Si la ola golpea la tubería con un ángulo α , las fuerzas deberán corregirse en un factor $\sin \alpha$.

Las fórmulas A.4-16), -17) y -18) indican que hay varios valores que deben conocerse para calcular las fuerzas debidas al oleaje.

A continuación estudiaremos los factores más importantes.

Coeficientes de fuerza

Los coeficientes C_i , C_D y C_L se deciden experimentalmente. Los coeficientes dependen de la distancia entre la tubería y el fondo marino (ver A.4.5.1).

Si el agua puede pasar bajo la tubería, los coeficientes se reducirán.

La tabla A.4.6.1 que aparece a continuación ofrece algunos valores prácticos para los cálculos.

Coeficiente	Distancia al fondo = 0	Distancia al fondo $\geq D/4$
C_i	3,3	2
C_D	1	0,7
C_L	2	0

Tabla A.4.6.1 Coeficientes de fuerza para el oleaje

Altura de la ola y longitud de la ola

Si no se dispone de mediciones de alturas de olas, las alturas pueden decidirse en base a las estadísticas del viento y la longitud expuesta a la acción del viento.

Los diagramas de las fig. A.4.6.2 y A.4.6.3 permiten obtener altura característica de la ola $H_{1/3}$ y el correspondiente periodo de las olas, conociendo la velocidad del viento y la longitud expuesta a la acción del viento. En los cálculos, aplicamos la altura máxima de ola (H_o) en aguas profundas, que es:

$$H_o = 1,8 \cdot H_{1/3} \tag{A.4-19}$$

El periodo de las olas para H_o se supone el mismo que para $H_{1/3}$ y puede tomarse directamente de la fig. A.4.6.3.

$$T_o = T_{1/3} \tag{A.4-20}$$

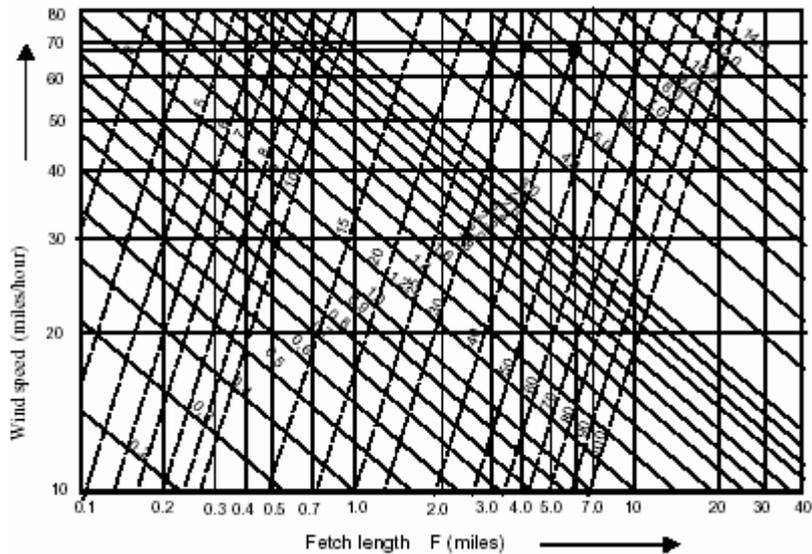


Fig. 4.6.2 Altura de ola $H_{1/3}$ en función de la velocidad del viento y de la longitud de exposición a la acción del viento

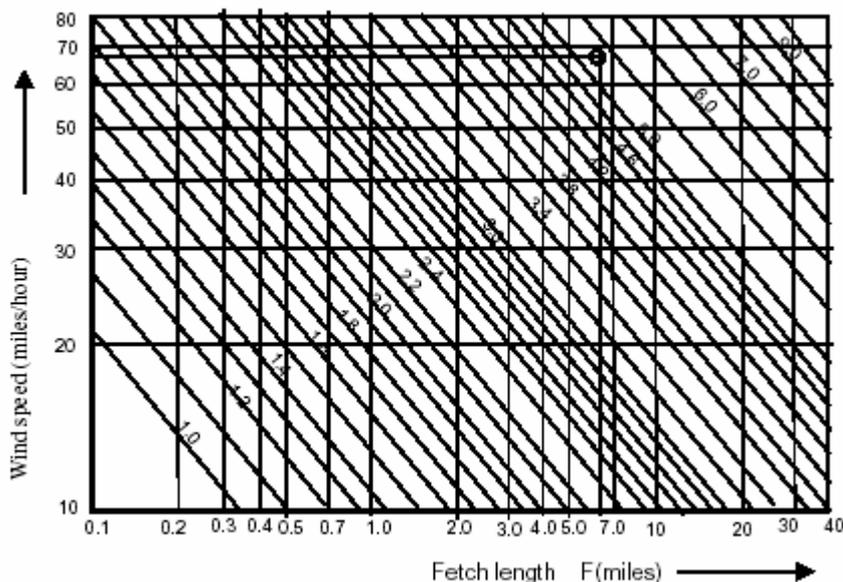


Fig. 4.6.3 Periodo de la ola en función de la velocidad del viento y de la "longitud de exposición a la acción del viento"

Nótese que la altura de las olas $H_{1/3}$ se da en pies cuando la velocidad del viento está en millas por hora y la longitud expuesta a la acción del viento en millas (1 milla = 1609 m, 1 pie \approx 0,3 m)

Si no se dispone de información estadística, se podrán aplicar las siguientes fórmulas para un cálculo aproximado de H_o y L_o [1].

$$H_o = 0,045 \cdot u \cdot \sqrt{F} \quad \text{A.4-21)}$$

$$L_o = 0,56 \cdot u \cdot \sqrt{F} \quad \text{A.4-22)}$$

u = velocidad del viento (m/s)

F = longitud de alcance (km)

Esto significa que la brusquedad de la ola, H_o / L_o es aproximadamente un 8%.

Son normales las variaciones entre 7-9%.

Las fórmulas A.4-21) y A.4-22) tienden a dar valores un poco demasiado altos y por tanto es mejor ir sobre seguro. Recomendamos utilizar estadísticas de oleaje si se poseen para un determinado proyecto.

Cuando se conoce el periodo de la ola, la longitud de la ola en aguas profundas puede calcularse con la fórmula siguiente:

$$L_o = 1,56 \cdot T_{1/3}^2 \quad \text{A.4-23)}$$

Factor de refracción

Este factor trata de describir cómo son influenciadas las olas por las condiciones del fondo cuando las olas se aproximan a la costa.

Matemáticamente, este factor puede expresarse así:

$$f = \frac{2 \cdot a}{H_o} \cdot \text{sen} \alpha \quad \text{A.4-24)}$$

a = amplitud de las partículas de la ola en la órbita descrita en el fondo (ref. fig. A.4.6.1)

α = ángulo formado por la dirección de la velocidad de la ola y la tubería

Existen diagramas para el factor de refracción basados en determinadas condiciones. En éstos se asume que la equidistancia de las curvas de nivel en el fondo son líneas rectas y paralelas a la línea de costa.

Los valores de entrada del diagrama son:

α_o = ángulo formado por la dirección de la velocidad de la ola y la perpendicular a la línea de costa.

β = ángulo formado por la tubería y la perpendicular a la línea de costa.

Las fig. A.4.6.4, A.4.6.5 y A.4.6.6 nos permiten decidir el valor de f [4].

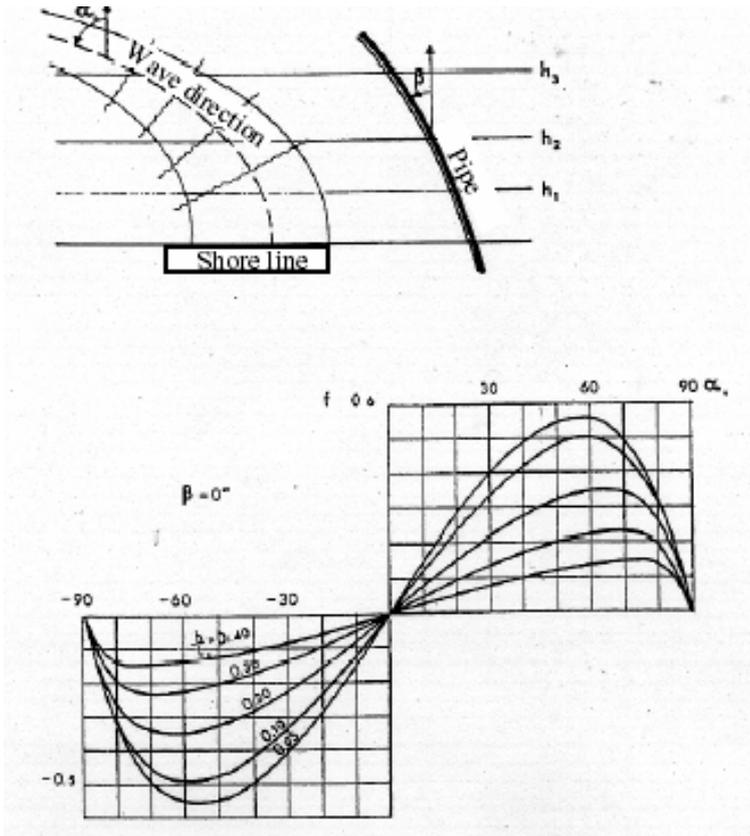


Fig. A.4.6.4 Factor de refracción para $\beta = 0$

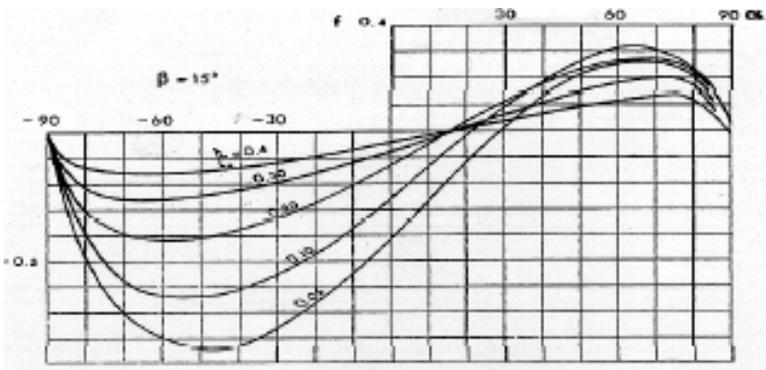


Fig. A.4.6.5 Factor de refracción para $\beta = 15^\circ$

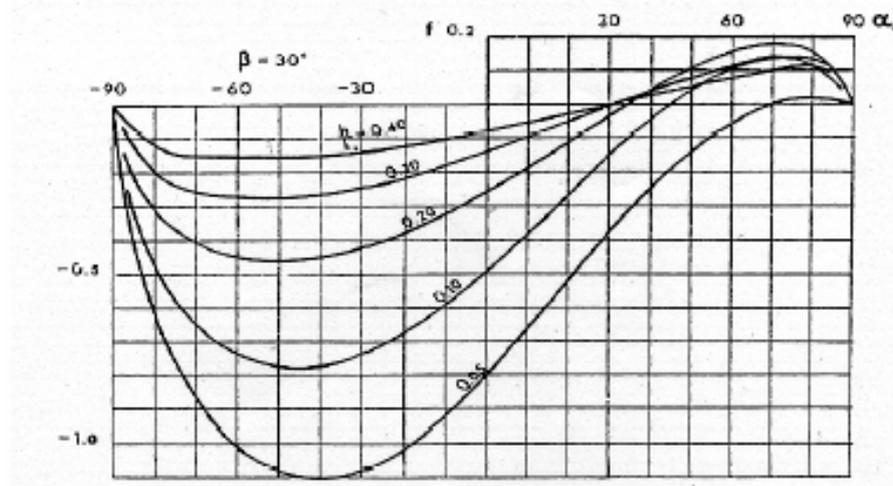


Fig. A.4.6.6 Factor de refracción para $\beta = 30^\circ$

La profundidad de formación de los rompientes (h_b) de las olas puede calcularse de forma aproximada mediante la fórmula A.4-25)

$$H_o = 0,05 \cdot L_o \quad \text{A.425)}$$

L_o = longitud de la ola en aguas profundas (ver. A.4-22) y A.4-23)

En las páginas siguientes veremos algunos ejemplos en los que aplicaremos las fórmulas para el cálculo de las propiedades del oleaje y las fuerzas de las olas.

Ejemplo 5

Hallar la altura de ola H_o y la longitud de ola L_o , en aguas profundas, para una velocidad de viento $u=30$ m/s (tormenta fuerte) y una longitud de exposición a la acción del viento $F = 10$ km.

Aplicar tanto el método de los diagramas como el de las fórmulas.
Comparar los resultados. ¿A qué profundidad rompe la ola?

Solución:

a) Utilizaremos las estadísticas del viento:

Primeramente hallamos la velocidad del viento en millas por hora y las longitudes de exposición en millas.

$$u = 30 \text{ m/s} = \frac{30 \cdot 60 \cdot 60}{1609} \text{ millas/h} = 67 \text{ millas/h}$$
$$F = 10 \text{ km} = \frac{10000}{1609} \text{ millas} = 6,2 \text{ millas}$$

Utilizando los diagramas de la fig. A.4.6.2 y de la fig. A.4.6.3, obtenemos que:

$$H_{1/3} = 7 \text{ pies} = 2,1 \text{ m} \quad T_{1/3} = 5,3 \text{ s}$$

La altura máxima de las olas se obtiene con la fórmula A.4-19):

$$H_o = 1,8 \cdot 2,1 \text{ m} = 3,8 \text{ m}$$

La longitud de ola puede calcularse con la fórmula A.4-23):

$$L_o = 1,56 \cdot 5,3^2 \text{ m} = 44 \text{ m}$$

b) Aplicación de las fórmulas:

Aplicaremos las fórmulas A.4-21) y -22):

$$H_o = 0,045 \cdot 30 \cdot \sqrt{10} = 4,2 \text{ m}$$
$$L_o = 0,56 \cdot 30 \cdot \sqrt{10} = 53 \text{ m}$$

c) Comparación de los resultados:

Si comparamos los resultados de a) y b), vemos que el método de las fórmulas da valores más elevados que el método que utiliza las estadísticas de vientos.

Las diferencias expresadas en tantos por ciento son:

$$\text{Altura de las olas} \quad \frac{4,2 - 3,8}{3,8} \cdot 100\% = 10\%$$
$$\text{Longitud de las olas} \quad \frac{53 - 44}{44} \cdot 100\% = 20\%$$

d) Profundidad de formación de los rompientes:

La fórmula A.4-25 nos da un valor aproximado de este parámetro.

$$a) \rightarrow h_o = 0,05 \cdot 44\text{m} = 2,2 \text{ m}$$

$$b) \rightarrow h_o = 0,05 \cdot 53\text{m} = 2,6 \text{ m}$$

La tubería tiene que enterrarse a una profundidad mínima igual a la profundidad de formación de los rompientes. Normalmente enterramos la tubería a una profundidad igual a la altura de ola máxima, H.

En el ejemplo 5 esta recomendación nos lleva a la construcción de una zanja a aproximadamente 4 m de profundidad.

Ejemplo 6

Consideraremos los datos de oleaje calculados en el ejemplo 5 mediante el método de estadísticas de vientos ($H_o=3,8\text{m}$ y $L_o=44\text{m}$).

La fig. A.4.6.7 muestra que la dirección de la velocidad del oleaje golpea perpendicularmente a la equidistancia de las curvas de nivel, a un ángulo $\alpha_o = 45^\circ$. Se instala una tubería de emisario de PE, de 500 mm de diámetro perpendicular a la equidistancia de las curvas de nivel, es decir, $\beta = 0^\circ$. La tubería está enterrada a una profundidad de 5m.

Decidir el factor de refracción f y calcular las fuerzas que atacan a la tubería a 20 m de profundidad. Suponer que la tubería descansa directamente sobre el fondo marino (no hay espacio entre el fondo y la tubería). Suponer $\alpha = 10000 \text{ N/m}^3$.

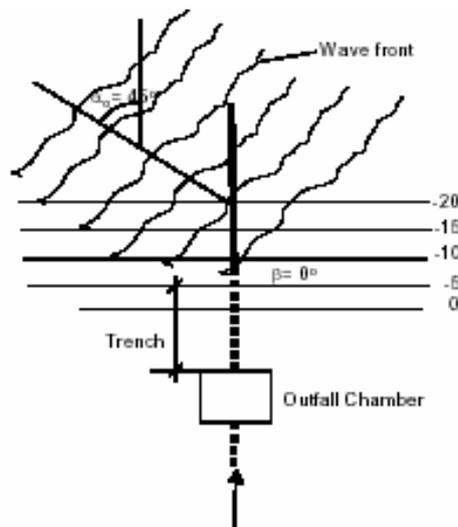


Fig. A.4.6.7 Emisario sometido al ataque del oleaje

Solución:

Utilizamos la Fig. A.6.4, $\alpha = 45^\circ$, $h/L_o = 20/44=0,45$

Esto nos da un factor de refracción $f = 0,1$

Los valores máximos de las fuerzas de oleaje pueden hallarse aplicando las fórmulas A.4-16) –17) y –18).

$$\text{Fuerza de inercia: } F_i = \pi \cdot 3,3 \cdot 0,1 \cdot 10000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} \cdot \frac{3,8}{44} \text{ N/m} = 180 \text{ N/m}$$

$$\text{Fuerza de resistencia al avance: } F_D = 1,0 \cdot 1^2 \cdot 10000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} \cdot \frac{3,8}{44} \cdot \frac{3,8}{0,5} \text{ N/m} = 15 \text{ N/m}$$

$$\text{Fuerza de sustentación: } F_L = 2.0,1^2 \cdot 10000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} \cdot \frac{3,8}{44} \cdot \frac{3,8}{0,5} N / m = 25 N / m$$

Como podemos apreciar, la fuerza de inercia es la fuerza dominante. Está desfasada con respecto a las fuerzas de resistencia al avance y de sustentación. Para los cálculos de estabilidad podemos asumir que $F_D=0$ cuando $F_I = F_{I,max}$ y viceversa. Así, obtenemos la siguiente combinación crítica:

Horizontal 180N

Vertical 25N

Para los cálculos de estabilidad, ver punto A.4.3.

A.5 Diseño de los parámetros para el proceso de hundimiento

La fase crítica en la instalación de tuberías de PE es el hundimiento.
La fig. A.5.1 ilustra la situación durante el hundimiento de una tubería de polietileno.

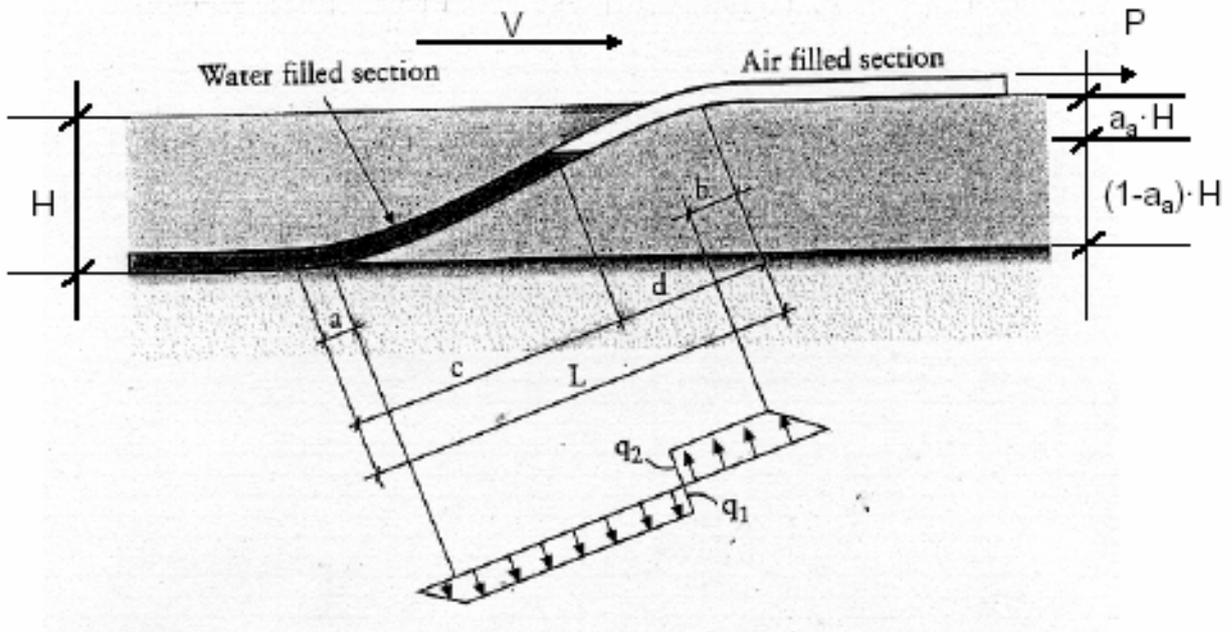


Fig. A.5.1 Tubería de PE durante el proceso de hundimiento

Para llevar a cabo una instalación segura debemos tener en cuenta el equilibrio entre las fuerzas que actúan hacia abajo (q_1) y las fuerzas que actúan hacia arriba (q_2). Las fuerzas descendentes las crean fundamentalmente los contrapesos de hormigón de la tubería y las fuerzas ascendentes son debidas a la flotabilidad de la sección llena de aire.

Para iniciar y proseguir con el proceso de hundimiento, las fuerzas hacia abajo han de ser ligeramente superiores a las fuerzas ascendentes. Controlar esta diferencia es esencial y constituye el principal reto durante el hundimiento. Hemos de intentar evitar las fuerzas de aceleración sobre el sistema. Esto puede controlarse registrando la velocidad de hundimiento (v) y regulando la presión interna (p).

Si la velocidad aumenta, podemos aumentar la presión del aire y viceversa.

Para regular la presión del aire, utilizamos válvulas y un compresor.

La situación más crítica para la tubería en lo que respecta a posibles daños es el pandeo en la superficie marina o en el fondo debido a que se excede el radio máximo de pandeo, ref. A.3.5.1.

Para asegurar un radio suficiente es necesario aplicar una fuerza de tracción (P) en el extremo de la tubería.

Con respecto a la Fig. A.5.1., disponemos de los siguientes parámetros de control y regulación durante el hundimiento:

- presión del aire (p)
- fuerza de tracción (P)
- velocidad de hundimiento (v)

En los siguientes capítulos daremos una serie de recomendaciones para el cálculo de estos parámetros.

Si podemos llevar a cabo un hundimiento lento, la instalación habrá tenido éxito en lo que respecta a la tubería.

A.5.1 Presión interna del aire

La presión interna depende de la carga de los contrapesos de hormigón. El cálculo de la carga se ha descrito en A.4. El parámetro importante es la tasa de llenado de aire a_a (ver A.4-2)

Para obtener un tramo lleno de aire que equilibre el peso de los collarines de hormigón, debemos aplicar una presión interna (p) en la tubería.

$$P = a_a \cdot H \quad \text{A.5-1)}$$

P = presión interna (mwc)
 a_a = grado de llenado de aire
 H = profundidad del agua (m)

Como se deduce de la fórmula A.5-1), la presión interna depende de la profundidad del agua. Esto significa que hemos de incrementar la presión a medida que aumenta la profundidad. El compresor ha de tener capacidad para producir suficiente aire frente a una presión que corresponde a la profundidad máxima, incluyendo la caída de presión en las tuberías de transmisión.

Si conocemos la sección longitudinal de una tubería, podemos calcular la presión de equilibrio en cada punto. Esta curva o tabla constituirá la base para una instalación satisfactoria. Hemos de utilizar tramos de la tubería como referencia en cuanto a longitud, es decir, por ejemplo, cada 50 m de tubería se realizará una marca.

Ejemplo 1

Calcular la presión interna de equilibrio para una tubería PE80 SDR22 de 500 mm de diámetro que tiene un grado de carga mediante contrapesos de hormigón correspondiente a una tasa de llenado de aire $a_a = 30\%$.
Suponer que las profundidades son 10m, 20 m y 30m.

Solución:

Aplicaremos la fórmula A.5-1) y obtenemos:

$$P_{10m} = 0,3 \cdot 10m = 3 \text{ mwc} = 0,29 \text{ bar}$$
$$P_{20m} = 0,3 \cdot 20m = 6 \text{ mwc} = 0,59 \text{ bar}$$
$$P_{30m} = 0,3 \cdot 30m = 9 \text{ mwc} = 0,88 \text{ bar}$$

Nótese que la presión interna es independiente del diámetro de la tubería.

A.5.2 Fuerza de tracción

La fuerza de arrastre en el extremo de la tubería se aplica para controlar la posición de la tubería y para aumentar el radio de flexión durante el hundimiento (ver. Fig. A.5.2).

Si el porcentaje de carga es inferior al 50%, lo que normalmente sucede, el radio crítico se produce en la superficie marina. Sino, será en el fondo.

Llevar a cabo un cálculo correcto del proceso de hundimiento es complicado y debe realizarse con la ayuda de programas informáticos. No obstante, hay un método sencillo de realizar un cálculo aproximado de la fuerza de tracción. Este método se basa en la teoría del eslabón de la cadena y es válido para aguas profundas.

La fig. A.5.2 ilustra la situación.

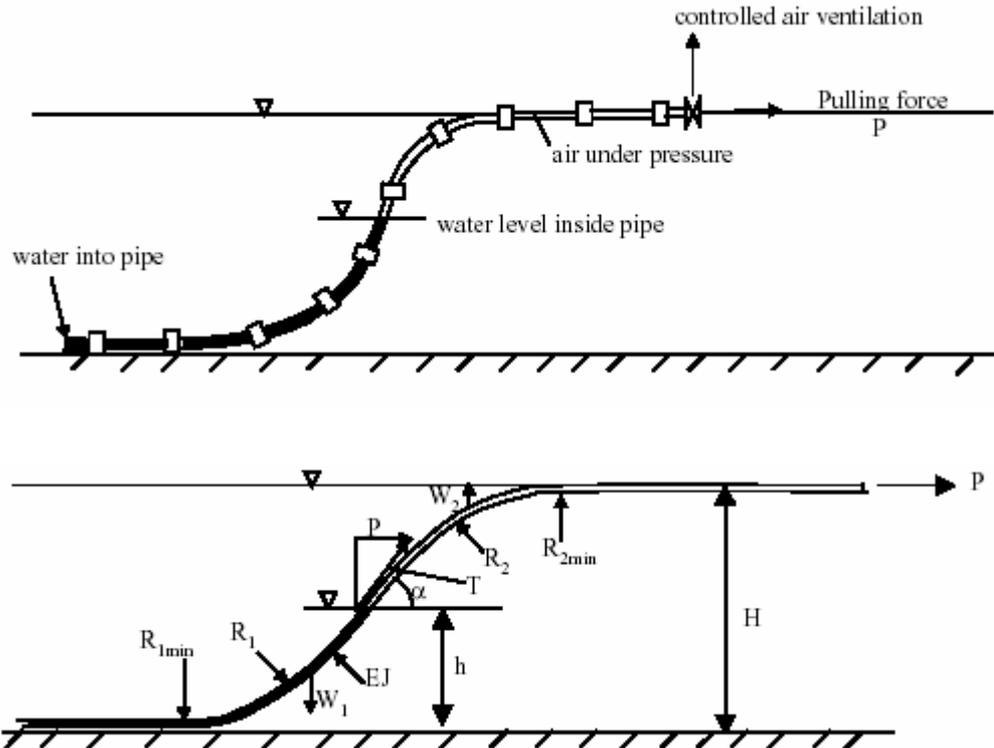


Fig. A.5.2 – Proceso, forma y parámetros técnicos de una tubería de PE durante su hundimiento

Las aguas profundas se definen como: $H > 12 \cdot D$

A.5-2)

En aguas poco profundas (fase inicial del hundimiento) es imposible aplicar una fuerza en el extremo antes de que la tubería esté ensamblada a una instalación fija. Cuando se sumerge el extremo para conectar la tubería hemos de verificar que el radio de flexión es mayor que el radio de pandeo (ref. Tabla A.3.5.1.1).

A este fin, aplicaremos la fórmula A.5.3):

$$R = \frac{L^2}{2 \cdot H} \quad \text{A.5-}$$

3)

R = radio de flexión

L = longitud sumergida de la tubería (longitud de voladizo)

H = profundidad de conexión

Puede que sean necesarios varios puntos de ataque para sumergir la tubería durante la conexión (y no sólo el del extremo).

Si volvemos a la Fig. A.5.2, tenemos los siguientes parámetros:

H = profundidad (m)

h = altura interna del agua (m)

w_2 = flotabilidad neta en el tramo lleno de aire (N/m)

w_1 = peso neto del tramo lleno de agua (N/m)

P = fuerza de tracción (N)

T = fuerza de tracción en el punto de cambio (N)

α = ángulo formado por el eje de la tubería ya la horizontal en el punto de cambio (°)

R_1 = radio de flexión en el tramo lleno de agua (m)

R_2 = radio de flexión en el tramo lleno de aire (m)

EJ = rigidez de la tubería

Podemos desarrollar las siguientes relaciones matemáticas:

$$R_{1\min} = \frac{P}{w_1} \quad \text{A.5-4)}$$

$$R_{2\min} = \frac{P}{w_2} \quad \text{A.5-5)}$$

$$T = P + w_1 \cdot h \quad \text{A.5-6)}$$

$$\cos \alpha = \frac{P}{P + w_w \cdot h} \quad \text{A.5-7)}$$

Tal como se ha mencionado anteriormente, $w_1 > w_2$ si la tasa de llenado de aire diseñada es inferior al 50%. El radio R_2 en la superficie será crítico en este caso – ver A.5-4) y A.5-5).

La relación entre w_1 y w_2 puede expresarse de forma aproximada de la siguiente manera:

$$w_2 = \frac{1 - a_a}{a_a} \cdot w_1 \quad \text{A.5-8)}$$

a_a = tasa de llenado de aire ($a > 20\%$)

De las fórmulas A.5-4) y A.5-5) podemos obtener la fuerza de tracción necesaria, utilizando el radio crítico R_{\min} , obtenido de la table A.3.5.1.1.

$$P_1 = w_1 \cdot R_{\min} \quad \text{A.5-9)}$$

$$P_2 = w_2 \cdot R_{\min} \quad \text{A.5-10)}$$

La mayor de entre P_1 y P_2 será la fuerza de tracción a aplicar.

Ejemplo 2

Una tubería PE80 SDR26 de 500mm de diámetro ha de instalarse a 50 m de profundidad.

La tubería tiene un grado de carga correspondiente a un 25% de llenado de aire.

El hundimiento ha de ser realizado utilizando un coeficiente de seguridad frente a pandeo de 2,0. La densidad del agua del mar puede tomarse como 1025 kg/m³. Decidir los siguientes factores:

- radio de flexión mínimo
- fuerza de tracción necesaria al extremo de la tubería
- Máxima tensión de torsión en la pared de la tubería
- El ángulo α en el punto de retorno de la curva S.

Solución:

- el radio de flexión mínimo lo tomamos de la tabla A.3.5.1.1:

$$\text{SDR} = 26 \rightarrow R/D = 34 \quad R_{\min} = 35 \cdot 0,5 \text{ m} = \underline{17\text{m}}$$

- b) Para determinar la fuerza de tracción hemos de conocer w_1 y w_2 .
Aplicamos la fórmula A.4-2) para calcular w_1 ($w_1 = w_{cw} + w_{pine w}$)

$$w_1 = a_a \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \gamma_w \quad w_1 = 0,25 \cdot \pi \cdot \frac{0,4618^2}{4} \cdot 1025,9,81 N / m = 420 N$$

$$w_2 \text{ podemos calcularla a partir de la fórmula A.5-8): } w_2 = 420 \cdot \frac{1 - 0,25}{0,25} N = 1260 N$$

La máxima fuerza de tracción la da la fórmula A.5-10): $P = 1260 \cdot 17 N = 21,4 N$

- c) La fuerza de tracción máxima en la tubería aparece en el punto de retorno. La fórmula A.5-6) nos da:

$$T = P + w_1 (1 - a_a) \cdot H \quad T = (21400 + 420 (1 - 0,25) \cdot 50) N = 37,2 \text{ kN}$$

La tensión correspondiente sobre la pared de la tubería puede determinarse así:

$$\sigma = \frac{T}{\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)} = \frac{37200}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,5^2 - 0,4618^2)} N / m^2 = 1,3 \text{ Mpa}$$

Además, habrá tensión en dirección longitudinal debido a la presión interna e índice de Poisson. Ver A.3.1.2. La fórmula A.3-13) nos da:

$$\sigma_{1\max} = \frac{0,5 \cdot 0,125}{2} \cdot (26 - 1) \text{ MPa} = 0,78 \text{ MPa}$$

La tensión de tracción máxima es la suma de $\sigma + \sigma_{\max}$:

$$\sigma_{\max} = (1,3 + 0,78) \text{ Mpa} = 2,08 \text{ MPa}$$

En la tabla A.1.2 vemos que la tensión de estallido (reventón) bajo cargas de corta duración es $8 \cdot 1,6 \text{ MPa} = 12,8 \text{ MPa}$, para una tubería PE80.

El coeficiente de seguridad para tensión de tracción pasa a ser: $C = 12,8 / 2,08 = 6,15$.

Este resultado pone de manifiesto que el pandeo es el daño más crítico que puede ocurrir durante el hundimiento ($C = 2,0$).

- d) El ángulo α en el punto de retorno viene dado por la fórmula A.5-7):

$$\cos \alpha = \frac{21400}{21400 + 420 \cdot (1 - 0,25) \cdot 50} = 0,58 \quad \alpha = 54^\circ$$

Tal como se ilustra en el ejemplo 2, podemos calcular la fuerza de tracción, P que garantice una instalación segura, junto con la presión interna.

La experiencia indica que la fuerza de tracción calculada a partir de las fórmulas indicadas en este capítulo da unos valores más elevados que cuando se calcula mediante métodos más avanzados.

A.5.3 Velocidad de hundimiento

Para evitar que las fuerzas de aceleración actúen sobre la tubería, la velocidad de hundimiento se mantendrá lo más constante posible durante la instalación. Puesto que en la práctica siempre se produce alguna variación de la velocidad, es también importante mantener la velocidad a un nivel bajo.

Si tomamos la ley de Newton:

$$K = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \text{A.5-10)}$$

K = aceleración
M = masa en movimiento
 Δv = variación de la velocidad
 Δt = variación del tiempo

Vemos que un cambio importante en la relación $\Delta v / \Delta t$ creará una fuerza K elevada que actuará en el agua y en la tubería. Si mantenemos v baja, nos aseguramos de que Δv también se mantiene baja para un periodo de tiempo dado, Δt . Como regla general, a menudo se ha recomendado que la velocidad de hundimiento no excediese de 0,3 m/s \approx 1 km/h. No obstante, existen varios ejemplos de proyectos satisfactorios en los que la velocidad de hundimiento ha sido superior a 0,3m/s.

La velocidad de hundimiento la rige el caudal Q que entra en la tubería. Este caudal depende a su vez de la presión de impulsión disponible,

$$\Delta h = a_a \cdot H - p_i \quad \text{A.5-11)}$$

Δh = caída de presión disponible (mca)
H = profundidad (m)
 P_i = presión interna (mca)
 A_a = tasa de llenado de aire de diseño
La caída de presión puede expresarse (ver A.2-1):

$$\Delta h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + k_s \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{A.5-12)}$$

f = coeficiente de fricción ($\approx 0,02$)
L = longitud del tramo lleno de agua (m)
D = diámetro interno (m)
V = velocidad (m/s)
g = aceleración de la gravedad ($\approx 9,81$ m/s²)
 k_s = coeficiente de pérdida singular

Si combinamos A.5-11 y A.5-12) podemos expresar la velocidad de hundimiento como:

$$v = \left[\frac{2 \cdot g \cdot D \cdot (a_a \cdot H - p_i)}{f \cdot L + k_s \cdot D} \right]^{1/2} \quad \text{A.5-13)}$$

De la fórmula A.5-13 podemos deducir que v es dependiente de la longitud del tramo lleno de agua (L), de la profundidad (H) y de la presión interna (p_i). El resto de parámetros son prácticamente constantes. Para mantener una velocidad constante, será preciso regular la presión interna (p_i) según los cambios que se produzcan en L y H.

Dado que la relación entre L y H se conoce para un proyecto dado, es posible calcular una “curva de hundimiento” para p_i como función de L. Esta curva es esencial durante la instalación.

Δh aparecerá como una subpresión en la tubería y debe ser controlada para evitar el pandeo (ver. A.3-16).

Para facilitar el control de la velocidad de hundimiento en la fase inicial del procedimiento de inmersión, es útil tener un elevado valor para el coeficiente de pérdida singular k_s . Esto puede conseguirse utilizando un diámetro de entrada reducido (pieza en T) con respecto a la tubería principal. Un diámetro apropiado estaría entre $1/3 D$ a $1/20 D$ (comprobar la subpresión).

Recomendamos mantener esta apertura constante durante el hundimiento.

Existe una velocidad de hundimiento máxima a la que la tubería de PE que se está sumergiendo corre el riesgo de oscilar. Esta velocidad puede calcularse aproximadamente con la fórmula:

$$v = \frac{k \cdot \pi \cdot D^2}{2 \cdot S \cdot H^2 \cdot n} \cdot \left(\frac{E}{2 \cdot SDR \cdot \rho} \right)^{1/2} \quad \text{A.5-14}$$

k = coeficiente de soporte ($k = 1,0$ para tub. soportadas libremente, $k=2,25$ para tub. fijas)

S = número Strouhals ($\approx 0,2$)

D = diámetro externo (m)

H = profundidad máxima de instalación (m)

n = coeficiente de seguridad (suponer $n = 2,0$)

E = módulo de elasticidad (corta duración) (kN/m^2)

ρ = masa de la tubería, contenido (agua) y agua que oscila por unidad de volumen de la tubería

Si asumimos que $E = 8 \cdot 10^5 \text{ kN/m}^2$, $k = 2,0$ y una profundidad máxima de 50 m, podemos transformar la fórmula A.5-10) en:

$$V = 1,2 \cdot D^2 \cdot (SDR)^{-1/2} \quad \text{A.5-15}$$

La fórmula A.5-15 da una indicación sobre la velocidad máxima de hundimiento pero el riesgo de pandeo también ha de ser considerado. Para pequeños diámetros la fórmula es un poco conservadora en comparación con la experiencia. Normalmente, las oscilaciones durante el hundimiento no afectarán negativamente a la tubería.

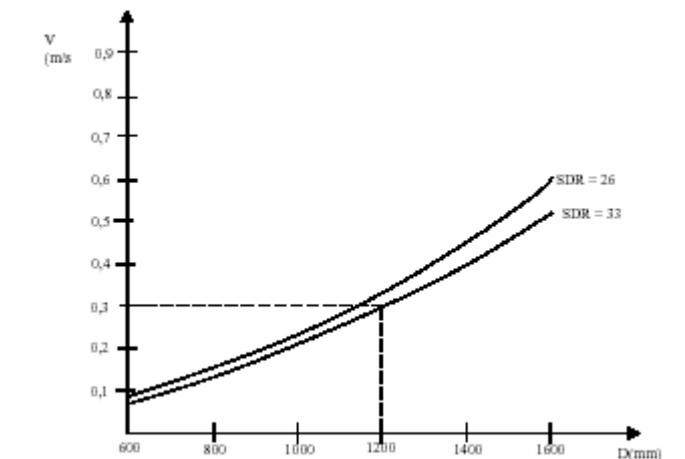
Ejemplo 3

Calcular la velocidad máxima de hundimiento para una tubería de PE como función de las clases SDR 26 y 33. Suponer una profundidad máxima de 50 m y $D \geq 600 \text{ mm}$.

Solución:

Utilizamos la fórmula A.5-15) y trazamos gráficamente el resultado en la fig. A.5.3.

Fig. A.5.3 – Velocidad máxima de hundimiento para evitar oscilaciones



La fig. A.5.3 indica que para diámetros $\geq 1200\text{mm}$ puede aplicarse una velocidad de $0,3\text{m/s}$ sin riesgo de oscilaciones. Para un diámetro de 1600 mm , la velocidad de hundimiento máxima con respecto a las oscilaciones es de $0,6\text{ m/s}$ para SDR26. A efectos prácticos, la velocidad de hundimiento estará entre $0,1$ y $0,6\text{ m/s}$ para conseguir una inmersión controlada.

Ejemplo 4

Supongamos una tubería PE80 SDR26 de 1200mm de diámetro que ha de ser hundida a 50 m de profundidad. La sección longitudinal del fondo se da en la tabla A.5.1 a continuación:

L (m)	H (m)	L (m)	H (m)
0	5	400	35
100	15	500	40
200	20	600	45
300	30	700	50

La intención es hundir la tubería a una velocidad constante de $v=0,3\text{ m/s}$. La carga es igual a una tasa de llenado de aire $a_a= 30\%$. Suponer una apertura de entrada de agua durante el hundimiento de $\frac{1}{4}$ del diámetro interno de la tubería.

Calcular la presión de equilibrio en el interior de la tubería y la presión de hundimiento. Hallar la velocidad máxima permitida con respecto al pandeo.

Solución:

Para calcular la sobrepresión de equilibrio utilizaremos la fórmula A.5-1):

$$p_b = a_a \cdot H \quad a_a = 0,3$$

Esto nos da:

L (m)	H (m)	p_b (mwc)	L (m)	H (m)	p_b (mwc)
0	5	1.5	400	35	10.5
100	15	4.5	500	40	12.0
200	20	6.0	600	45	13.5
300	30	9.0	700	50	15.0

Tabla A.5.2 Presión de equilibrio

Para calcular p_i debe utilizarse la fórmula A.5-13). Podemos describir esta fórmula:

$$p_i = a_a \cdot H - \frac{v^2(f \cdot L + k_s \cdot D)}{2 \cdot g \cdot D} \tag{A.5-16}$$

Valores de entrada:

$D = 1107,6\text{ mm}$

$F = 0,02$

$K_s = 0,5 \cdot (4)^2 = 8$

$g = 0,81\text{ m/s}^2$

$v = 0,3\text{ m/s}$

Este resultado se muestra en la tabla A.5.3:

L (m)	H (m)	p_b (mwc)	p_i (mwc)	a_i (%)
0	5	1.5	1.46	29.2
100	15	4.5	4.46	29.8
200	20	6.0	5.95	29.8
300	30	9.0	8.94	29.8
400	35	10.5	10.43	29.8
500	40	12.0	11.92	29.8
600	45	13.5	13.42	29.8
700	50	15.0	14.91	29.8

Tabla A.5.3 Presión interna de hundimiento

Como podemos observar, hay una subpresión muy pequeña en la tubería (0,04-0,09 mca) durante el hundimiento. Puede resultar difícil regular la presión con la suficiente precisión. Para ello, el manómetro ha de tener una escala diseñada para el particular.

En este caso puede ser favorable reducir la superficie de entrada de agua para así aumentar k_s (coeficiente de pérdida singular). Si, por ejemplo, se coloca una válvula y el diámetro de entrada es equivalente a $1/10 \cdot D$, la caída de presión ascenderá a 0,83 mca.

A partir de la fórmula A.3-16) podemos obtener la presión de pandeo:

$$p = \frac{2.800}{1 - 0,4^2} \cdot \frac{0,65}{(26 - 1)^3} MPa = 0,079 MPa = 8,0 mwc$$

Si introducimos un coeficiente de seguridad de 2,0, la caída de presión es aproximadamente 4,0 mca.

Si introducimos este valor para $(a_a \cdot H - p_i)$ en la fórmula A.5-13) obtendremos:

$$v_{\max,0} = \left[\frac{2,9,81.1,107.4,0}{0,02.0 + 8.1,107} \right]^{1/2} m/s = 3,13 m/s$$

$$v_{\max,700} = \left[\frac{2,9,81.1,107.4,0}{0,02.700 + 8.1,107} \right]^{1/2} m/s = 1,95 m/s$$

La velocidad crítica en el punto de partida es 3,13 m/s y de 1,95 m/s en el punto final, en lo que respecta a pandeo.

La velocidad máxima estará limitada por la fuerza de resistencia al avance debido a la corriente que se produce cuando la tubería se mueve a través del agua (ver. A.4-10). Como podemos ver, no habrá riesgo de pandeo de la tubería si se lleva a cabo un hundimiento controlado. Para controlar la velocidad de hundimiento en la realidad puede ser adecuado registrar el tiempo de desaparición de la superficie del agua de, por ejemplo 3 contrapesos de hormigón consecutivos. Si se conoce la distancia entre centros, la velocidad será:

$$v = 3 \cdot c / t \tag{A.5-17)}$$

c = distancia entre centros de los contrapesos de hormigón

t = tiempo registrado para 3 veces c .

La velocidad registrada/calculada deberá compararse con la velocidad de diseño y se emprenderán las acciones que sean necesarias, caso de que la velocidad sea demasiado elevada (p.ej.cerrar la válvula, poner en marcha el compresor).

Como habrá advertido, no hay una teoría exacta para decidir la velocidad máxima de hundimiento de una tubería. Es una buena idea mantener la velocidad baja en caso de oleaje, corrientes, fallo de la bomba, fallo del equipo tractor, fallo de la presión de aire interna, fallo del equipo de regulación, etc.

A título informativo podemos indicarle las condiciones bajo las que se llevaron a cabo con éxito dos operaciones de hundimiento:

- i) PE80 SDR26 diám. 1600 mm
 - longitud 2500m
 - Profundidad máx. 50m
 - Fuerza de tracción máx. = 500 kN
 - Lastre, a_a , = 28%
 - V_{\max} = 0,46 m/s

- ii) PE8 SDR17,6 diám. 800 mm
 - longitud 500m
 - Profundidad máx. 200m
 - Fuerza de tracción máx. = 40 kN
 - Lastre, a_a , = 15%
 - V_{max} = 1,0 m/s

Si derivamos una fórmula basada en un simple equilibrio de energías, donde la energía cinética se transforma en energía elástica en la tubería y sólo consideramos la dirección axial, obtendremos la siguiente expresión:

$$v_{max} = \frac{\sigma_m}{F} \cdot \left(\frac{2}{E \cdot \rho} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \right)^{1/2} \quad \text{A.5-18)}$$

V_{max} = velocidad máxima de hundimiento (m/s)

σ_m = $\sigma_o - \sigma_T$

σ_m = tensión (MPa)

σ_a = tensión de diseño (5,0 MPa)

σ_T = tensión creada por la fuerza de tracción y el lastrado ($\approx 1,5$ MPa)

F = coeficiente de seguridad / coeficiente de corrección

E = Módulo de elasticidad (800MPa)

d = diámetro interno

D = diámetro externo

ρ = densidad del agua (kg/m³)

Si introducimos estos valores y asumimos que la tubería tiene una pared delgada, obtenemos la fórmula:

$$v_{max} = \frac{7,9}{F \cdot \sqrt{SDR}} \quad \text{A.5-19)}$$

Si comparamos esta fórmula con los proyectos reales i) y ii), obtenemos los coeficientes de seguridad / corrección:

$$F_{i)} = 3,4 \quad F_{ii)} = 1,9$$

Si utilizamos, por ejemplo, el valor medio de los dos factores, obtendremos el resultado (para F=2,65):

$$v_{max} = \frac{3,0}{\sqrt{SDR}} \quad \text{A.5-20)}$$

Esta fórmula da una indicación de la velocidad máxima de hundimiento durante un hundimiento controlado (fuerza de tracción en el extremo) antes de que la tubería sufra daños.

No obstante, no recomendamos utilizar estas velocidades sin haber efectuado un análisis de riesgos. La tabla A.5.4 recoge las velocidades críticas de hundimiento:

Clase SDR	Velocidad de hundimiento crítica (m/s)	Clase SDR	Velocidad de hundimiento crítica (m/s)
41	0,47	17,6	0,72
33	0,52	17	0,73
27,6	0,57	13,6	0,81
26	0,59	11	0,90
22	0,84	9	1,00

Tabla A.5.4 Velocidad crítica de hundimiento para tuberías de PE

B. Instalación

Este capítulo proporciona al contratista información práctica referente a la instalación de tuberías submarinas. También hacemos referencia al capítulo 0.2.

B.1 tuberías de PE Ensamblaje de

Desde que salieron al mercado por primera vez las tuberías de polietileno a principios de la década de los 60, se han desarrollado diversos métodos de ensamblaje.

Actualmente existen muchos métodos de ensamblaje adecuados para todos los tamaños de tuberías de PE:

- Soldadura por fusión a tope
- Accesorios para electrofusión
- Portabridas con anillo de soporte soldado
- Manguitos de unión mecánicos

Las ensambladuras mediante soldadura por fusión son sin duda las más comunes.

La fusión a tope se puede utilizar en todos los tamaños de las tuberías de PE, pero se emplea principalmente en tuberías de entre 110 mm y 1600 mm de diámetro.

Los manguitos para electrofusión se encuentran disponibles actualmente en tamaños de hasta 500 mm y en el futuro dispondremos de diámetros aún mayores.

El portabridas con anillo de soporte soldado se utiliza principalmente para ensamblar secciones más largas de tuberías, para conexiones a válvulas o agujeros de hombre o a tuberías fabricadas con otros materiales.

La soldadura por fusión a tope de tramos de tuberías combinada con portabridas / anillo de soporte soldado son habituales en las tuberías de PE más grandes instaladas en tierra o en entornos marinos. Las instalaciones por fusión a tope y electrofusión se utilizan principalmente para tamaños de tuberías más pequeños.

Las instalaciones mecánicas para todos los tamaños de tuberías de PE se encuentran disponibles actualmente en diversos diseños de metal y plástico. Resultan preferibles en condiciones de:

- tensión de flexión de rotura bajo cargas de corta duración como durante la inmersión y el tendido
- condiciones difíciles o imposibles para realizar soldaduras
- ensamblaje submarino o reparación de tuberías en general

En caso de utilizar secciones largas prefabricadas que son remolcadas por barco hasta el emplazamiento, puede ser ventajoso unirlas con manguitos soporte y portabridas, como se muestra en la fig. B.1.1.

Los manguitos soporte también se utilizan para conectar tuberías de PE a bridas inyectadas con lechada de cemento en los agujeros de hombre. Se pueden entregar de modo que se adapten a todos los tamaños de tuberías y se pueden ajustar para adaptarse a las preferencias del cliente en cuanto a longitud y protección frente a corrosión.

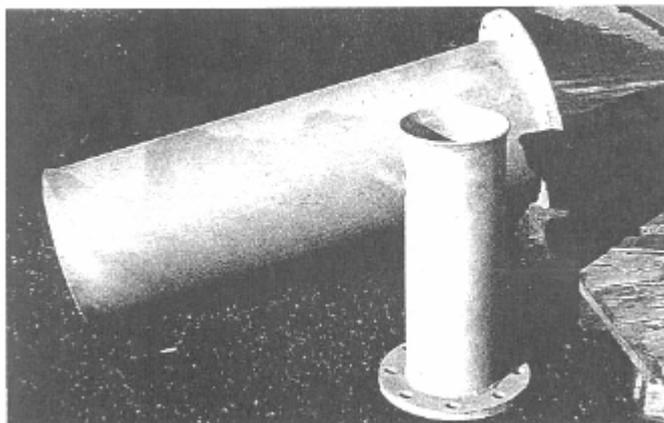


Fig. B.1.1 Manguito soporte

B.2 Fusión a tope de las tuberías de PE

La figura B.2.1 muestra el ciclo estándar de fusión a tope, según la norma DS-INF-70/INSTA 2072.

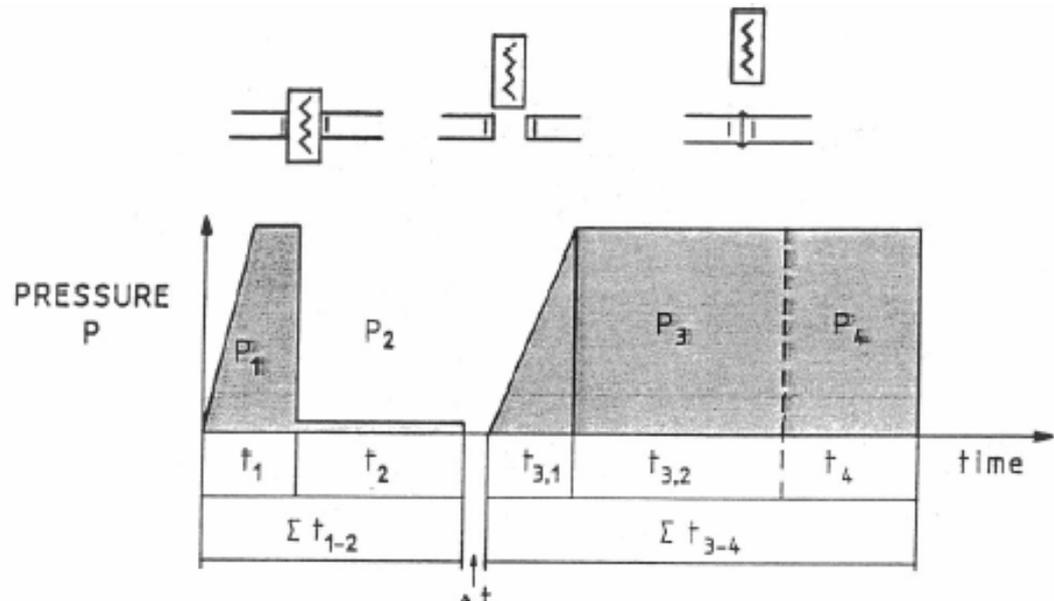


Fig. B.2.1 Ciclo de la fusión a tope.

- P_1 = presión de calentamiento, alta (MPa)
- P_2 = presión de calentamiento, baja (MPa)
- P_3^* = presión de soldadura (MPa)
- P_4 = presión de enfriamiento (MPa) $\approx P_3$
- t_1 = tiempo de calentamiento (s) con alta presión
- t_2 = tiempo de calentamiento (s) con baja presión
- Δt = tiempo de cambio (s)
- $t_{3,1}$ = tiempo para alcanzar la presión (s)
- $t_{3,2}$ = tiempo de enfriamiento (s), relativo a una presión de enfriamiento P_3

*) La presión de soldadura puede diferir de la estipulada en DS-INF-70/INSTA 2072, puesto que depende del criterio de soldadura indicado en la norma.

En el próximo capítulo se ofrecen algunas pautas con respecto a los parámetros de soldadura.

B.2.1 Parámetros de soldadura

Los parámetros de soldadura relacionados a continuación son los típicos de los valores orientativos. El espesor de las paredes (e) y el diámetro (d_e) se indican en milímetros.

1. Temperatura de soldadura – T

La temperatura de soldadura, T, estará en el intervalo de $T = 210 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ y será medida continuamente y verificada en cada soldadura utilizando un termómetro flexible *thermo stick*.

2. Presión de calentamiento (alta) – P1

La presión de calentamiento será $P = 0,18 \text{ N/mm}^2 \pm 0,01 \text{ N/mm}^2$

3. Tiempo de calentamiento – t_1

Es el tiempo de formación del cordón de soldadura en segundos. Ha de ser registrado. Véase el punto 4.

4. Anchura del cordón de soldadura – A

La anchura del cordón, A, al final del tiempo de calentamiento, es una función del espesor de las paredes, e: $A = 0,5 \text{ mm} + 0,1 \times e$

5. Presión de aproximación (baja) – P₂

La presión de aproximación es normalmente cero y no será superior a $0,01 \text{ N/mm}^2$

6. Tiempo para alcanzar la presión de aproximación – t₂

El tiempo para alcanzar la presión de aproximación es una función del espesor de las paredes, e: $t_2 = 15e \pm e$ (seg)

7. Tiempo de cambio- Δt

El tiempo de cambio es una función del diámetro de la tubería, d_e: $\Delta t \leq 3 \text{ seg} + 0,01 d_e$ (seg)

8. Tiempo de aumento de la presión– t_{3,1}

El tiempo de aumento de la presión es una función del diámetro de la tubería, d_e: $t_{3,1} \leq 3 \text{ seg} + 0,03 d_e$ (seg)

9. Presión de soldadura – P₃

La presión de soldadura será $P_3 = 0,18 \text{ N/mm}^2 \pm 0,01 \text{ N/mm}^2$

10. Presión de enfriamiento – P₄

La presión de enfriamiento será $P_4 = 0,18 \text{ N/mm}^2$

11. Tiempo de enfriamiento con presión - t_{3,2}

El tiempo mínimo de enfriamiento será $t_{3,2} = 10 + 0,5e$ (minutos)

Durante el tiempo de enfriamiento, la tubería y la estructura de soldadura permanecerán en reposo absoluto y no serán sometidas a ningún movimiento, en ninguna dirección.

Para proyectos más grandes recomendamos realizar un procedimiento de soldadura y confirmar los parámetros mediante ensayos de tracción destructivos.

B.2.2 Capacidad de soldadura

Las cifras siguientes son orientativas y están basadas en jornadas laborales de ocho horas.

Dimensión mm	Número de soldaduras diarias, > SDR26	Número de soldaduras diarias, > SDR22	Dimensión mm	Número de soldaduras diarias, > SDR26	Número de soldaduras diarias, > SDR22
1600	2	-	355	10	10
1400	2	-	280	14	14
1200	3	3	250	16	16
1000	3	3	225	18	17
900	4	4	200	20	18
800	4	4	180	22	18
710	5	5	160	22	20
630	6	6	140	22	20
560	7	7	125	25	22
500	7	7	110	25	25
450	8	8	90	25	25
400	10	10	75	26	25

La fig. B.2.2 muestra una máquina soldadora para grandes diámetros.



Fig. B.2.2 Máquina soldadora por fusión a tope BW 1600.

B.3 Instalación

Como se describe en los capítulos anteriores, una tubería submarina se instalará normalmente combinando instalación en zanja y tendido directo sobre la instalación del lecho marino.

B.3.1 Tuberías de PE enterradas

Cuando el nivel freático se encuentra más alto que el centro de una tubería de PE, la tubería puede estar sujeta a fuerzas hidrostáticas cuando se encuentre parcialmente llena de agua, como se ilustra en la fig. B.3.1.

Las fuerzas hidrostáticas se habrán de vencer mediante el relleno y los contrapesos de hormigón.

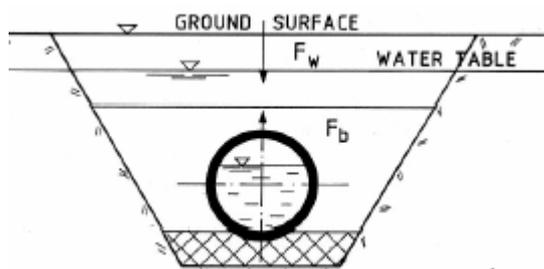


Fig. B.3.1 Tubería de PE en zanja submarina

Los materiales de relleno de la parte superior de la tubería combinados con los contrapesos de hormigón proporcionan el peso que compensa la elevación debida a la flotabilidad, preferible con un coeficiente de seguridad no inferior a 2. Obsérvese que el peso específico del suelo disminuye cuando se está sumergido en agua:

$$\gamma_{sea} = \gamma_{aire} - \gamma_w$$

- γ_{sea} = peso específico en el mar
- γ_{air} = peso específico en el aire
- γ_w = peso específico del agua

La compactación bajo el agua no es posible. Si se necesita una compactación de más de $DPR = 85\%$, dicha compactación se puede lograr utilizando grava con un grado natural de compactación en el intervalo: $DPR = 85 - 90\%$.

Si se tiende una tubería en un suelo con nivel freático constante próximo a la superficie, lo que sucede en el caso de una tubería submarina, la tubería no se puede cubrir para contrarrestar la elevación. Así pues, será necesario darle peso utilizando contrapesos de hormigón comunes (2 medias tuberías montadas con tornillos), ref. A.4.

Los contrapesos de hormigón se fijan a la tubería que está llena de aire y flota en posición sobre el agua con la que se ha llenado una zanja a cielo abierto, como se muestra en la fig. B.3.2. Cuando está en posición, la tubería se llena de agua y se hunde hasta el fondo de la zanja. En este momento puede comenzarse el relleno. Si las aguas son profundas y la zanja no se ve desde la superficie, se ha de indicar la ruta mediante boyas.

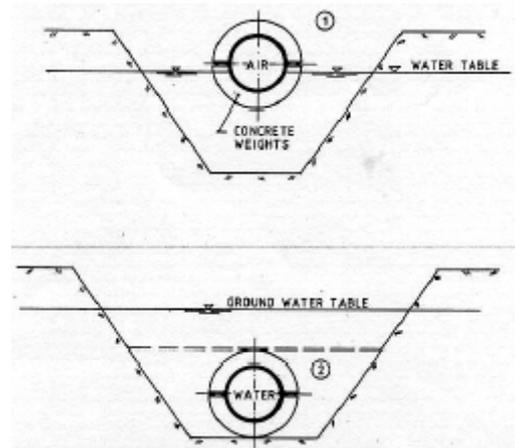


Fig. B.3.2 Instalación en zanja

La excavación de una zanja en suelo submarino blando se puede hacer utilizando chorros de aire o agua para extraer el material, que es aspirado mientras se anega la zanja. No obstante, las excavadoras montadas sobre pontón son más eficaces y tienen mayor capacidad.

La profundidad de la zanja depende del diámetro de la tubería. Valores recomendados de H, en condiciones normales (véase la fig. B.3.3):

- $D_0 \leq 500 \text{ mm} \quad H = 1,75 \rightarrow 2,0 \text{ m}$
- $D_0 \leq 1000 \text{ mm} \quad H = 2,25 \rightarrow 2,5 \text{ m}$
- $D_0 > 1000 \text{ mm} \quad H = 2,5 \text{ m}$

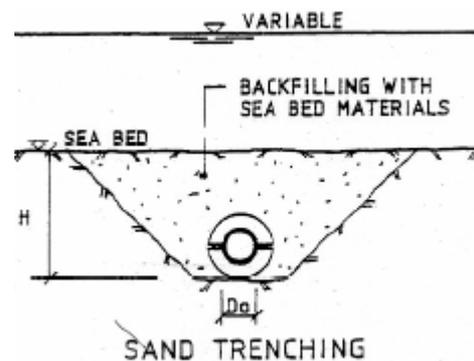
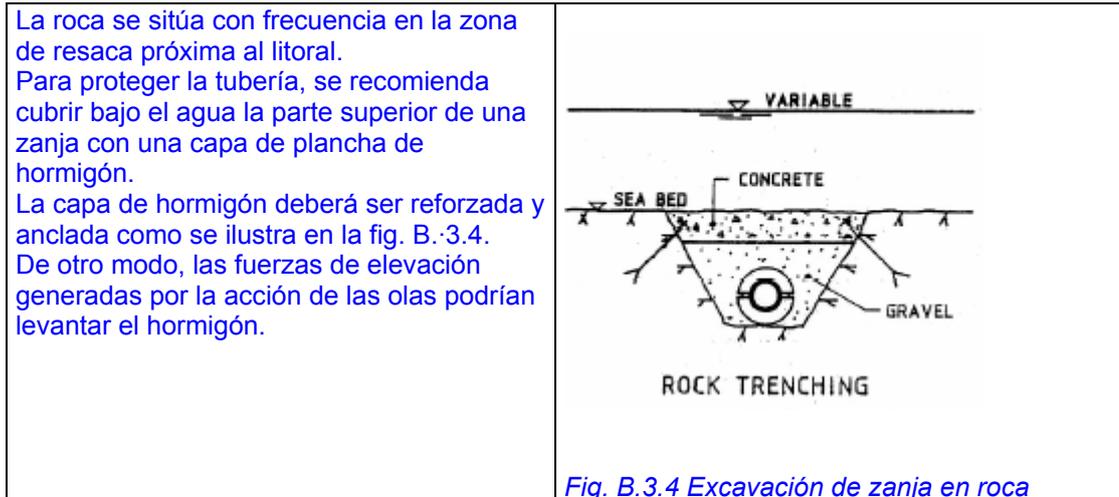


Fig. B.3.3 Profundidad de la zanja en suelo

Para el relleno se utilizará material del lecho marino (depósitos) o grava. Una vez tendida la tubería, se ha de devolver el lecho a su estado original. Si no, el oleaje y las corrientes marinas erosionarán el perfil modificado.

En zonas en las que el lecho marino está expuesto a la erosión se deberán utilizar gaviones llenos de grava como medio de protección.

La fig. B.3.4 ilustra la excavación de una zanja en roca. La excavación de zanjas en roca es considerablemente más costosa que la excavación en suelo blando.



Como alternativa, se pueden utilizar para el mismo fin gaviones llenos de grava.

La tubería deberá contener un relleno de grava o roca triturada con un alto grado de autocompactación, por ejemplo $d = 22 \rightarrow 32$ mm.

B.3.2 Tendido de tuberías en el lecho marino

Este procedimiento se ha descrito y calculado brevemente en el capítulo 0.2 y en A.5. Antes del hundimiento se ha de elaborar un procedimiento del mismo que tenga en cuenta todas las situaciones relevantes que pueden suceder durante la instalación. Una tubería submarina se construye soldando tramos individuales de tubería de entre 10 y 25 m en una cadena o "sección" o mediante la ampliación continua de largos tramos en fábrica.

Una cadena o sección habrá de ser tan larga como sea posible, pero su longitud total depende del espacio disponible en el emplazamiento. En general, los largos posibles de manejar en la práctica son:

L (sección) = 500 \rightarrow 700 m

En el caso de producción de tramos largos, cada cadena o sección podría tener una longitud total de:

L (sección) = 500 \rightarrow 700 m

dependiendo del diámetro de la tubería y las condiciones de remolque (mar abierto, condiciones meteorológicas, etc.).

Las tuberías deberán llevar unos lastres de contrapesos de hormigón. Los lastres se pueden unir antes de lanzar al mar la tubería, o en un pontón si se entrega en tramos largos.

Las tuberías remolcadas a un emplazamiento de trabajo deberán almacenarse en posición flotante, en un lugar protegido del viento y del oleaje, y las secciones deberán quedar bien ancladas.

Los contratistas de servicios submarinos cualificados tienen capacidad para fijar contrapesos de hormigón al tramo flotante de la tubería.

Las figs. B.3.5 y B.3.6 muestran cómo se instala una tubería submarina en el lecho marino.

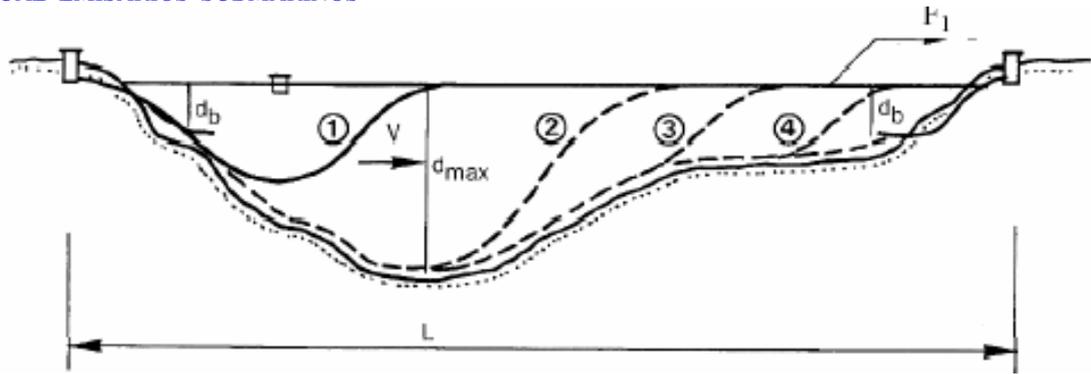


Fig. B.3.5 Instalación principal de una tubería de transporte

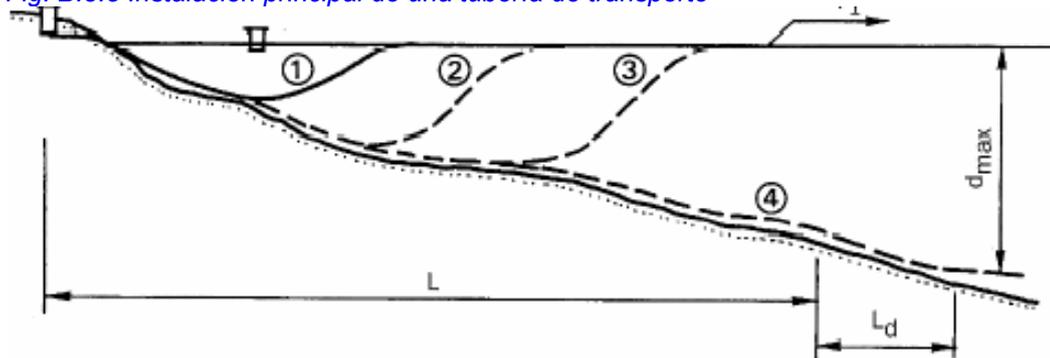


Fig. B.3.6 Instalación principal de una toma o un emisario submarino.

Los sistemas de tuberías se hunden en dirección de la costa hacia el extremo más exterior, o el otro lado del agua. Normalmente se hunde la tubería entera en una operación. Si las condiciones ambientales son adversas y varían de mar en calma a mar encrespado, la tubería se podría instalar en secciones, paso a paso. Por razones prácticas, también puede resultar conveniente instalar la tubería en secciones.

Después de hundir un tramo, el extremo embridado reposa sobre el lecho marino. En un periodo de calma, se llena la tubería de aire para elevar el extremo a la superficie, y prosigue el hundimiento, en cuanto el siguiente tramo esté unido a la brida. Durante la conexión deberá aplicarse una fuerza de tracción para evitar el pandeo.

También existen otros métodos para unir tramos de tuberías en un hundimiento paso a paso. Dependiendo de los recursos del contratista en la superficie y bajo el nivel del mar, la conexión puede tener lugar en el lecho marino, a una profundidad media o en la superficie.

Pueden ser necesarios tramos cortos de tubería para la conexión entre los extremos de las secciones en el lecho marino que dependen del método de hundimiento. Los buceadores instalan esas piezas después de que haya tenido lugar el hundimiento y los tramos se basan en una vigilancia exacta.

Durante el hundimiento de una tubería, se puede llenar de agua de una de las siguientes formas:

1. Brida ciega con válvula situada en tierra, y abastecimiento de agua mediante bomba o toma de agua.
2. Brida ciega con válvula submarina, situada a una profundidad de entre 2 y 5 metros, con llenado directo de agua al abrir la válvula
3. Brida ciega con válvula en la cámara de entrada/salida, la tubería conectada a una brida distinta en el muro de cámaras.

Deberá regularse la velocidad de hundimiento, v , y no deberá ser superior a la v_{\max} calculada (véase A.5.3).

En el extremo más exterior debe haber un dispositivo de válvulas para el escape de aire y el control de la presión y un compresor para el llenado de aire.

La fuerza de tracción, $F1$, y la presión atmosférica interna deberán aplicarse conforme a los cálculos realizados en los capítulos A.5.1 y A.5.2.

Deberá comprobarse y registrarse la velocidad del hundimiento durante éste. Si la velocidad es demasiado alta, deberá ajustarse la presión interna. La fuerza de tracción puede ser constante o puede ajustarse a la profundidad del agua.

Antes del hundimiento, asegúrese de que:

- se han vuelto a asegurar los tornillos a su par final. Esto se aplica a los tornillos de los contrapesos de hormigón y a los de las uniones mediante bridas.
- todos los contrapesos de hormigón están en sus posiciones/lugares correctos; verifíquelo mediante medición.
- todos los dispositivos auxiliares se encuentran a mano, entre otros:
- manómetro, incrementos de 0,01 bar
- válvulas de toma de agua de diámetro apropiado
- bridas ciegas equipadas con válvulas de aire, de 1" a 2" (entrada/salida)
- válvula de toma de agua (entrada/salida)
- compresor de capacidad y presión suficientes
- finalmente, una bomba de agua de capacidad y presión suficientes

Deberá estar disponible un remolcador u otra embarcación para proporcionar la fuerza de tracción necesaria. Deberá conocerse con exactitud la potencia de su motor a toda máquina, hasta dentro de un 10%.

Los remolcadores pequeños u otras embarcaciones se pueden utilizar para proporcionar un control transversal de la tubería flotante según se encuentra colocada a lo largo de la ruta.

La experiencia demuestra que el hundimiento de una tubería de PE es habitualmente "pan comido" si la planificación es buena, los recursos son suficientes y se tienen en cuenta las condiciones meteorológicas.

Autor : Tom A. Karlsen, Interconsult ASA

Lista de referencias :

- [1] **Lars-Eric Janson and Borealis**
Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal, 1995
- [2] **Svensk Byggetjänst 1983**
ISBN 91-7732-186-9
Rörbok yttre rörledningar
- [3] **Frank M.White**
Fluid Mechanics, 1986
ISBN 0-07-069673-X
- [4] **Lars-Eric Janson**
Plaströr i VA-tekniken, 1971
- [5] **Aksel Lydersen**
Kjemiteknikk, 1972
ISBN 8251900085
- [6] **PRA 5.1, Vassdrags- og havnelaboratoriet**
Ytre krefter på utslippsledninger, 1975
- [7] **AS Byggemästarens Förlag**
Bygg, huvuddel 1A og 1B
Allmänna grunder, 1971
- [8] **Lars-Eric Janson and Jan Molin**
Design and installation of Buried Plastic Pipes,
ISBN 87-983636-0-3
- [9] **Thor Meland**
Dimensjonering av fleksible rør i senkefasen og under drift
NIF-kurs 1979
- [10] **NOU 1974:40**
Rørledninger på dypt vann
- [11] **Mabo, Einar Gann-Meyer**
Polyethylene Pipe Systems
Handbook, 1997
- [12] **Ian Larsen: Marine Waste Water Discharges 2002**
Design of marine PE pipes for transient and long-term under-pressure
- [13] **Ian Larsen: Marine Waste Water Discharges 2000**
Controlling and installation of marine outfalls of large diameters PE pipes
- [14] **Ian Larsen: Senking av HDPE ledningar. Dykarseminarium 1999, Bergen.**
- [15] **Torstein Langgård: Installation of offshore pipelines, sinking procedure,**
Sogusku –
Kumkøy, 1998.