

“Criterios de Diseño, Cálculo y Selección de Tuberías en Base al Criterio de las Prestaciones Equivalentes”

**Ing. Luis E. PÉREZ FARRÁS
Ing. Sandra PÉREZ**

Marzo de 2007

INDICE

GENERALIDADES **1**

FUNDAMENTOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN SOBRE EL CONCEPTO DE CLASE DE UNA TUBERÍA **2**

1- OBJETIVOS Y GENERALIDADES	2
2- CONCEPTO DE PRESIÓN DINÁMICA	2
3- ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA HIDROSTÁTICA	5
4- CONCEPTO DE PRESIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA	8
5- SOLICITACIÓN DEBIDA A LA PRESIÓN INTERNA EN UNA TUBERÍA	10
6- CONSIDERACIÓN DE LAS SOBREPRESIONES POR "GOLPE DE ARIETE" EN RELACIÓN CON LA "CLASE" DE UNA TUBERÍA	12
CONCEPTOS Y DEFINICIONES DE INTERÉS PRÁCTICO	17

CRITERIO TRADICIONAL DE SELECCIÓN DE TUBERÍAS **21**

CRITERIO MODERNO DE SELECCIÓN DE TUBERÍAS **22**

CONCEPTO DE "PRESTACIÓN EQUIVALENTE" Y CONSECUENCIAS INMEDIATAS **26**

PRESTACIONES A CUMPLIR POR LAS TUBERÍAS **30**

PRESTACIÓN 1: VERIFICACIÓN DE CAUDALES PARA LOS DISTINTOS MATERIALES	31
CÁLCULO DE CAUDALES	31
INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS TUBERÍAS EN LOS CAUDALES RESULTANTES	34
PARTICULARIDADES DE LOS ESCURRIMIENTOS A SUPERFICIE LIBRE	36
PRESTACIÓN 2: VERIFICACIÓN DE PRESIONES EN RÉGIMEN PERMANENTE	43
RESISTENCIA DE LAS TUBERÍAS A LA PRESIÓN INTERNA	43
PRESTACIÓN 3: VERIFICACIÓN DE PRESIONES POR GOLPE DE ARIETE	48
DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	48
MÉTODOS DE ATENUACIÓN DEL FENÓMENO	49
INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA EN EL FENÓMENO	58
PRESTACIÓN 4: VERIFICACIÓN CONSIDERANDO LAS CARGAS DEBIDAS AL RELLENO	60
GENERALIDADES	60
IMPORTANCIA DE LA ZANJA	62

*“Pautas para el Diseño, Cálculo y Selección de Tuberías en
Base al Criterio de Prestaciones Equivalentes”*

ECUACIONES DE MARSTON	63
PRESTACIÓN 5: VERIFICACIÓN CONSIDERANDO LAS CARGAS DEBIDAS AL TRÁNSITO	66
GENERALIDADES	66
REFERENCIA A LA TEORÍA MODERNA SOBRE CÁLCULO ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS INSTALADAS EN ZANJA	75
PRESTACIÓN 6: VERIFICACIÓN AL ATAQUE CORROSIVO EXTERNO Y/O INTERNO	78
CORROSIÓN EN TUBERÍAS DE MATERIAL CEMENTICIO	78

PAUTAS PARA EL DISEÑO, CÁLCULO Y SELECCIÓN DE TUBERÍAS EN BASE AL CRITERIO DE PRESTACIONES EQUIVALENTES

GENERALIDADES

En general nos encontramos con el hecho de que en el mercado compite un determinado número de tuberías de distintos materiales y, por otra parte, no han sido todavía, convenientemente difundidas las reglas precisas que posibilitan la selección más adecuada a los requerimientos de cada proyecto en particular, la que queda supeditada a criterios o simpatías de los proyectistas, las más de las veces, sin fundamentos en criterios ingenieriles.

Es el objetivo del presente trabajo tratar de clarificar los conceptos que deben ser tenidos en cuenta, para poder lograr una decisión correcta a la vez que económica, y que además, asegure eficientemente la prestación del servicio requerido.

Si se tiene en cuenta que en los proyectos del denominado “Saneamiento Básico”, el ítem “Tuberías Instaladas”, representa en la mayoría de los casos el porcentaje más elevado de las inversiones a realizar (alrededor del 70%), surge claramente la ventaja económica de una selección apropiada de los materiales a seleccionar.

Por otra parte las teorías y metodologías disponibles actualmente, muchas de ellas contempladas en las exigencias normativas de cálculo, selección e instalación de tuberías, configuran un vasto campo de información ingenieril, que constituye de por sí una especialización profesional, de gran importancia en el futuro mediato, si se tienen en cuenta las inversiones que nuestro país está obligado a realizar en los próximos decenios en el área del saneamiento básico.

Tan vasta es la información técnica de referencia, que su aplicación exitosa es solo posible en nuestros días, gracias al prodigioso avance de las modernas computadoras y sobre todo de la disponibilidad de las mismas y de los programas de cálculo adecuados por parte de los proyectistas.

El fundamento del presente texto, se sintetiza en la comparación del criterio tradicional de selección, confrontado con el criterio moderno que en el desarrollo del mismo se expone. Por cierto, no se pretende profundizar los conceptos a los que se hará referencia, los que deberán ser encontrados en la bibliografía especializada, sino ilustrar acerca de la problemática y las maneras de atacarla.

FUNDAMENTOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN SOBRE EL CONCEPTO DE CLASE DE UNA TUBERÍA

1- OBJETIVOS Y GENERALIDADES

En el presente texto se tratarán conceptos de interés íntimamente relacionados con la problemática de la selección de las tuberías.

En especial se analizará y revisará el concepto de “clase de una Tubería”, aprovechando la oportunidad para precisar el origen técnico de su fundamento y además formular las críticas del caso, para quienes, en la selección de las tuberías entre la variedad que ofrece el mercado, consideran a la “clase” como el criterio único y por excelencia, para la adopción del material de las mismas.

Se adelanta, o se recuerda, que el concepto de “clase” está relacionado **únicamente** con la sollicitación debida a la “presión interna” en régimen permanente o en reposo. Las sollicitaciones por “Golpe de Ariete” y por “Cargas externas”, deberán también ser consideradas e implicarán la verificación de la “clase” seleccionada.

Para probar los conceptos y las definiciones de referencia, **que constituyen el objetivo central**, se utilizan conceptos de la Hidráulica Básica, **que se reproducen con cierto grado de profundidad**.

2- CONCEPTO DE PRESION DINAMICA

Se recuerda la expresión de Bernoulli, que está dada por:

$$H = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g} + \Delta J_{1-2}^* = Z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{U_i^2}{2g} + \Delta J_{i-j}^* = \text{cte}$$

La anterior implica que la energía total H, con respecto a un plano de comparación arbitrario, se mantiene constante entre las secciones de una conducción caracterizadas por los subíndices 1,2,...,i, aunque la suma de los términos que la componen resultan variables de sección a sección.

Se recuerda también que, la ecuación anterior, sirve para definir las líneas de “energía” y “piezométrica”, a la vez que para interpretar el “Principio de la Conservación de la Energía”, para el caso del escurrimiento de líquidos a presión, y el agua en particular, **con una destacable sencillez**, por el hecho que el agua

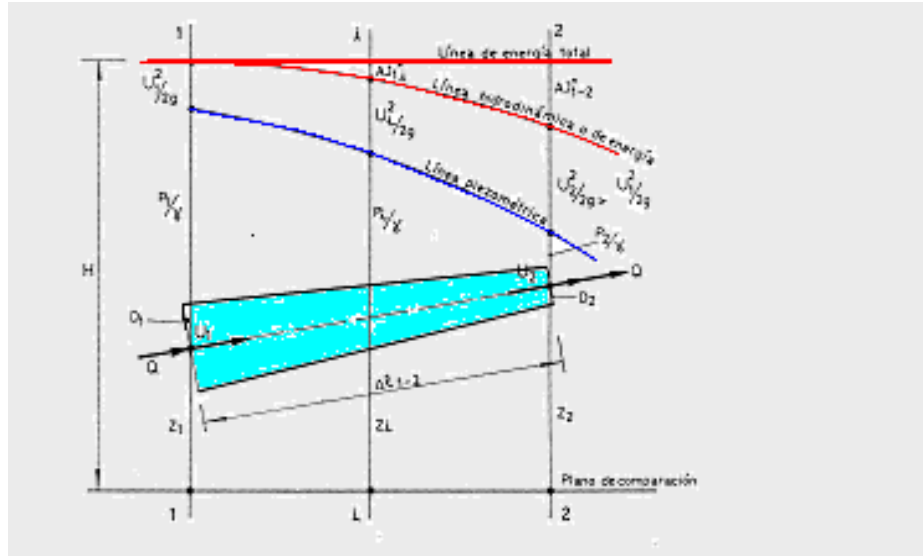


Figura 1

Interpretación de la Ecuación de Bernoulli para el escurrimiento permanente y variado

puede ser considerada “incompresible” a los efectos de la práctica, en los escurrimientos permanentes (independientes del tiempo).

En la figura se evalúa, a la vez que se interpreta físicamente, la expresión para un caso hipotético de una conducción de D variable (disminuyendo en el sentido del eje) e inclinada para mayor generalidad, con lo que los Z_i resultan también variables.

A la línea que se obtiene de deducir de la energía total el término ΔJ^* , se la denomina “**Línea hidrodinámica**” y brinda en cada sección la **energía hidráulica remanente** del fluido que escurre, en relación con el plano arbitrario de referencia elegido. Si además se descuenta el valor $U^2/2g$ obtenemos la “**línea piezométrica**”, la que brinda la energía potencial del líquido en cada sección, siempre con respecto al plano arbitrario de comparación.

La variación de ΔJ^* tiene lugar con el cuadrado de la velocidad media según prueba la teoría y la experiencia.

La igualdad de los segmentos que constituyen la energía total, en una u otra sección, implican la interpretación del principio de la conservación de la energía en

una forma gráfica y evidente, y la diferente magnitud de los segmentos representativos de las distintas componentes de la misma, permiten las comparaciones y cálculos de gran utilidad para el cálculo Hidráulico de las conducciones en régimen permanente.

En ese caso, cuando el régimen es permanente y además el diámetro se mantiene constante en el recorrido, **el escurrimiento se denomina uniforme**, y es éste precisamente, el caso que posibilita el cálculo hidráulico de las conducciones, sean éstas “a presión” o a “superficie libre” (canales). Obviamente hasta el presente nos ocupamos de la problemática de las del primer tipo.

En la Figura 1 se esquematiza el Escurrimiento Uniforme para una conducción inclinada para obtener así mayor generalidad (se reproduce la ya publicada oportunamente) para recordar los conceptos rectores y la interpretación de la ecuación de Bernoulli vital para el desarrollo que sigue.

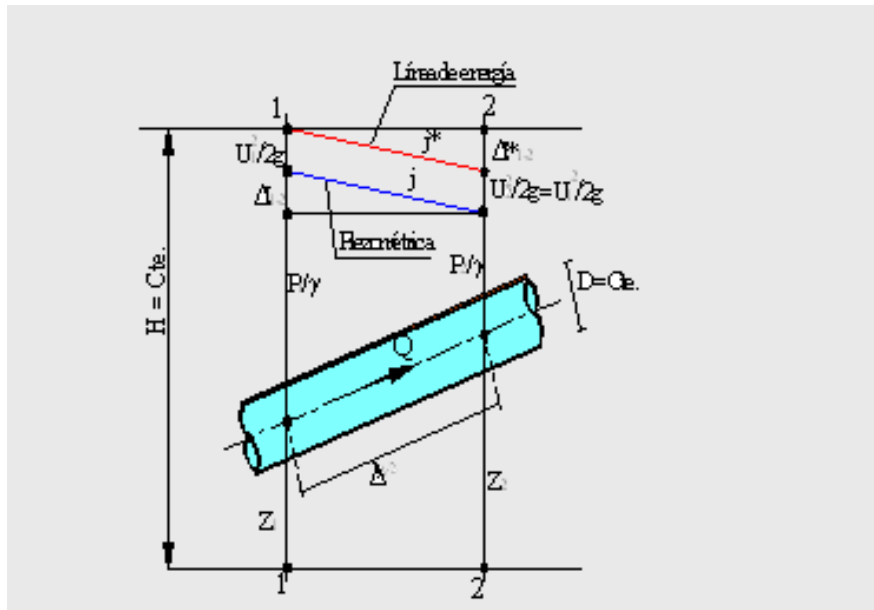


Figura 2

Escurrimiento Uniforme en conducciones a presión

Se destaca que al no variar el diámetro la velocidad media permanece constante, en consecuencia, $j^* = j$ habrán de variar linealmente. Además, la piezométrica se dispondrá paralela y a una distancia $U^2/2g = cte$ de la línea de energía. A “j” se la denomina “pérdida de carga unitaria”, la cual multiplicada por la longitud del tramo $\Delta l_{i,j}$, dará la “pérdida de carga” en el tramo ij. **En el régimen uniforme ($D = Cte$) se cumple siempre que $j = j^*$.**

Todo este “repaso conceptual” previo es conducente para **definir a las presiones a lo largo de la conducción**, cuantificadas por los segmentos formados por la “línea piezométrica” y el eje de la misma (es decir los términos $\frac{p_i}{\gamma}$), **como las “presiones dinámicas”**, por ser las que corresponden al escurrimiento (sinónimo de movimiento) de un caudal determinado.

3- ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA HIDROSTÁTICA

La Hidrostática es el capítulo de la Hidráulica que estudia los líquidos en reposo. Sus aplicaciones en la Ingeniería en general, y en la Ingeniería Civil en particular, son diversas abarcando el amplio campo que va desde la determinación de fuerzas o solicitaciones que permiten diseñar las estructuras que los contienen, pasando por la medición en flúidos, hasta llegar a la problemática de los cuerpos sumergidos y en particular el equilibrio de los cuerpos flotantes, de tanta aplicación en la Ingeniería Naval.

Si de la expresión de Bernoulli se eliminan los términos función de la velocidad, es decir los que implican movimiento se obtiene la ecuación fundamental de la Hidrostática:

$$z_1 + \frac{p}{\gamma} = \text{cte}$$

En la que:

- z es la altura de la partícula considerada con respecto al plano de comparación.
- p es la presión en el plano horizontal de la partícula en estudio.
- γ es el peso específico del líquido (constante en la práctica).
- cte es un número que es siempre el mismo para todas las partículas y que representa la altura total en metros, sumando la de posición con la de presión.

La forma más conocida de la ecuación fundamental surge del siguiente análisis, el que se reproduce brevemente **a los efectos de: repasar los conceptos básicos y a la vez extrapolarlos a la aplicación en conducciones**, con el propósito de mostrar que es la misma expresión la que resuelve todos los problemas de la Hidrostática, a pesar de que no parecen similares a simple vista.

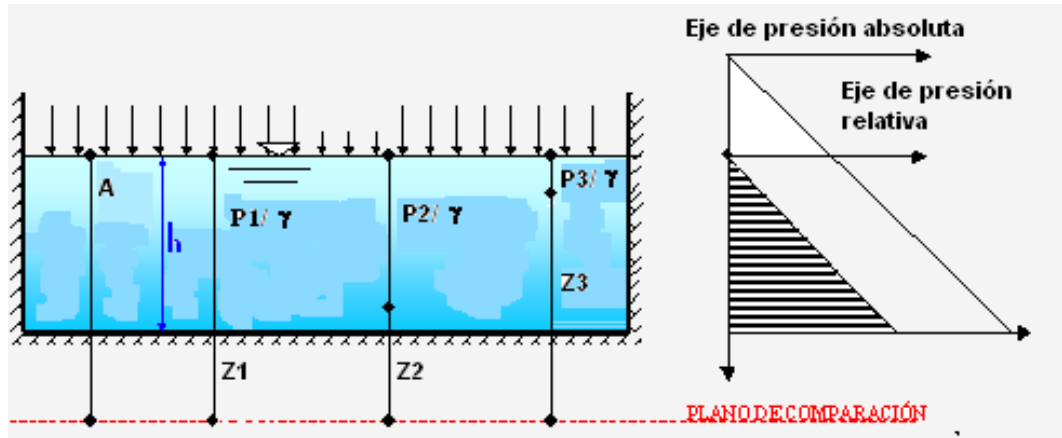


Figura 3

Interpretación de la Ecuación Fundamental de la Hidrostática

En la Figura 3 se aprecia un líquido en reposo, confinado en una estructura que le sirve de recipiente.

Sobre la superficie libre actúa siempre la presión atmosférica, por lo que podemos definir a las presiones como relativas cuando la misma no es considerada, o absoluta cuando si se la tiene en cuenta y se la suma a la primera. En términos generales, casi siempre se usa la presión relativa puesto que la presión atmosférica está siempre presente, es decir aparece en ambos miembros de las igualdades cuando la expresión fundamental se establece entre dos puntos o partículas. En los casos especiales (como cuando por ejemplo se procede a estudiar la tubería de aspiración de las bombas) se indicará que las presiones a considerar son las absolutas. **Cuando no se hace referencia a la misma, se entiende que las presiones a considerar son relativas.**

Las presiones absolutas se identifican con un subrayado en el símbolo correspondiente, por lo tanto se tiene que:

$$\bar{p} = p + \bar{p}_a \quad \therefore p = \bar{p} - \bar{p}_a$$

Haciendo el planteo en presiones relativas (lo que es lo más habitual en nuestra aplicaciones prácticas), se tiene que al plantear la ecuación entre los puntos 1 y 2 se obtiene:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} = \text{cte} \quad \therefore z_1 - z_2 = \frac{p_2 - p_1}{\gamma}$$

Es decir que:

$$z_1 - z_2 = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} \quad \therefore \quad p_2 - p_1 = \gamma (z_1 - z_2) = -\gamma (z_2 - z_1)$$

Por lo que:

$$\Delta p = -\gamma \Delta z$$

Si aplicamos las anteriores al punto A se tiene que:

$$p = \gamma h ; \text{ o en presiones absolutas ; } \bar{p} = \gamma h + \bar{p}_a$$

Nótese que las anteriores son ecuaciones de una recta con ángulo de 45°, en el gráfico se representan a las profundidades h con un eje vertical positivo en el sentido de las mismas y a las presiones con un eje horizontal. Si consideramos el valor “cero absoluto”, el eje origen se encuentra a una altura por sobre la superficie libre equivalente a la presión atmosférica, en cambio si consideramos el “cero relativo” el eje horizontal coincide con la superficie libre.

Para un determinado nivel z (o profundidad h), la presión no varía, por lo tanto el plano horizontal que implica se denomina “isobárico”.

En particular el plano isobárico sobre el que actúa la presión atmosférica (o la debida a otro gas, generalizando) se denomina “superficie libre”, la que obviamente por disponerse siempre horizontal, posibilita el concepto tan extendido de que “... **el agua busca siempre su nivel....**”. El famoso “Principio de los Vasos Comunicantes” queda por lo tanto convenientemente aclarado.

En efecto en la Figura 4 se aprecia como un líquido en reposo, presenta todos sus planos isobáricos a un mismo nivel z (independientemente de la forma del recipiente) y muy especialmente, el que representa su superficie libre.

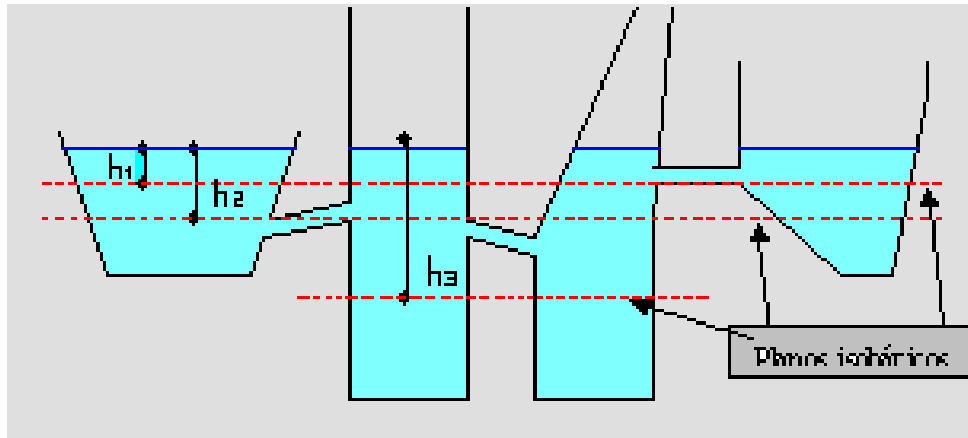


Figura 4
Principio de los vasos comunicantes

4- CONCEPTOS DE PRESIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA

Pasando de la forma más tradicional, a las aplicaciones en las conducciones, nos referimos a la Figura 5a, en la que se esquematiza el tanque de distribución de agua de una población relativamente pequeña, con la correspondiente tubería a presión de aducción que alimenta a la red de distribución.

El tendido de la conducción, prácticamente reproduce la topografía del terreno (elegida ex profeso accidentada a los efectos didácticos) manteniendo constante una “tapada H”. Es inmediata la interpretación del “principio de los vasos comunicantes” al caso de la tubería en condiciones estáticas, es decir con caudal nulo.

La interpretación de la ecuación fundamental de la Hidrostática es evidente, al interpretarse gráficamente la igualdad de los segmentos que representa en cada punto analizado. En efecto,

$$Z_A = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} = Z_3 + \frac{P_3}{\gamma} = Z_4 + \frac{P_4}{\gamma} = Z_5 + \frac{P_5}{\gamma} = \text{cte}$$

Nótese que si bien las sumas de los z_i y los p_i/γ dan valores constantes, en cada punto pueden resultar individualmente muy distintos. Evidentemente la presión a que estará sometida la tubería, denominada “**presión estática**” por ser la correspondiente al líquido en reposo, será distinta en el recorrido. Se intuye que el espesor de la misma resultará variable con el mismo al pretender un diseño económico de la instalación.

Resulta muy evidente que en condiciones dinámicas, las energías de velocidad o “cinética” y las pérdidas por frotamiento, surgirán e expensas de las energías totales disponibles. Como los términos z_i son inamovibles, en consecuencia, los referidos valores se descontarán inexorablemente de los términos de presión p_i/γ . **Por lo tanto la condición estática es más exigente para la sollicitación de la tubería que la presión dinámica.**

Es de destacar que cada vez que se obtura el caudal **se alcanza el nivel estático, por lo que ésta es la condición de diseño para conducciones a gravedad, es decir sin bombeos.**

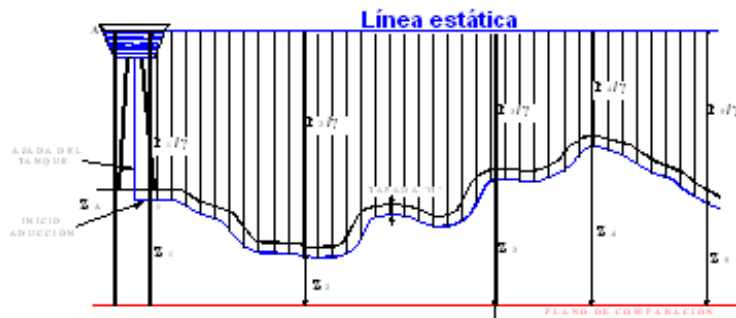


Figura 5a
Condición Estática

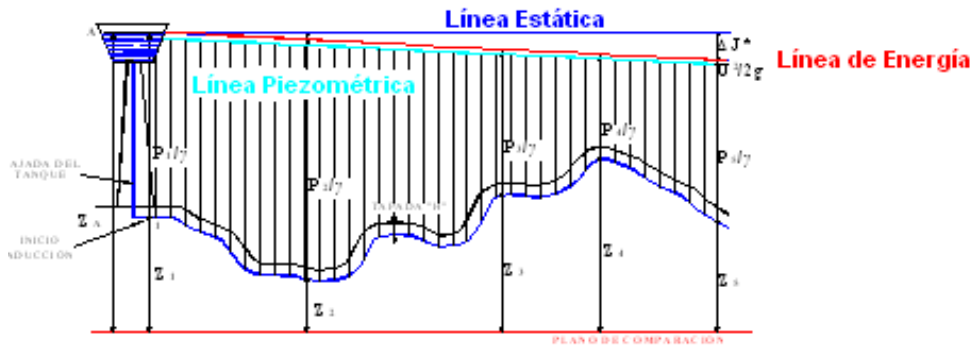


Figura 5b
Condición Dinámica

En la figura 5b se pueden apreciarse visualmente los conceptos analizados. En la misma se representan las líneas de energía y piezométricas para el caso de una demanda de caudal Q , la que obviamente es variable durante las horas del día

y con mayor pendiente a medida que crece Q (las energías cinética y las pérdidas crecen con el cuadrado de Q a expensas de las presiones).

En el caso de las impulsiones las condiciones varían.

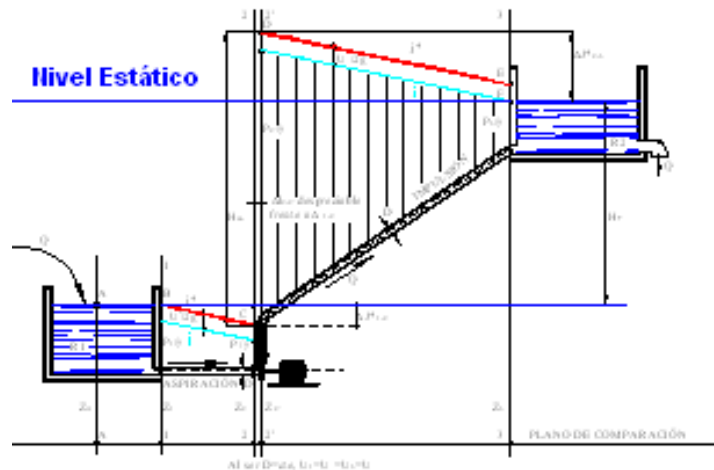


Figura 6
Presiones en impulsiones

En efecto, en el esquema de la figura 6 se puede apreciar claramente como la presión dinámica, es decir cuando escurre un caudal Q impulsado por la bomba, muestra una línea de energía superior al nivel estático impuesto por la cisterna de llegada cuando cesa el bombeo. Es a todas luces evidente que en el caso de las impulsiones, **la condición dinámica es la que impone el dimensionado de los espesores de las tuberías.**

5-SOLICITACIÓN DEBIDA A LA PRESIÓN INTERNA EN UNA TUBERÍA

La sollicitación debida a la presión interna en una conducción “a presión”, lleva a la expresión de Mariotte (o de las calderas) válida para materiales de las tuberías homogéneos. La misma relaciona, en una forma simple, el espesor con la tensión de tracción en la paredes de la tubería, lo que es fácilmente deducible del esquema de la Figura 7.

En la misma se aprecia un tubería a presión, seccionada por un plano horizontal que contiene al eje, lo que permite el tratamiento como “cuerpo libre” poniendo en evidencia a las sollicitaciones actuantes.

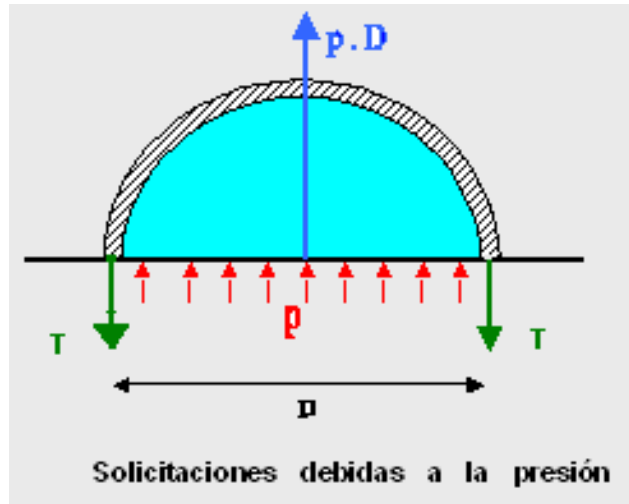


Figura 7
Solicitaciones debidas a la presión interna

El análisis a realizar se fundamenta en la simplificación de que, la distribución de tensiones que tendrá lugar en los espesores de la tubería, como respuesta a la sollicitación debida a la presión interna, **será uniforme**. Éste concepto implica considerar “tuberías de pared fina”, es decir de relativamente poco espesor frente al diámetro.

En la figura 7 se aprecia que la resultante de la presión distribuida en el diámetro deberá ser equilibrada por sendos esfuerzos de tracción, distribuidos **uniformemente** a su vez en el espesor de la tubería y configurando las dos fuerzas equilibrantes “T”.

En efecto, considerando una longitud unitaria de conducción ($L = 1 \text{ m}$) se tiene que:

$$p D = 2 T = 2 \sigma e$$

De donde:

$$e = \frac{p D}{2 \sigma}$$

En la que:

- e es el espesor de la tubería de material homogéneo.
- p es la presión actuante en el plano horizontal que contiene al eje.
- σ es la tensión de trabajo del material.

Los fabricantes de tuberías de materiales homogéneos adoptan valores de rotura para la presión interna y para la tensión de tracción, lo que posibilita la determinación del espesor, considerando previamente los correspondientes “Coeficientes de Seguridad”. Como a cada espesor le corresponde una sollicitación admisible, ofrecen al mercado una serie estandarizada de tuberías aptas para resistir, en condiciones de régimen permanente, una determinada serie de presiones fijadas de antemano, **éstas presiones definen las denominadas “Clases” de las tuberías.**

La expresión anterior representa la forma más simple de cuantificar los conceptos que posibilitan el cálculo de los espesores, pero no es la única ni exclusiva. En efecto, los fabricantes adoptan expresiones, que si bien son similares en lo conceptual, se adaptan más convenientemente a las propiedades geométricas y mecánicas de sus materiales y de su tecnología, aplicando, muchos de ellos, sumandos o coeficientes correctivos.

Otras industrias, usan actualmente la expresión más exacta obtenida de la **“Teoría de las tuberías de pared gruesa”**.

En ese caso la deducción, fundada en la “Teoría general de la elasticidad”, es notablemente más compleja, al ser considerada la distribución no uniforme en el espesor y sobre todo el hecho de que las tensiones en un sentido, con su correspondiente deformación, inducen tensiones en los dos ejes restantes del espacio, con deformaciones compatibles (afinamiento del espesor en correspondencia con el estiramiento correspondiente al esfuerzo de tracción y la situación inversa para el caso de compresión).

La elaboración de las expresiones diferenciales y su consecuente integración, llevan a la siguiente relación que acota a la realidad con mayor aproximación:

$$e = \frac{p D}{2\sigma - p}$$

En comparación con la expresión anterior, basada en las tuberías de pared fina, los valores numéricos de los espesores resultan ligeramente superiores.

6- CONSIDERACIÓN DE LAS SOBREPRESIONES POR “GOLPE DE ARIETE” EN RELACIÓN CON LA “CLASE” DE UNA TUBERÍA

Las sobrepresiones originadas en los movimientos transitorios, positivas o negativas, obligan a la verificación del espesor o de la “Clase” de una tubería, pero debe aclararse que éste concepto corresponde a la sollicitación por presión interna

en régimen permanente (o en condiciones estáticas como caso particular). El tratamiento de verificación a los movimientos transitorios debe tratarse en base a los conceptos que se desarrollan a continuación.

Cuando se construye una conducción a presión, la comprobación de la bondad de la obra realizada se concreta a través de las denominadas “Pruebas Hidráulicas”. Las mismas consisten en probar un tramo de longitud preestablecida (del orden de los 300m), con la tubería enterrada, excepto en las uniones (donde son más probables las pérdidas) y a presiones también prefijadas en función de la clase, durante un tiempo también predeterminado.

En las aplicaciones sanitarias en nuestro medio, se ha difundido la adopción de presiones de prueba hidráulica de 1,5 veces la Clase de la tubería del tramo en prueba.. La antigua Obras Sanitarias de la Nación (O.S.N.), difundió a lo largo de su dilatada existencia el valor de prueba señalado, para las instalaciones con conducciones a presión que en general no sobrepasaban las presiones de 10 atmósferas, pero que en determinadas y excepcionales ocasiones (acueductos importantes) llegaban inclusive a duplicar esa cifra.

Las preguntas que surgen lógicamente serían ...¿ Por qué probar a una presión tan superior a la de trabajo?...¿No constituye una exigencia exagerada?... Las respuestas a éstos interrogantes surgirán naturalmente del desarrollo que sigue.

En realidad, la presión de prueba dá lugar a una revancha de la tubería, para absorber las sobrepresiones debidas al Golpe de Ariete, hasta en un 50 % de la clase, según la tradición impuesta por OSN. Para probar lo aseverado nos referiremos a los siguientes conceptos relacionados con los movimientos transitorios en las conducciones a presión.

Se recuerda que los tiempos de cierre de las válvulas o de detenimiento de las bombas influyen en la magnitud máxima de las sobrepresiones por “Golpe de ariete”.

En efecto, si el tiempo T_M de la maniobra de cierre, es menor que $T_c = \frac{2L}{c}$, denominado “tiempo crítico” (que es el que tarda la onda en ir y volver al obturador), **la máxima sobrepresión** puede alcanzar el valor dado por la famosa expresión de Allievi:

$$\Delta h = \frac{cU}{g}$$

Donde:

- c es la celeridad de las ondas en la conducción (que dependerá del material de la misma entre otras cosas).
- U es la velocidad media del fluido durante el régimen permanente.

- g es la aceleración de la gravedad.

Es el caso de los cierres “bruscos” de válvulas, de los cuales el “cierre instantáneo” es un caso particular.

En el caso de "cierre lento" ($T_M > T_c$), el cálculo de la sobrepresión es algo más engorroso, a menos que se adopte la hipótesis de “maniobra lineal de cierre”, la que conduce a la famosa expresión de Michaud, que para una conducción de longitud “L” es:

$$\Delta h = \frac{2 L U}{g T_M}$$

El método semiempírico desarrollado por el profesor ANGUS en los años treinta, permite calcular la máxima sobrepresión (en metros de columna de agua) producido por el cierre de las válvulas usuales en ese entonces (esclusas). Dicha sobrepresión máxima habría de producirse en el instante:

$$t = t_0 + T = t_0 + \frac{2L}{c}$$

y está dada por la expresión:

$$\sqrt{H} = \sqrt{\left[\frac{m}{2} \left(1 - \frac{T}{t}\right)^2 + 1 + m - \frac{m}{2} \left(1 - \frac{T}{t}\right) \right]}$$

En la que: $H = \frac{H_T}{H_0}$ y $m = \frac{c U}{g H_0}$

Siendo:

- H_T la altura máxima, en metros de columna de agua, a la se que llega en el tiempo $t = t_0 + \frac{2L}{c}$ en la sección del obturador.
- H_0 la altura de presión en régimen permanente en la misma sección.

Si se tiene en cuenta que los valores prácticos de m varían entre 0.5 y 7.5, lo que se obtiene asumiendo que $g \cong 10 \text{ m/s}^2$; $c \cong 1.000 \text{ m/s}$ y las velocidades pueden variar entre 0.6 y 3 m/s con una altura inicial que oscila entre 40 y 120 m, la

expresión anterior es representable para distintos valores de m , tomando al cociente entre los tiempos de maniobra y el crítico como la variable independiente (abscisas) y a H (cociente entre alturas máxima y estática) como la variable dependiente (ordenadas).

En resumen, en la Fig. 8 se han trazado una serie de curvas en el diagrama de ordenadas $H = H_T/H_0$ y abscisas t/T , caracterizada cada curva por un valor del parámetro m . El gráfico es válido cuando los tiempos de cierre son mayores que T_c , **es decir para los casos de cierre lento.**

La parte izquierda de las curvas, aproximadamente hasta el valor de t/T de 1,5 corresponde generalmente al caso de repentinas fallas de potencia en bombas. La parte derecha, especialmente a partir del valor $t/T = 5$ corresponde al caso de cierre con válvulas tradicionales (esclusas).

Nótese que la tendencia asintótica de la curva para las abscisas suficientemente alejadas, **es justamente 1.5, lo que justifica plenamente que en el ámbito de las obras sanitarias (y no solo de nuestro país) se haya adoptado el valor de referencia**, el que ha sido tenido en cuenta por decenas de años en los pliegos licitatorios (aún hoy es común que aparezca la especificación de referencia en obras sumamente importantes e incluso en altas presiones).

En general las normas de aplicación para los distintos materiales del mercado, actualmente, disminuyen las exigencias al aumentar las presiones de trabajo, a cambio, tácitamente de un estudio más exacto de las instalaciones y dispositivos antiarriete que aseguren que las revanchas adoptadas no sean sobrepasadas por los movimientos transitorios.

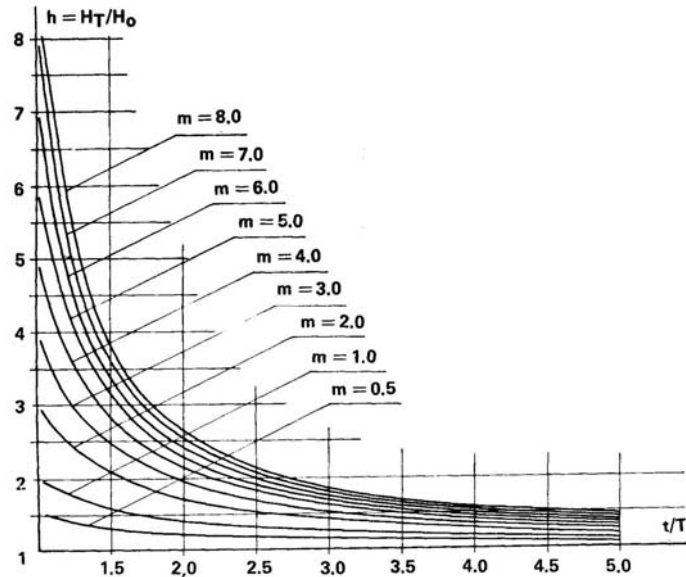


Figura 8

Relación entre sobrepresiones máximas y tiempos de cierre

En particular para las conducciones de PRFV, la presión de prueba hidráulica exigida por las normas (PMA) es de 1.4 la clase de la tubería y disminuye para presiones muy altas. Para las tuberías de Hormigón Postesado con alma de acero, cuando el comitente no impone su presión de Prueba en Zanja, también especifica 1.4 de la clase.

En resumen y generalizando se puede escribir que la presión de prueba hidráulica en zanja, la que podemos definir también como PMA (Presión Máxima Admisible en movimientos transitorios sin dispositivos antiarriete) es:

$$PMA = \xi C$$

En la que ξ es un coeficiente que depende del material, los criterios normativos vigentes para el material de que se trate y, eventualmente, la exigencia del proyectista o del comitente. Obviamente C representa la “clase” de la tubería en análisis.

CONCEPTOS Y DEFINICIONES DE INTERÉS PRÁCTICO

Presión de trabajo, es la máxima presión – estática para instalaciones “a gravedad” o dinámica para “impulsiones”- que habrá de soportar la tubería en condiciones normales de trabajo sin tener en cuenta los movimientos transitorios (Golpe de Ariete).

De los conceptos anteriores surge el concepto de **“Clase de una tubería”, como la presión máxima en régimen permanente de servicio (impulsiones), o en condiciones estáticas (instalaciones a gravedad) que el fabricante de la misma garantiza que puede soportar.**

Obviamente debe cumplirse que la **Clase debe ser igual o superior a la Presión de Trabajo.**

Su valor multiplicado por el “coeficiente de seguridad” (estipulados por normas para los distintos materiales) brinda las presiones de rotura mínima que los materiales deberán superar en los ensayos prefijados por las normas para cada material en particular.

En general, los fabricantes ofertan series de tuberías discriminadas por diámetro y clases, siendo éstas acotadas por un número entero que representa el máximo de las presiones admisibles en atmósferas que puede resistir en condiciones de trabajo en régimen permanente o estático.

Cada fabricante se caracteriza por la serie de diámetros y clases, por ejemplo el PVC, en clases 4; 6 y 10, el Fibrocemento en clases 3; 5; 7,5; 10; 12; 14 y 18, el PRFV en clases 2,5; 3; 6; 10 y 16, etc.

“Tuberías Estandar”, constituyen las series que publican en sus catálogos los fabricantes discriminadas en diámetro y clases.

“Tuberías especiales”, son las que se fabrican para solicitudes especiales y no están consideradas en los catálogos.

Es oportuno destacar que algunos fabricantes producen sólo tuberías especiales y otros lo hacen a pedido, a partir de determinado diámetro y/o clase. Las limitaciones de referencia encuentran su explicación en posibilitar la mejor competencia en las licitaciones o compulsas de precios.

En efecto, a medida que el diámetro crece los precios crecen en importancia, por lo que las condiciones de competencia en esos diámetros, los que además generalmente implican obras de relevancia, llevan a dimensionar de acuerdo a las necesidades. Como ejemplo gráfico, es evidente que si la necesidad implica una presión máxima de trabajo de 5.2 atm, resulta poco competitivo saltar en la selección a la clase superior, que podría ser de 7 (depende del material de que se trate), puesto que quedaría en clara desventaja con el oferente que propone su tubería expresamente para clase 5.2.

También, en diámetros poco importantes, determinados fabricantes ofrecen tuberías con espesores a medida (a pesar de que ofrecen catálogos con espesores estandarizados) cuando la dimensión de la provisión lo justifica.

La **Presión Máxima Admisible**, es la correspondiente a la “Presión de prueba en zanja” (en instalaciones medias de la Ingeniería Sanitaria 1.5 la clase), la que, al ser una presión alcanzada para probar la bondad de la obra garantiza que los transitorios hasta ese valor serán soportados por la tubería sin necesidad de dispositivos especiales anti-ariete.

De todo lo expuesto previamente se deduce que el concepto de “Clase” de una tubería está restringido a las conducciones a presión y está **fundamentado en la solicitud “Presión Interna”**, en régimen permanente o estático como caso particular.

Pero las tuberías instaladas en zanja están sometidas a las solicitudes externas actuantes debidas al relleno y al tránsito.

Evidentemente, el material de relleno habrá de ejercer una acción o solicitud sobre la tubería que tenderá a deformarla (ovalizarla) en función de las características elásticas de la misma y del suelo de apoyo. Obviamente la intensidad de la solicitud dependerá de las características del suelo del relleno y de apoyo y de la “Interacción Zanja-Tubería” (Cobra especial sentido la consideración relativa a la mayor o menor deformación de la tubería, según se comporte ésta como rígida o flexible).

En efecto, **a la solicitud por presión interna en régimen permanente, la que en realidad nos posibilita la “Preselección”** de la “clase” de la tubería, deberá agregarse la verificación de las solicitudes externas debidas a las cargas de relleno y tránsito, que incidirá sobre la conducción en función de las dimensiones y características de la zanja, y de las propiedades mecánicas del suelo y del material constituyente de la tubería.

Por otra parte, desde que la tubería requiere Regulación o que puede constituir una Impulsión, es evidente que deberá ser evaluado el siempre complejo problema de los movimientos transitorios, más conocido por la denominación de “Golpe de Ariete”. Problemática que se presenta en forma distinta en las tuberías rígidas o flexibles, pero que siempre es necesario tener en cuenta no sólo para evaluar las sobrepresiones en el caso de las primeras y las depresiones para el caso de las segundas (que son susceptibles al colapso por “Aplastamiento”) sino también para el dimensionado y ubicación de los accesorios que posibiliten acotar convenientemente sus efectos.

Resumiendo los conceptos vertidos diremos que una tubería enterrada y a presión se encuentra sometida a cuatro solicitudes, a saber:

- a) Debida a la presión interna en régimen permanente y que en el proceso de **Preselección** define la “Clase” de la tubería a verificar.

- b) Debida a la sobrepresión interna variable entre valores positivos y negativos del régimen impermanente (transitorios o “Golpe de Ariete”), cuya relación con la “Clase” a través del concepto de **PMA** (Presión Máxima Admisible) fue estudiado previamente.
- c) Debida a la carga del material de relleno.
- d) Debida a la carga dinámica de Tránsito.

De acuerdo a lo expuesto previamente con la solicitud a) puede procederse a la “Preselección” de la tubería o determinación de la “clase” de la misma, **la que deberá ser posteriormente verificada a las solicitudes b), c) y d).**

Nota: Nótese que para el caso de **tuberías destinadas a drenaje (cloacas y pluviales)**, evidentemente no existen las solicitudes a) y b), por lo que su selección debe hacerse sobre la base de las solicitudes c) y d) **y pierde sentido, consecuentemente, el concepto de “clase” como criterio de preselección.**

La teoría y la práctica enseñan que existe una importante “interacción tubería-zanja” por lo que el proyectista deberá evaluar el conjunto de las solicitudes en su diseño. En efecto la zanja, en función de la granulometría de su lecho, de las propiedades del suelo del fondo, de los laterales, del ancho B y de sus propiedades mecánicas, ejercerá acciones que pueden ayudar a la tubería a resistir las cargas en mayor o menor grado.

Por ejemplo, si se piensa en una tubería rígida apoyada en una cama de Hormigón abarcando un gran ángulo de apoyo, es evidente que resistirá mucha más carga que si está apoyada en suelo y con pequeño ángulo de apoyo. En este caso a igualdad de solicitud, la tubería del primer caso puede tener un espesor sensiblemente menor, puesto que es más “ayudada” por la zanja. Es decir que sería económica la tubería pero costosa la obra.

Otro ejemplo importante, y poco tenido en cuenta, que tiene a la “clase” de la tubería como protagonista principal, es el caso de los materiales extrusivos (PVC, polietileno de alta densidad y otros), para los cuales el diámetro comercial, es el diámetro interno, por lo que al aumentar la clase (consecuentemente su espesor) disminuye su capacidad de transporte.

De lo expuesto se deduce un “nuevo” análisis comparativo a realizar entre las tuberías de los materiales mencionados y otros que ofrece el mercado.

En efecto, la variación de la presión interna en función de la topografía con seguridad **habrá de variar las "clases" con el recorrido de la conducción.** Por consiguiente al ser requerida una clase mayor variará el diámetro interno, variará también el caudal a transportar y eso nos llevará a un aumento del diámetro comercial por sobre el preseleccionado en primera aproximación. En este caso los diámetros comerciales que prestan un servicio mínimo equivalente resultarán

“Pautas para el Diseño, Cálculo y Selección de Tuberías en Base al Criterio de Prestaciones Equivalentes”

distintos con una evidente influencia en el análisis de precios comparativo con materiales no extrusivos.

CRITERIO TRADICIONAL DE SELECCIÓN DE TUBERÍAS

Este criterio encuentra su fundamento en la solicitación debida a la presión interna como consecuencia del escurrimiento permanente en una conducción “a presión”. Este análisis conduce a la expresión de Mariotte (o de las calderas) válida para materiales de las tuberías homogéneos y ya analizado previamente.

Ya se ha analizado previamente el concepto de “Clase” de una tubería. El mismo se utilizó durante muchos años para la selección de tuberías e incluso muchos organismos y proyectistas lo siguen usando actualmente a pesar de lo insuficiente a la vez que oneroso que significa su adopción como único parámetro de selección.

Para destacar claramente el error que se comete por omisión es oportuno enunciar el preconcepto al que la “clase” como único parámetro de selección ha llevado históricamente “..... **Las tuberías de idéntica clase e igual diámetro nominal, de distintos materiales prestan idéntico servicio...** ”

La consecuencia inmediata es que éste criterio lleva necesariamente a llamados a licitaciones públicas o compulsas privadas, abiertas a todos los materiales, puesto que todos “. prestan el mismo servicio.....” (lo que es estrictamente cierto pero sólo para la solicitación presión interna en régimen permanente y para algunos materiales).

Obviamente el objetivo buscado de “alentar la competencia y mejorar los precios” es noble en sí mismo **y lleva a obras probablemente más baratas pero difícilmente más económicas**. En efecto, al no ser consideradas las restantes solicitaciones actuantes y demás conceptos necesariamente a ser tenidos en cuenta, la comparación se ha hecho sobre bases incompletas y sólo casualmente la solución adoptada puede resultar la más ventajosa desde el doble punto de vista técnico y económico.

CRITERIO MODERNO DE SELECCIÓN DE TUBERÍAS

Este criterio se sustenta en la comparación de costos, previo diseño y cálculo de las alternativas de los distintos materiales del mercado que presten un servicio equivalente.

Para precisar el concepto de “Prestación Equivalente” es necesario referirnos a la Figura 9 en la que se aprecia una tubería instalada en una zanja.

Evidentemente el material de relleno habrá de ejercer una acción sobre la tubería que tenderá a deformarla (ovalizarla) en función de las características elásticas de la misma y del suelo de apoyo. Obviamente la intensidad de la sollicitación dependerá de las características del suelo del relleno y de apoyo y de la “Interacción Zanja-Tubería”. Es importante tener en cuenta que la mayor o menor deformación de la tubería depende de que ésta se comporte como rígida o flexible.

En este último caso la mayor deformación implica reacciones laterales que deberán ser equilibradas por los prismas laterales de las zanjas, las que deberán ser en consecuencia debidamente compactadas.

Solicitaciones en Caños Instalados en Zanja

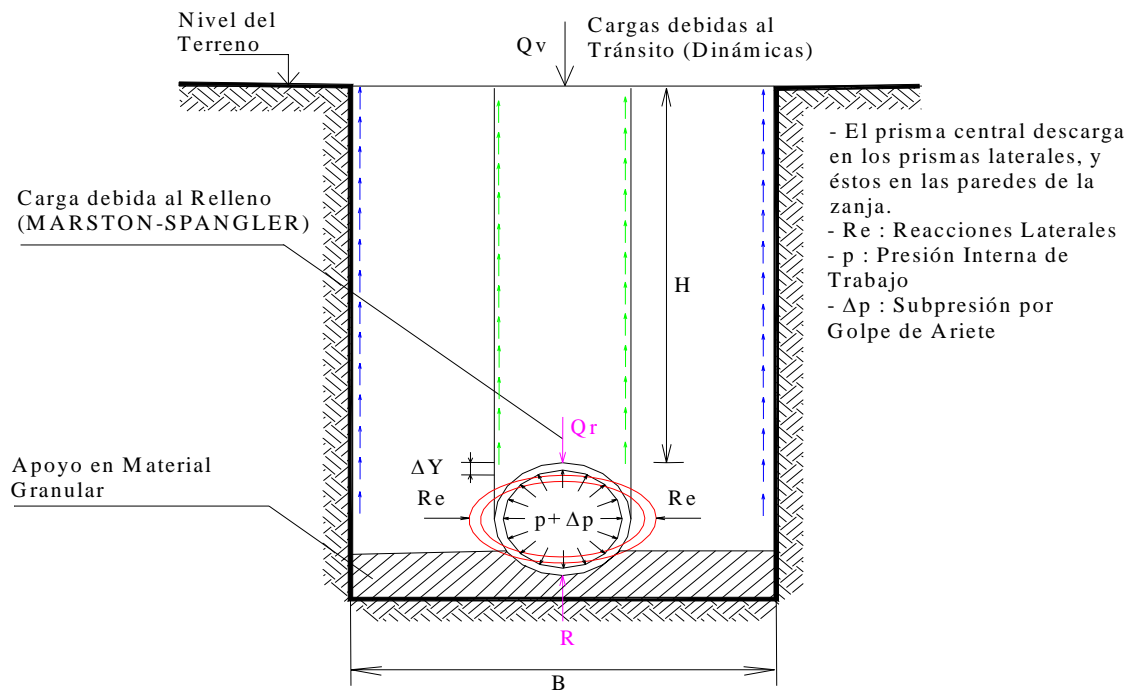


Figura 9

Solicitaciones en Tuberías Instaladas en zanja

Tal como se destacara oportunamente no es el propósito del presente trabajo el desarrollo de la teoría de Marston- Spangler, pero sí lo es citar las numerosas variables que entran en juego y la imperiosa necesidad de tenerlas en cuenta en los diseños de una parte tan onerosa de los proyectos de Saneamiento Básico, como lo son las tuberías enterradas.

Del simple análisis de la figura de referencia surge que la selección de la tubería más adecuada y el correspondiente diseño de la zanja (en general distintas para los distintos materiales del mercado) constituye una decisión ingenieril laboriosa que debe ser cuidadosamente meditada.

En efecto a la solicitación por presión interna en régimen permanente, la que en realidad nos posibilita la “Preselección” de la tubería, deberá agregarse la verificación de la solicitación debida a la carga de relleno que incidirá sobre la conducción en función de las características de la zanja y de las propiedades mecánicas del suelo y del material constituyente de la tubería.

Además, y como si ésto fuera poco, deberán calcularse las acciones ejercidas por el efecto dinámico del tránsito vehicular que eventualmente pudiere incidir y que resultará función de los tipos de camiones, existencia de pavimentos o no y las características mecánicas de las distintas capas de los mismos, o de los suelos si el pavimento no existiera (Teoría de Boussinesq).

Por otra parte, desde que la tubería requiere Regulación o que puede constituir una Impulsión es evidente que deberá ser evaluado el siempre complejo problema de los movimientos transitorios, más conocido por la denominación de “Golpe de Ariete”. Problemática que se presenta en forma distinta según sean las tuberías rígidas o flexibles, pero que siempre es necesario tener en cuenta, no sólo para evaluar las sobrepresiones en el caso de las primeras y las depresiones para el caso de las segundas (que son susceptibles al colapso por “Aplastamiento”) sino también para el dimensionado y ubicación de los accesorios que posibiliten acotar convenientemente sus efectos.

Es oportuno señalar que el criterio tradicional no brindaba recomendación alguna para la selección de las tuberías de drenaje y que incluso hoy, para algunos materiales del mercado que se usan masivamente no existen normas nacionales de selección en base a las cargas externas, por lo que la misma se realiza sin tener en cuenta las prestaciones equivalentes con respecto a otros materiales que sí las tienen.

Otra variable a ser muy tenida en cuenta en las comparaciones tecnológicas es la relativa al ataque corrosivo el que puede ser externo o interno.

En el primer caso el ataque es siempre producido por la agresividad química de los suelos y en el segundo por el ataque proveniente del líquido que escurre.

Son susceptibles de los primeros las tuberías de acero o fundición y los materiales cementicios (Hormigones armados o sin armar y Fibrocemento). En cambio, el ejemplo más usual para el segundo caso es el desprendimiento de Sulfuro de Hidrógeno proveniente de los líquidos cloacales domésticos el cual ataca a las tuberías de PRFV y de materiales cementicios (incluida la Fundición Dúctil puesto que tiene revestimiento interno de mortero cementicio).

Las protecciones catódicas de las tuberías que contienen Hierro, los revestimientos externos, para éstas o las de materiales cementicios, las que a su vez pueden ser especificadas con cemento ARS (Alta Resistencia a los Sulfatos), son condicionantes que necesariamente deberán ser tenidos en cuenta en los análisis de precios. Asimismo, la necesidad de revestimiento interno (o no) deberá ser analizada para el caso del ataque interno en tuberías de material cementicio (Fórmula o Índice de Pomeroy) y fundición dúctil, esta última es revestida interiormente con un mortero de cemento mientras que para el PRFV deberán comprobarse las normas internacionales vigentes.

Nótese que a las variables propias de las cuatro solicitaciones analizadas en la Figura 9, hemos agregado ahora las provenientes de los ataques corrosivos externo e interno, dando lugar a un complejo estudio ingenieril de las “Prestaciones Equivalentes”, el cual difiere en mucho del elemental criterio tradicional de preselección que implica el concepto de verificación de la “clase” de una tubería como único parámetro de selección.

Es importante destacar un hecho que a pesar de ser elemental es poco considerado por nuestros proyectistas. En efecto, la más evidente de las “Prestaciones Equivalentes” es que “...las conducciones diseñadas deben transportar un caudal igual o mayor al requerido en el proyecto o la especificaciones...”. Sorprendentemente este requisito rara vez es tenido en cuenta a pesar que sus fundamentos se encuentran en la Hidráulica elemental.

En efecto, por todos es conocida la diferencia de rugosidades de los distintos materiales, pero lo que es mucho más significativo es lo que generalmente se omite, y es que los diámetros internos o “hidráulicos” son distintos para los materiales cuyo proceso de fabricación es por extrusión como ya fue señalado y desarrollado con anterioridad en el presente trabajo. Para el caso de las tuberías de PVC al crecer el espesor (consecuentemente la “Clase”) disminuye el diámetro interno para un dado diámetro comercial, por lo que su capacidad de conducción a igualdad de condiciones de escurrimiento decrece en un 30% de la clase 4 a la clase 10.

Es de destacar que la problemática del "Golpe de Ariete" unida al análisis de las maniobras de "llenado" o "vaciado" da lugar a una consecuencia "secundaria" pero de gran importancia en el análisis de precios como es la selección y ubicación de válvulas para ingreso y salida de aire. La necesidad del ingreso del mismo para evitar el "aplastamiento" de las tuberías flexibles constituye otra instancia de

comparación íntimamente relacionada con los costos de la obra y rara vez tenida en cuenta.

En el caso de las tuberías para drenaje, es decir que funcionan a superficie libre, cobra especial significación el cálculo de la carga externa puesto que además constituyen el parámetro fundamental de selección al no existir la debida a la presión interna. Por otra parte, resulta esencial la verificación al ataque corrosivo debido al SH_2 y la correspondiente comparación entre materiales cementicios, los cuales deberán verificar el índice de Pomeroy (Hormigones, Fibrocemento y Fundición dúctil revestida) y los que no son atacados (El PRFV debe verificar normas ASTM al respecto).

También para este caso de los escurrimientos a superficie libre se aclara que al estar las fuerzas tractivas íntimamente relacionadas con los coeficientes de fricción de los distintos materiales, al igual que el desarrollo de los remansos, tanto la sedimentación como la formación de los mismos resultarán función de los distintos materiales. Evidentemente este hecho configura de por sí un motivo de comparación demasiado sutil para la práctica, pero digno de ser mencionado en la enumeración de los cambios que los distintos materiales implican en el escurrimiento proyectado.

CONCEPTO DE "PRESTACIÓN EQUIVALENTE" Y CONSECUENCIAS INMEDIATAS

De lo expuesto resulta evidente el significado de "Prestación Equivalente", concepto que implica la comparación de todos los materiales del mercado, instalados en las zanjas que le corresponden, previamente diseñadas de acuerdo a cada material y a las normas vigentes, que resistan las sollicitaciones a las que estarán sometidas y que transporten como mínimo el caudal requerido y en condiciones ideales para resistir los ataques corrosivos, es decir definiendo claramente la necesidad de revestimientos externos o internos.

Este concepto lleva ineludiblemente al de "Diseño Económico de Conducciones" el que se logra a partir de la comparación de costos de las alternativas con distintos materiales que presten un servicio equivalente. Y esta comparación deberá realizarse teniendo en cuenta no sólo el costo de las tuberías (que dependerá del diámetro y clase de las mismas) sino también los siguientes costos asociados a las particularidades de cada material ofrecido en el mercado:

- **Costo de Transporte de las Tuberías** (que dependerá no sólo de las características de las mismas sino también de la ubicación de la fábrica respecto del punto de localización de la obra).
- **Costos de Instalación de las Tuberías** (que incluirán todos los costos que tengan que ver con la dificultad de instalación y acople de las mismas, así como los costos de excavación y relleno ocasionados por el tipo de zanja que éstas demanden para soportar adecuadamente las cargas actuantes).
- **Costo de las Protecciones Necesarias contra la Corrosión** (éstos incluirán los costos de los posibles revestimientos internos y/o externos, la eventual protección catódica o el sobre costo por la utilización de cementos ARS).
- **Costo de los Dispositivos Antiarriete a colocar** (éstos incluirán todos los dispositivos que se incluyan en la instalación para proteger a las tuberías de los fenómenos de Golpe de Ariete ocasionados por las distintas maniobras que puedan tener lugar y dependerán fuertemente de las características de resistencia y elasticidad que ofrezcan las diferentes tecnologías).

Como consecuencia directa de la adopción por parte de los organismos licitantes del criterio expuesto, es digno de destacar que, la forma de proceder dará lugar a dos posibilidades:

- a) La más laboriosa que consiste en que el encargado del proyecto para la licitación efectúe los cálculos para todos los materiales y se brinden en la documentación del llamado planillas que destaquen en los distintos tramos

las características de las tuberías de prestación equivalente, las cuales deberán respetar y utilizar los oferentes en sus propuestas.

- b) La menos laboriosa que basada en materiales tomados como de referencia o básicos y para los que se han efectuado los cálculos pertinentes, posibilite la oferta en otros materiales que el oferente deberá demostrar (mediante el cálculo) que brindarán un servicio equivalente o superior al previsto. Esta última parece ser la alternativa más adecuada puesto que transfiere al interesado la responsabilidad de una real competencia, basada en ofertas bien fundadas en premisas y cálculos ingenieriles y de costos.

Otra consecuencia muy importante es que, las precisiones tecnológica y económica de las ofertas serán mucho más afinadas, resultando beneficiada la comunidad con obras mucho más confiables a la vez que más económicas en el sentido amplio del concepto.

Por otra parte se abre un claro panorama para el trabajo ingenieril. Los profesionales pueden encontrar una vía de especialización de gran significación por el aporte que implica y por otra parte con una prometedora y vasta salida laboral si se tienen en cuenta las inversiones a realizar en nuestro país y más aún en nuestro continente, que deberán concretarse en plazos mediatos e inmediatos.

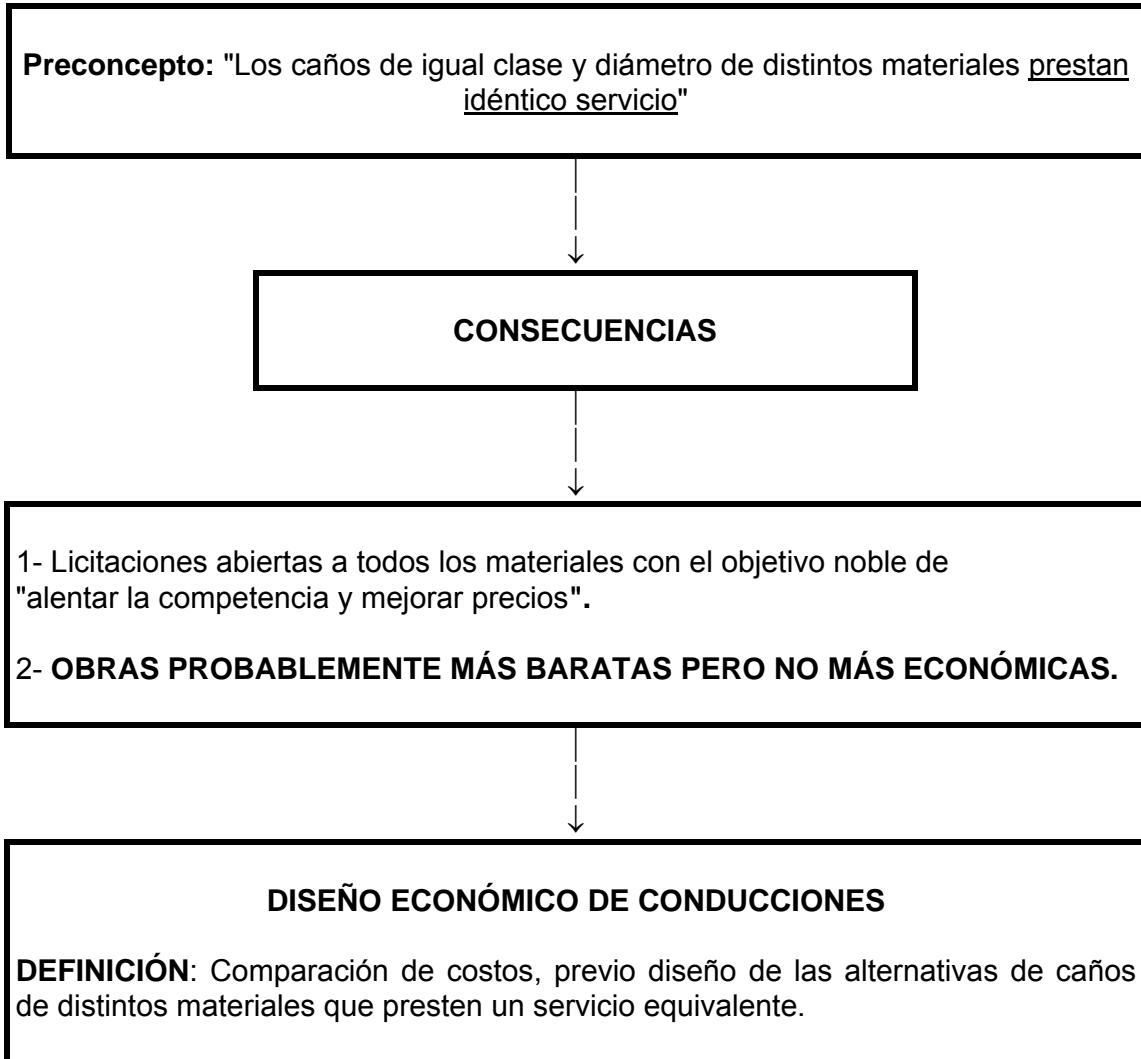
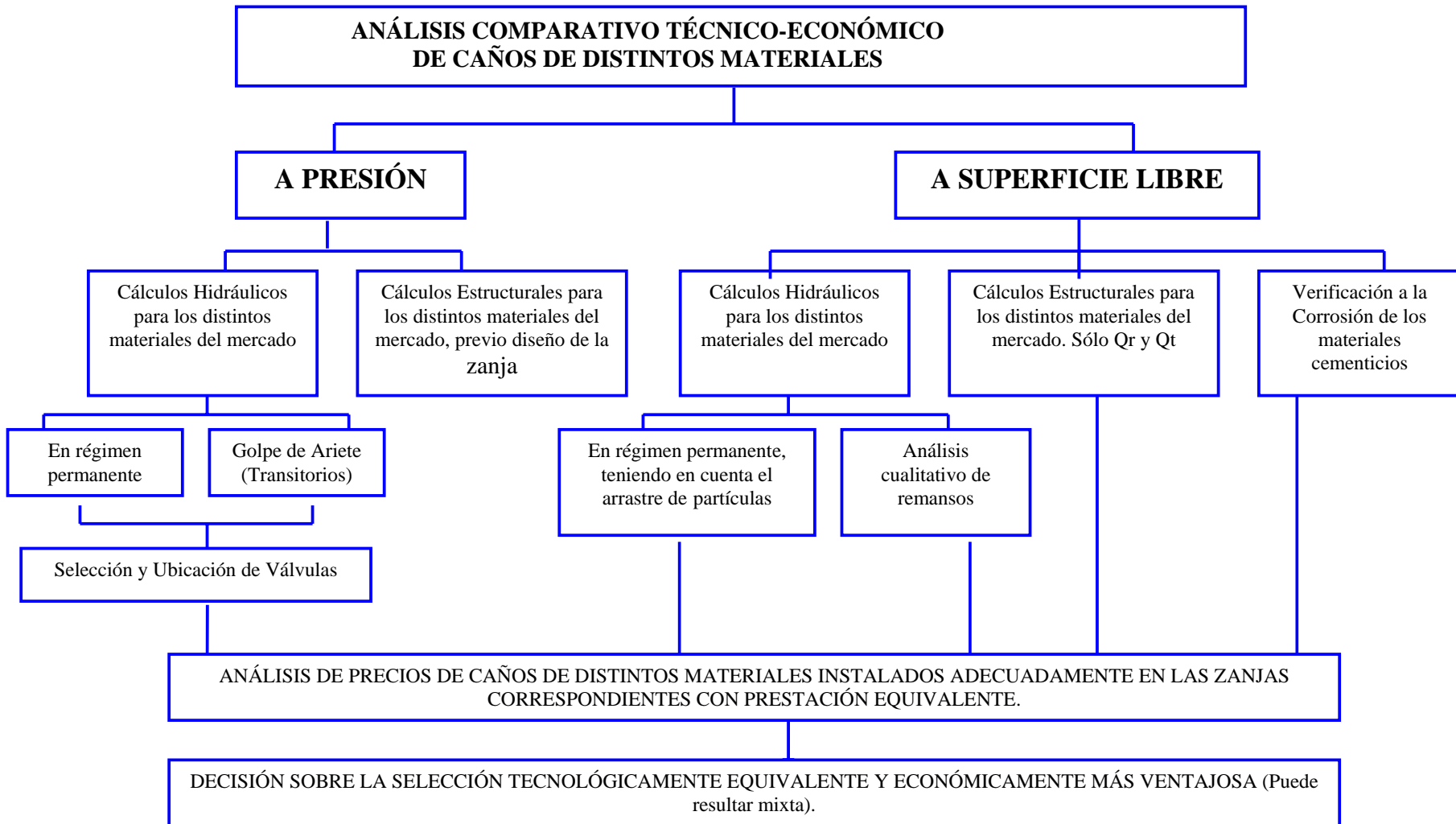


Figura 10

Selección Tradicional, Consecuencias y Diseño Moderno de Conducciones



PRESTACIONES A CUMPLIR POR LAS TUBERÍAS

En resumen, los conceptos a ser comparados resultan ser seis, tres de origen hidráulico, dos debidos a las solicitaciones por cargas externas y los debidos a los ataques corrosivos externos e internos.

Implican:

- 1- Verificación de los distintos caudales que surjan en función de los diámetros internos reales y los coeficientes de rugosidad de los distintos materiales que ofrece el mercado.
- 2- Verificación de la presión interna de trabajo en régimen permanente (relacionada con el concepto de “clase” y que constituye la base de la “preselección”).
- 3- Verificación o dimensionado teniendo en cuenta los regímenes impermanentes (estudio del “Golpe de Ariete”) tanto en conducciones rígidas como flexibles (onda positiva y negativa respectivamente) con la consecuente selección y ubicación de las válvulas de ingreso y salida de aire.
- 4- Verificación o nuevo dimensionado considerando las cargas debidas al relleno íntimamente relacionadas con el diseño de la zanja y las características del suelo de las mismas (interacción “Suelo-Zanja”).
- 5- Verificación o nuevo dimensionado considerando las cargas debidas al tránsito (relacionadas con los tipos de camiones, la tapada, existencia de pavimentos o no, etc). Este cálculo se realiza generalmente unido al estudio de la solicitud anterior.
- 6- Verificación al ataque corrosivo externo y/o interno.

Veamos resumidamente de que se trata cada una de estas prestaciones.

PRESTACIÓN 1: VERIFICACIÓN DE CAUDALES PARA LOS DISTINTOS MATERIALES

Veamos como se calculan los caudales transportados por una tubería en los casos de escurrimiento a presión y a superficie libre considerando, en un comienzo, que no aparecen pérdidas de carga localizadas (ocasionadas por los accesorios que se colocan en las tuberías):

Cálculo de Caudales

ESCURRIMIENTO A PRESIÓN:

Supongamos un sistema simple como el de la figura:

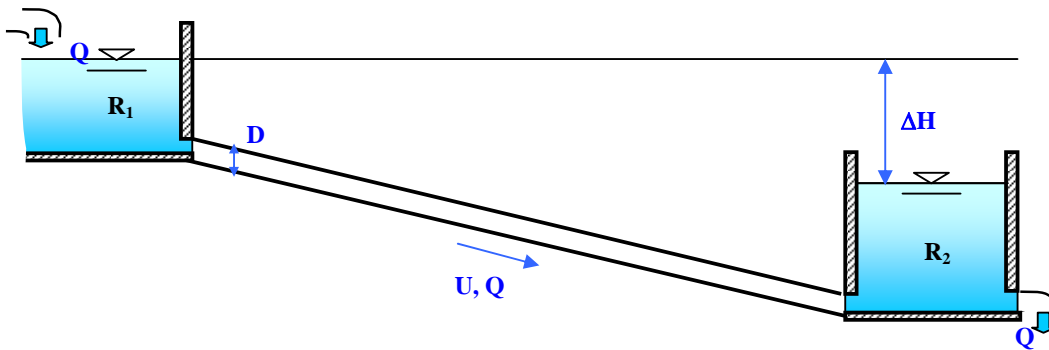


Figura 11

Esquema de dos reservorios conectados a distinto nivel

La asignatura Hidráulica General de todas las Facultades de Ingeniería enseña a disponer de dos herramientas para el cálculo de tuberías, ambas provenientes de consideraciones distintivas sobre la ecuación de Darcy - Weisbach.

En el capítulo correspondiente de la materia se demuestra que la misma presenta la forma:

$$j = \frac{f}{D} \frac{U^2}{2g}$$

En la que

- j es la pérdida unitaria de energía o pérdida unitaria de carga.
- f es el coeficiente de fricción que se ha probado resulta función de las variable

$$U ; \rho ; D ; \mu ; k$$

las que se recuerda son:

- U es la “velocidad media en la sección”.

- ρ es la “masa específica del agua”.
- D es el diámetro interno o “hidráulico” de la conducción.
- μ es la “viscosidad absoluta del agua” (función de la temperatura de la misma).
- k es la “rugosidad absoluta” de la tubería.

Si en la expresión nombrada se reemplaza la velocidad media U en función del caudal y la sección transversal (ecuación de continuidad) y además se sustituye el coeficiente de fricción por la relación:

$$f = 8 g b$$

En la que g es la aceleración normal de la gravedad y b un coeficiente empírico investigado por numerosas instituciones y autores.

Finalmente se obtiene la expresión:

$$j = 6,48 b \frac{Q^2}{D^5}$$

La cual es la ecuación de Darcy - Weisbach expresada de manera tal que pueda representar a todas las fórmulas empíricas existentes.

La primera forma en función del coeficiente de fricción f es de suma utilidad para ser aplicada con los criterios racionales fundados en la moderna teoría fluidodinámica corroborada y adecuada mediante la experimentación. Su gran ventaja radica no sólo en su racionalidad sino que además posibilita su aplicación con criterio universal, es decir a gran número de fluidos en distintas condiciones de temperatura y aún en tuberías no circulares.

La segunda en función del coeficiente b da lugar a las distintas expresiones empíricas que existen. El coeficiente b es función de las características experimentales tenidas en cuenta en cada caso y permite pasar revista a las numerosas expresiones existentes.

En el extremo de menor aproximación, la expresión de Dupuit, la más antigua fórmula conocida toma $b = 50$.

En cambio en el extremo de mayor precisión dentro de las expresiones empíricas, la más utilizada modernamente es la de Hazen y Williams.

La misma se obtiene al reemplazar en la expresión general el valor de b obtenido en forma experimental y teniendo en cuenta la variación de las variables involucradas aún las que actúan en forma sutil (el valor de b para la expresión que nos ocupa es una función empírica particularmente compleja de la relación entre las variables intervinientes).

La expresión de Hazen y Williams resulta finalmente:

$$j = \frac{1}{(0,275 C)^{1,85}} \frac{Q^{1,85}}{D^{4,85}}$$

En la que C es una constante que mide la rugosidad del material de la conducción.

La expresión de referencia, al igual que todas las empíricas, tiene limitaciones conceptuales notables con respecto a las expresiones que se obtienen con el criterio racional.

Sólo son válidas para el escurrimiento de agua en régimen plenamente turbulento y no contempla variaciones por temperatura, por lo que sus aplicaciones en la medida que se aparten de las temperaturas de experimentación y formulación resultan más inexactas.

En apretada síntesis, la diferencia esencial entre ambas metodologías, racional o empírica (además que la primera tiene carácter de universal y la segunda es sólo aplicable al agua en régimen turbulento y tuberías circulares) radica que en las primeras la rugosidad es un concepto relativo función del “Número de Reynolds” y de la “Rugosidad Absoluta”, mientras que en el segundo la rugosidad se toma como una propiedad absoluta de cada material. Es en este concepto donde radica la mayor riqueza conceptual del primer criterio en relación con las expresiones empíricas.

Como el cálculo de conducciones hidráulicas dista mucho de ser exacto, las aproximaciones que se logran resultan satisfactorias en el campo de las aplicaciones tecnológicas. El Ingeniero deberá decidir, en última instancia y en función de su disponibilidad o facilidad de utilización, cuál es la herramienta de cálculo más útil a sus objetivos.

En términos generales, cuando del transporte de agua a temperaturas ambiente se trata, no existen diferencias sensibles en la aplicación de una u otra metodología.

Obviamente, de las expresiones que vinculan el caudal, el diámetro y la “pérdida de carga unitaria” pueden ser deducidas cualquiera de las variables en función de las otras dos. En especial el caudal en función de “ D ” y “ J ” como datos.

ESCURRIMIENTO A SUPERFICIE LIBRE:

En el caso de escurrimiento a superficie libre dentro de una tubería (caso de cloacas o pluviales) la fórmula más utilizada para calcular el caudal es la expresión de CHEZY-MANNING:

$$Q = \frac{\Omega}{n} \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{i}$$

Donde:

- χ es el “Perímetro Mojado” (es decir el perímetro que ocupa el fluido en un corte transversal de la tubería).

- R es el “Radio Medio Hidráulico” que surge de calcular el cociente entre el Área Mojada “ Ω ” y el Perímetro Mojado “ χ ”.

$$R = \frac{\Omega}{\chi}$$

- n es el “Coeficiente de Manning” dependiente de la rugosidad de las paredes de la tubería.

- i es la “Pendiente Longitudinal” de la tubería.

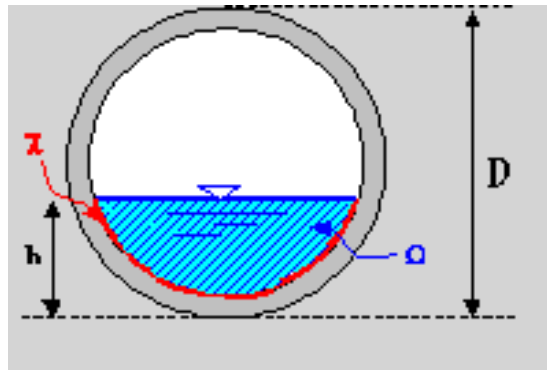


Figura 12

Corte transversal de una tubería

Influencia de las Características de las Tuberías en los Caudales Resultantes

En los dos casos anteriores de cálculo podemos apreciar que el caudal transportado depende fuertemente de:

1. La **rugosidad** de las paredes internas de la tubería a través del coeficiente “ f ” en escurrimientos a presión o del coeficiente “ n ” en escurrimientos a superficie libre.
2. La **sección transversal mojada** ocupada por el fluido del escurrimiento, la cual es directamente proporcional (tanto en escurrimientos a presión como a superficie libre) al diámetro interno de la tubería.
3. El **desnivel hidráulico** disponible para el escurrimiento (la pérdida de carga disponible para escurrimientos a presión o la pendiente longitudinal de la tubería para escurrimientos a superficie libre).

De todo lo expuesto precedentemente se desprende que las características de las tuberías tendrán un papel esencial en el caudal resultante tanto en escurrimientos a presión como a superficie libre. Aquí aparecen las primeras condiciones a tener en cuenta al comparar tuberías de diferentes tecnologías:

- 1.- Las tuberías ofrecidas en el mercado presentan diferentes condiciones de **rugosidad** (aún las tuberías de un mismo material pero fabricadas con diferente tecnología). Por lo tanto, las pérdidas de energía que sufrirá el fluido a lo largo del escurrimiento dentro de cada tubería será distinta, y así también lo será el caudal resultante (el caudal será menor cuanto mayor sea la rugosidad de las paredes).

Además, hay que tener en cuenta que algunos materiales que no ofrecen buenas condiciones de rugosidad pueden mejorar notablemente este aspecto mediante el revestimiento interno de las tuberías (para las que habrá que calcular e incluir el correspondiente sobrecosto).

También se debe tener en cuenta, por otro lado, las variantes ofrecidas por cada marca para materializar el acople de las tuberías entre sí y con los distintos accesorios. Esto es importante debido al hecho de que estos acoples ocasionan pérdidas de energía “localizadas” en el punto donde estén instalados (dando lugar, por lo tanto, a una disminución del caudal transportado) y la magnitud de dicha pérdida dependerá de la tecnología adoptada.

- 2.- Las tuberías se venden de acuerdo a su **Diámetro Nominal**, cuya definición depende de cada fabricante. Para algunos materiales el diámetro nominal es el diámetro interno de la tubería, para otros, generalmente los extrusivos, es el diámetro externo (por lo que el diámetro interno dependerá del espesor de las paredes, el cual a su vez varía con la resistencia ofrecida por la tubería a la presión interna) y para otros materiales el diámetro nominal no coincide ni con el interno ni con el externo.

Como el caudal es altamente dependiente del **diámetro interno** de la tubería, hay que tener especial cuidado con la comparación de tuberías que posean el mismo diámetro nominal (de venta) ya que éstas no ofrecerán las mismas condiciones de escurrimiento (pudiendo llegar a obtenerse diferencias más que apreciables).

- 3.- Otro aspecto a no despreciar es que dadas la rugosidad y diámetro interno ofrecido por cada tecnología, para obtener un caudal determinado será importante, en el caso de escurrimientos a superficie libre, la pendiente de colocación de las tuberías. Así, una tubería que ofrezca buenas condiciones para el escurrimiento necesitará menor pendiente longitudinal para lograr el caudal especificado y, por lo tanto, significará un menor costo en trabajos de excavación y relleno de las zanjas.

Particularidades de los Escurrimientos a Superficie Libre

Concepto de Esfuerzo Tractivo y Velocidad de Autolimpieza

Dado que por lo general los escurrimientos a superficie libre en tuberías se dan para el caso de conducciones cloacales o pluviales, es importante en el diseño de las mismas tener

en cuenta la remoción de partículas (o la prevención de su sedimentación) presentes en el fluido transportado.

Para esto, en el diseño, se trata de que sea el mismo fluido el que a través de su escurrimiento “arrastre” o “remueva” las partículas que puedan depositarse en el fondo de la tubería. Asimismo, se trata de asegurar una velocidad de escurrimiento mínima que evite la sedimentación de las partículas que se encuentren en suspensión dentro del líquido.

Existen dos criterios de cálculo:

- 1.- Esfuerzo Tractivo: Este criterio calcula la “Fuerza” de arrastre que genera el líquido al escurrir sobre las partículas que puedan estar depositadas en el fondo. Para asegurar una remoción adecuada el ENOHSA impone en sus normas un Esfuerzo Tractivo Mínimo (calculado para el caudal máximo del día de menor consumo de la vida útil de la instalación) de 0.1 kg/m^2 .
- 2.- Velocidad de Autolimpieza: Este criterio calcula la velocidad mínima que debería tener el fluido escurriendo a sección llena para asegurar en las demás condiciones una remoción adecuada. Dicha velocidad mínima debería ser de 0.6 m/s .

La adopción de un criterio u otro depende actualmente del proyectista pero puede comprobarse en la práctica que para diámetros de tuberías menores a los 300 mm, el primer criterio resulta más económico (ya que exige pendientes longitudinales menores). Para diámetros mayores de 300 mm ocurrirá lo contrario (será más económico el criterio de Velocidad de Autolimpieza).

Ahora, independientemente de lo anterior, recordemos que el caudal (y consecuentemente la velocidad) de escurrimiento es proporcional a la raíz cuadrada de la pendiente longitudinal con la que esté instalada la tubería y es inversamente proporcional al coeficiente de rugosidad de la tubería. Por lo tanto, se puede sacar la siguiente conclusión:

Las tuberías más lisas necesitarán menor pendiente longitudinal de instalación (con la consecuente reducción en costos de excavación y relleno de las zanjas) para garantizar la autodepuración de las partículas.

Remansos y Resaltos

En los escurrimientos a superficie libre, siempre que aparezca una singularidad en la conducción (un cambio de pendiente, cambio de material, cambio de sección, una válvula o compuerta, un salto, etc) aparecerán, según el caso, lo que se conoce como “Remansos” y/o “Resaltos”. Éstos no son más que alteraciones en el desarrollo de la superficie del fluido en contacto con la atmósfera (que deja de ser paralela a la pendiente de fondo de la tubería) con el fin de materializar la transición entre dos situaciones de escurrimiento diferentes.

Para comprender un poco mejor el tema es importante distinguir entre escurrimientos “lentos” y “veloces”:

- Cuando el escurrimiento tiene lugar con velocidades bajas y altos tirantes y, en consecuencia, bajas pendientes, el escurrimiento es “lento” o fluvial. Es el característico de los ríos de llanura y de allí su denominación.

Se puede distinguir porque cualquier perturbación que se produzca (tal como la que se origina al arrojar una piedra) se desplaza aguas arriba, es decir que tiene la propiedad de remontar la corriente.

- Cuando los tirantes son bajos, las velocidades altas y, en consecuencia, las pendientes son también altas, el escurrimiento es “veloz” o “torrencial”. Es el característico de los ríos de montaña o “torrentes”.

En este caso, las perturbaciones no pueden remontar la corriente y son arrastradas aguas abajo.

Ahora, siempre que un escurrimiento “veloz” se encuentre con un escurrimiento “lento” se produce un fenómeno que denominamos “resalto hidráulico” y que esquematizamos en la figura 13, en la que se representa como singularidad en el escurrimiento un cambio de pendientes de la solera.

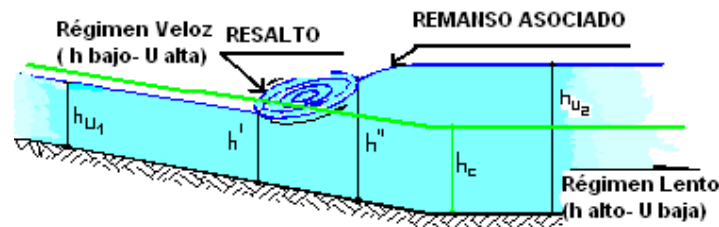


Figura 13

Resalto hidráulico

El resalto hidráulico generado consiste esencialmente en un torbellino de eje horizontal y perpendicular al escurrimiento provocado por la irrupción brusca del escurrimiento veloz en el lento. Se caracteriza por su alta incorporación de aire y porque su presencia significa una importante erosión.

Otros casos frecuentes donde se producen resaltos hidráulicos son los siguientes:

- Cuando en un escurrimiento en un canal de pendiente baja se obliga a pasar al caudal con un tirante h_0 (apertura de una compuerta, por ejemplo) tan bajo que origina una corriente veloz. Como ésta debe identificarse con un escurrimiento lento aguas abajo, necesariamente se formará un resalto hidráulico y el perfil se completa con la formación de un remanso asociado:

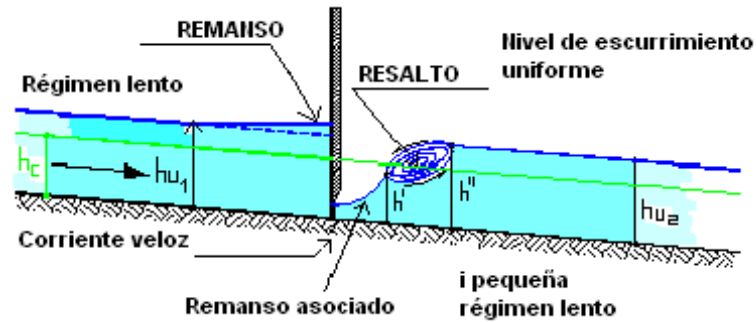


Figura 14

Perfil longitudinal de una compuerta

- Cuando a un escurrimiento veloz (pendiente elevada) se le interpone una estructura (vertedero) que obliga al caudal a pasar por sobre ella. Esta sobre elevación del escurrimiento implica que éste se convierta en lento, por lo que debe formarse un resalto y su remanso asociado.

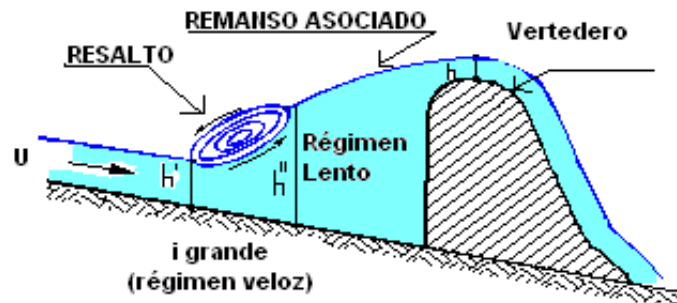


Figura 15

Perfil longitudinal de un vertedero

Se destaca que el resalto sólo se produce cuando un escurrimiento veloz se identifica con un escurrimiento lento.

Para otro tipo de singularidades sólo se producirán remansos sin la formación de resaltos, tal como presentamos en el ejemplo de la figura 16, donde se analiza un escurrimiento lento interceptado por una presa vertedero que obliga al caudal a pasar por encima de la estructura. La identificación de la superficie libre se verifica con un remanso como el dibujado:

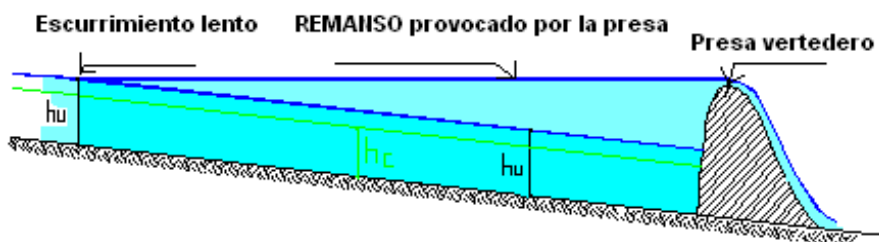


Figura 16

Perfil longitudinal de un vertedero

Este tipo de remanso también aparece en el caso de un cambio de pendiente (de una pendiente mayor a una menor siendo ambas de régimen lento) o cuando hay un cambio en el material de las tuberías (pasando de uno más rugoso a uno menos rugoso).

Este es un tema a tener muy en cuenta debido a lo siguiente: Cuando por algún motivo se forman remansos que causen la “sobreelevación” del nivel del líquido que fluye, se produce en esa zona una disminución en la velocidad de escurrimiento y aparece por lo tanto la sedimentación de partículas en suspensión (que hubieran sido removidas automáticamente en caso de escurrimiento normal). Esto es especialmente importante en el caso de tuberías de material cementicio, ya que la acumulación de partículas traerá aparejado un aumento localizado de la concentración de SH_2 que incrementará sensiblemente los efectos corrosivos, por lo que será necesario proteger la conducción al menos en esas zonas con revestimientos especiales u obras complementarias que amortiguen el fenómeno. En este caso, el costo de las obras deberá adicionarse al de las tuberías a la hora de compararlas con otras que no presenten este problema.

Problemática usual en cloacas

La sedimentación de partículas sólidas con alta componente orgánica da lugar a un “endicamiento” que se autoalimenta, puesto que, al aumentar el volumen del embanque aumenta en consecuencia el tirante debido al “efecto vertedero” que se produce. Este efecto implica necesariamente reducción de velocidad por culpa del remansamiento con la consecuente reducción de la capacidad tractiva del escurrimiento, por lo que, cada vez partículas de menor diámetro sedimentarán reforzando el “endicamiento” u obstrucción.

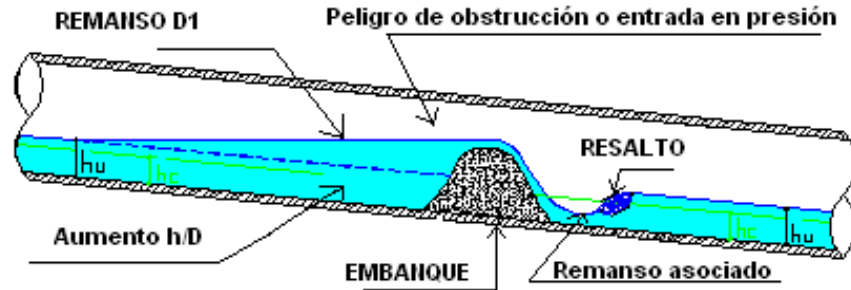


Figura 17

Remanso por embanque en escurrimiento lento (pendiente suave)

En el caso extremo puede llegar a obturarse la conducción mientras que para situaciones intermedias se reduce considerablemente y en forma creciente (hasta llegar a la obturación) el espacio por sobre la superficie libre destinado a la ventilación del sistema.

Es oportuno señalar que en el caso de pendiente débil (menor que la crítica), representado en la Figura 17, el remanso que se produce es asintótico aguas arriba y se extiende en una gran longitud, por lo que la región afectada por la reducción de área destinada a la ventilación puede ser muy importante.

En el caso de pendiente fuerte, Figura 18, la situación que se produce por una obstrucción es la indicada, lo que implica una corriente lenta, que por un mecanismo similar al descrito en el caso anterior se autoalimenta conduciendo a una situación análoga, pero ahora en una conducción que originalmente tenía un muy importante esfuerzo tractivo en función de su elevada pendiente y consecuente alta velocidad y que se transformó en lenta por causa de la obturación.

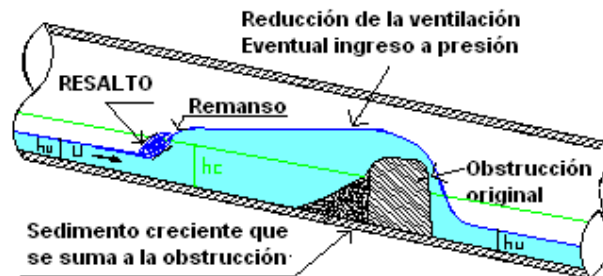


Figura 18

Remanso por embanque en escurrimiento veloz (pendiente fuerte)

Una situación similar a la de la Figura 17 se da para el caso descrito en la Figura 19, en la que se esquematiza un cambio de pendiente por reducción de la misma. La similitud tiene lugar aguas arriba del cambio de pendiente, tal como puede ser apreciado en el esquema.

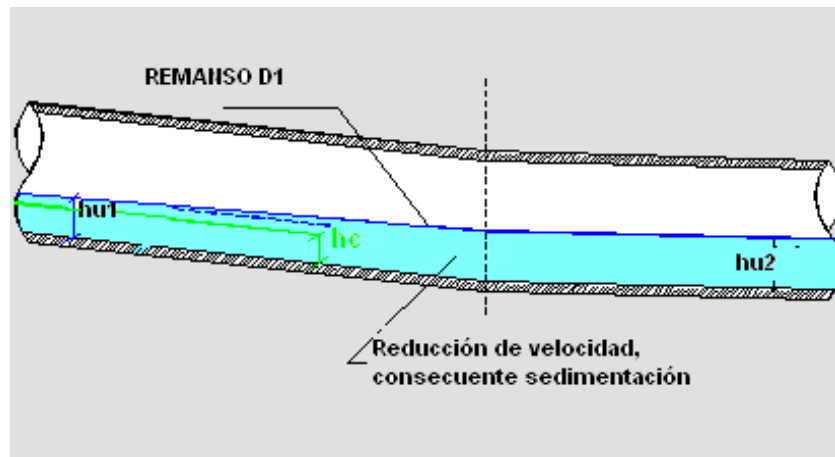


Figura 19
Remanso por cambio de pendiente

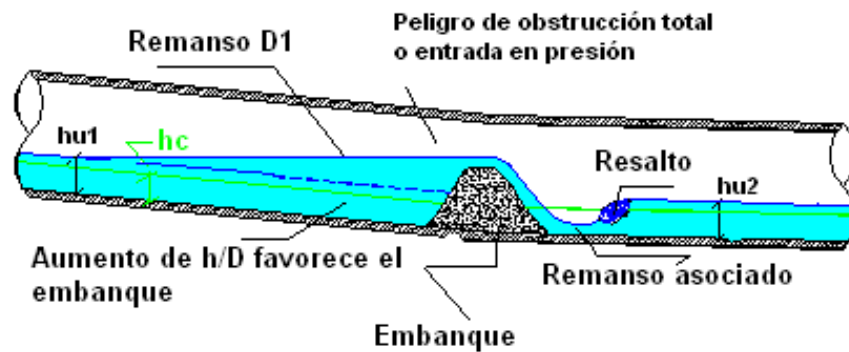


Figura 20
Remanso por embanque en escurrimiento lento (cambio de pendiente)

Nota: En los casos estudiados se obvia en el dibujo la cámara de registro, la que no modifica en absoluto el remanso que se origina por la singularidad.

Puede observarse, en este caso, que al pasar de una pendiente menor que la crítica (escurrimiento lento) a una todavía menor, el efecto es similar al de un endicamiento, por lo que en las inmediaciones de la singularidad tendrá lugar el efecto de la sedimentación que incluso ahonda el problema tal como puede apreciarse en la Figura 20.

A modo de conclusiones de los conceptos expuestos se deduce lo siguiente:

- a) La justificación de la necesidad del mantenimiento preventivo para evitar los endicamientos producidos por obstrucciones que se autoalimentan.
- b) Respetar las pendientes fijadas por el proyectista durante la construcción para no formar remansamientos no queridos por vicios durante la misma al generarse cambios de pendientes no previstos.
- c) Evaluar convenientemente la problemática de los remansos y/o resaltos en las conducciones importantes (cloacas máximas o colectoras de gran diámetro) para los distintos caudales de funcionamiento.
- d) Considerar que cuando tienen lugar los remansos que disminuyen la zona destinada a ventilación, **consecuentemente el efecto corrosivo para las tuberías de material cementicio se potencia**, puesto que al aumentar el tirante en la zona superior, disminuye el ancho superficial B_s y aumenta proporcionalmente el Índice de Pomeroy, lo que implica aumento de la corrosión por transformación química del SH_2 (siempre presente en el líquido cloacal) y el posterior ataque a unos de los componentes fundamentales de los cementos, el aluminato tricálcico.

PRESTACIÓN 2: VERIFICACIÓN DE PRESIONES EN RÉGIMEN PERMANENTE

Resistencia de las Tuberías a la Presión Interna

La manera de resistir las presiones internas dependerá de la tecnología aplicada a cada tipo de tubería. Algunas están hechas de materiales que, por sí mismos, son altamente resistentes a la tracción y otras se hacen con materiales que no son tan resistentes (pero que ofrecen otras bondades) y a las que se las refuerza con otro material más resistente (como el Hormigón Armado o Pretensado).

Por lo tanto, cada tecnología tiene su propia teoría de base para calcular la resistencia de sus tuberías y es prácticamente imposible para el proyectista conocer en detalle cada una de ellas.

Es así que lo que hacen los fabricantes es ofrecer una serie de tuberías estandar que se diferencian entre sí por su diámetro nominal y su resistencia a la tracción (a través del espesor de las paredes).

De los conceptos anteriores surge el concepto de “Clase de una tubería” ya analizado.

Como ya se mencionó al comienzo de este texto, en general los fabricantes ofertan series de tuberías discriminadas por diámetros y clases, siendo éstas acotadas por un número entero que representa el máximo de las presiones en atmósferas admisibles que puede resistir en condiciones de trabajo.

Por otro lado, algunos fabricantes ofrecen la confección de “Tuberías especiales”, que son las que se fabrican para solicitudes especiales y no están consideradas en los catálogos. Algunos fabricantes producen solo tuberías especiales y otros lo hacen a pedido a partir de determinado diámetro y/o clase. Esta posibilidad presenta la gran ventaja de poder proyectar las conducciones “a medida” con la consiguiente (y muy significativa) reducción de costos en este rubro.

En particular las tuberías de Fundición Dúctil tienen una clase muy alta, no respondiendo al criterio de diseño anterior dado que su espesor es resultante, fundamentalmente, del proceso de fabricación.

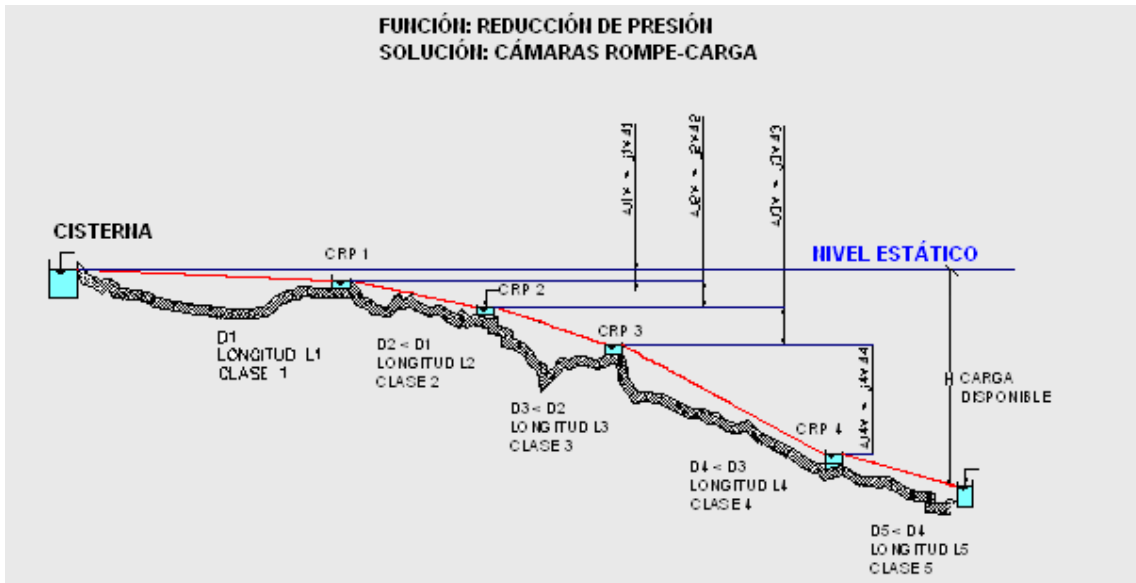
VÁLVULAS DE ÚLTIMA GENERACIÓN

a) Cámaras rompe-carga

La función de las cámaras rompe-carga es la de ser reductoras de presión. Respecto a sus características más relevantes podemos mencionar:

- 1-Necesitan una topografía adecuada, lo cual condiciona la ubicación de las mismas.
- 2- Implican “saltos” que comienzan en $P_r = P_a = 0$.
- 3-Implican un importante número de válvulas y sensores de nivel.

- 4-Implican un estudio cuidadoso antiarriete.
- 5-Correctamente diseñadas resultan muy costosas.



b) Válvulas inteligentes

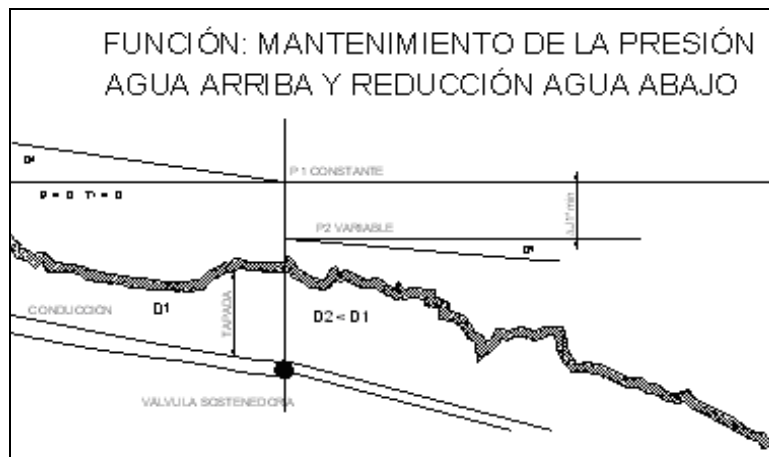
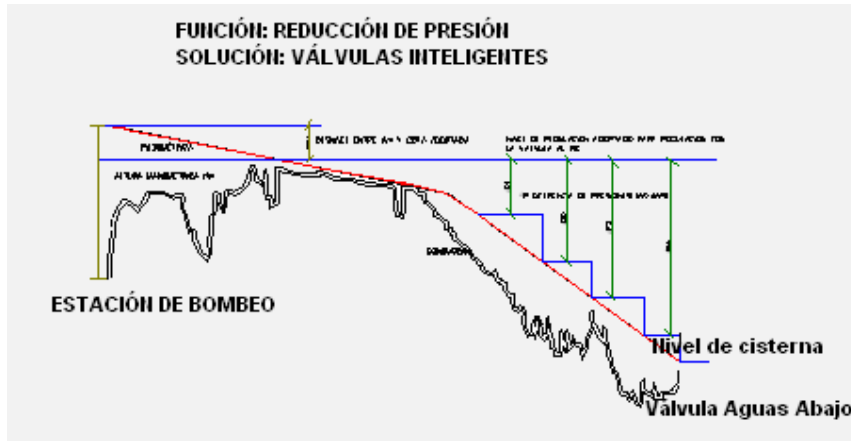
Igual que en el caso anterior la función de estas válvulas es la de ser reductoras de presión.

A continuación mencionaremos algunas características distintivas:

- 1- La ubicación de las válvulas no depende de la topografía.
- 2- Los “saltos” no arrancan de $P_r = 0$.
- 3- Utilizando este tipo de válvulas la instalación queda sometida a altas presiones estáticas.
- 4- Proporcionan una solución económica.

Según las funciones podemos mencionar las válvulas reductoras y sostenedoras de presión.

“Pautas para el Diseño, Cálculo y Selección de Tuberías en Base al Criterio de Prestaciones Equivalentes”



LA PROBLEMÁTICA DEL AIRE EN LAS CONDUCCIONES A PRESIÓN

1-El vaciado de la conducción, ya sea accidental o no, y la onda negativa del “Golpe de Ariete” provocan depresión.

2-Al resultar presiones negativas relativas, en todos los casos se produce el ingreso de aire debido a diversos motivos.

3-El aire presente en el agua por solubilidad (aproximadamente 30 l/m³) debido a la reducción de presión se desprende de la misma y el arrastre de burbujas posibilita la formación de “bolsas” en los puntos altos.

4-Estas burbujas pueden originar (en orden decreciente de gravedad):

a)El colapso de la conducción.

b)Pérdidas de carga de distinta magnitud que incluyen hasta la obturación total del escurrimiento.

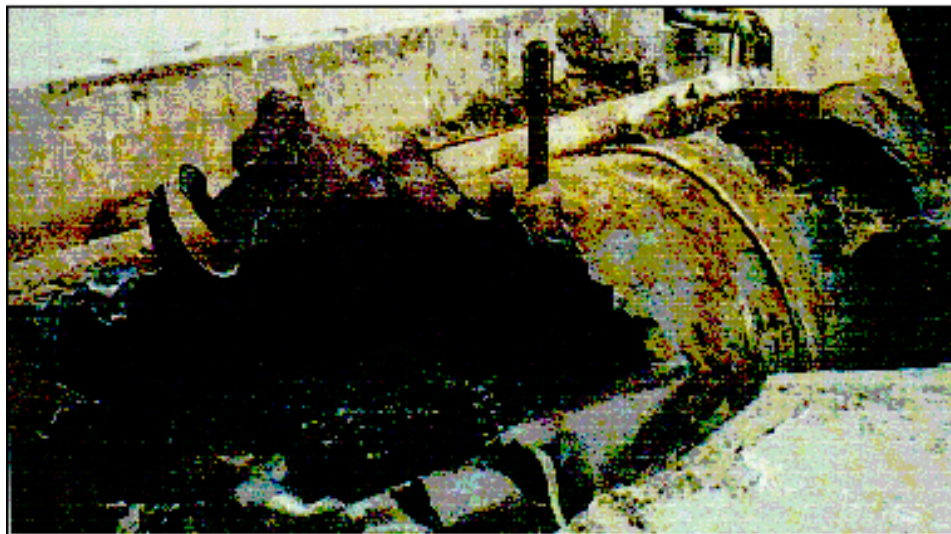
c) “Golpes de ariete inducidos por escape de aire”.

d) Perturbación de mayor o menor gravedad del régimen de escurrimiento.

5-El ingreso de aire implica su posterior evacuación al igual que las maniobras de llenado de la conducción.

Todas las razones enunciadas anteriormente implican el control del aire en las conducciones con válvulas adecuadamente seleccionadas y correctamente ubicadas en puntos altos de las mismas.

El diseño eficiente implica pendientes ascendentes de 1 a 3 mm/m y descendente de 4 a 5 mm/m. Además una válvula al menos cada kilómetro (si bien lo recomendado es colocar una cada 500 metros).



“Pautas para el Diseño, Cálculo y Selección de Tuberías en Base al Criterio de Prestaciones Equivalentes”



PRESTACIÓN 3: Verificación de Presiones por Golpe de Ariete

Descripción de la Problemática

Se conoce con el nombre de “Transitorio” al fenómeno de variación de presión en las conducciones a presión motivado por una variación en la velocidad de escurrimiento (por el cierre de una válvula, la detención de una bomba, etc). Cuando la variación es tal que implica el impedimento de escurrir, es decir, con velocidad final nula y cuando, además, las oscilaciones de presión por ese motivo son grandes al fenómeno se lo denomina “Golpe de Ariete”.

El interés de su evaluación se encuentra en el hecho de que puede originar colapsos en las conducciones si se realizan, voluntariamente o no, maniobras bruscas de cierre.

Por lo tanto, debe realizarse un análisis profundo acerca de las maniobras clave que puedan tener lugar en la conducción para cada uno de los materiales de tuberías en estudio, y verificar que las presiones resultantes puedan ser soportadas, sin inconvenientes, por las mismas (no nos olvidemos que las tuberías son fabricadas, por lo general, de forma tal que soporten 1.5 veces el valor de presión dado por la “clase”). Estos son cálculos muy complicados ya que implican simulaciones del comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, por lo que la cantidad de variables es apreciable.

Actualmente, existen softwares de última generación que nos resuelven el problema, pero, de todas formas es importante conocer el tema en profundidad para poder ingresar los datos correctos al programa y analizar sus resultados. Es por esto que se recomienda realizar un primer cálculo “a mano” utilizando los métodos de acotamiento conocidos, ya que los mismos nos proporcionarían los valores máximos y mínimos posibles de presión que ocurrirán en las tuberías. De esta forma, conociendo estos valores podremos analizar con mayor criterio los resultados que nos puede dar el programa.

Ahora... ¿Para que usar un software tan complejo si con un par de cuentas resolvemos el problema? Las respuestas son cuatro:

1. Por un lado, porque somos Ingenieros y nuestra misión es encontrar soluciones que verifiquen tanto la ecuación técnica como la económica. El diagrama envolvente que nos dan los métodos de acotamiento son los máximos posibles, valores a los que nuestro sistema en particular puede no llegar nunca. Por lo tanto, si nos quedamos únicamente con esta envolvente diseñaremos un sistema que funcionará bien pero que estará sobredimensionado y por lo tanto no será económico.
2. Por el otro lado, los sistemas reales son cada vez más complejos y se alejan cada vez más de los simples esquemas planteados por los métodos de acotamiento. Hay casos, inclusive en los que encontrar la forma de implementación de estos últimos métodos resulta más complejo (e inseguro) que recurrir a una modelización detallada.
3. La aplicación de los métodos de acotamiento nos dan idea de en que “orden de magnitud” deben estar los resultados para saber “qué esperar” (si no hiciéramos estas cuentas creeríamos ciegamente lo que nos dice el software y no seríamos

capaces de distinguir los errores que se hayan podido cometer en el modelo, es decir que serviría como una forma de “calibración” del mismo) pero no ofrecen “presición”.

4. Los métodos de acotamiento sólo nos informan las presiones máximas y mínimas que tendrán lugar durante un transitorio pero no informan nada acerca de la evolución del mismo en el tiempo (que puede resultar una información crucial en el análisis del fenómeno).

Métodos de Atenuación del Fenómeno

Como ya se mencionó, el fenómeno del Golpe de Ariete genera sobrepresiones importantes en las tuberías que lo sufren.

Esta sobrepresiones, cuando están dentro de valores razonables pueden enfrentarse dimensionando adecuadamente el espesor de la tubería (a veces engrosándolas un poco respecto de lo que necesitan para el funcionamiento en régimen permanente).

Pero, cuando la longitud de la tubería es muy grande las sobrepresiones alcanzan valores muy altos y se debería sobredimensionar demasiado las tuberías para que puedan soportarlas con una razonable seguridad. Por ello, se recurre a métodos de atenuación de estas presiones mediante dispositivos especialmente diseñados para tal objetivo.

A continuación se detallan algunos de los métodos existentes en la actualidad.

LEYES DE CIERRE ADECUADAS

Para proteger bombas e impulsiones del fenómeno transitorio por variación de presión denominado “Golpe de Ariete” se utilizan válvulas protectoras.

Las funciones requeridas de estas válvulas son las que se enuncian a continuación:

1-Inicio bombeo contra válvula cerrada para proteger a la instalación de la onda positiva de presión y apertura continua y lenta minimizando efectos.

2-Cierre paulatino para atenuar el efecto de aplastamiento por onda negativa.

3- Atenuación y acotamiento de $\Delta h_{\text{más}}$ y Δh_{min} para interrupción involuntaria del bombeo (corte de energía)

En cuanto a las leyes de cierre de las válvulas podemos mencionar :

- a) La ley de válvula ideal
- b) La ley de cierre tipo de válvulas tradicionales

En el primer caso la ley de cierre queda convenientemente acotada por la expresión de Michaud (en consecuencia con el diagrama triangular con $\Delta h_{\text{más}} = 2LU/gT_{cl}$). En cambio en

el segundo caso la ley de cierre queda convenientemente acotada por la expresión de Allievi (a partir de diagramas quebrados o triangulares con $\Delta h_{\text{más}} = CU/g$).

La idea es lograr leyes de cierre lo más parecidas a la ley lineal, para ello resulta necesario diseñar con más detenimiento el órgano de regulación o, por lo menos, programar su maniobra.

Se mencionan a continuación algunas propuestas en ese sentido:

- (a) Reducir el diámetro nominal de la válvula reguladora. Pese a que ello origina una pérdida adicional, por lo general sin importancia, el comportamiento de la válvula mejora cuando se la trabaja a mayor velocidad.
- (b) Utilizar actuadores programables. Con ellos será posible adoptar por lo menos dos velocidades de cierre de manera tal que la más lenta corresponda a la zona de válvula cerrada 20%, tal como se indica en el diagrama de la figura siguiente:
- (c)

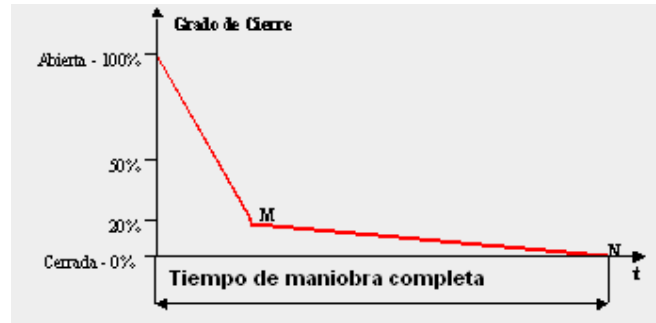


Figura 21

Actuadores programables

Para el cálculo de sobrepresiones será necesario estudiar dos puntos críticos en M y N, calculando la mayor variación de velocidad que puede darse durante un tiempo de maniobra de $2L/c$.

- (d) Instalación de Órganos de Regulación Compuestos. Se conecta en paralelo con la válvula principal un "by pass" de menor diámetro debiendo hacer secuencial la maniobra. Un cierto equilibrio técnico-económico se logra adoptando una válvula mariposa para la válvula principal y una válvula aguja para el by pass. Los tiempos individuales de maniobra y la relación de diámetro abren posibilidad a un gran número de variantes.

En general, para la selección de órganos de regulación recomendamos lo siguiente:

- Si hay considerable contrapresión (llegada a tanque elevado) adoptar la válvula mariposa.

- En todos los casos debe desecharse la válvula esclusa para regular caudales.

CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

Cuando en el extremo de descarga existe un reservorio de masa definida -no infinita como en el caso de aguas arriba, en lugar de un obturador nos encontramos con el fenómeno de oscilación de masa.

En este caso el líquido puede ser considerado en su conjunto oscilando a partir de la superficie libre del reservorio en uno u otro sentido y con celeridad infinita y $U = \text{cte}$ para todas las secciones, con lo que U varía sólo en función del tiempo.

La oscilación de masa con una de las ramas del sistema dimensionado para aceptar oscilaciones acotadas, se utiliza para proteger instalaciones de impulsión contra las sobrepresiones transitorias debidas al golpe de ariete.

Por ejemplo, para proteger a una conducción puede disponerse antes del obturador de un reservorio que posibilite transformar el "golpe de ariete" originado en la maniobra de cierre en una "oscilación de masa", acotada en el reservorio, el que recibe el nombre de "chimenea de equilibrio".

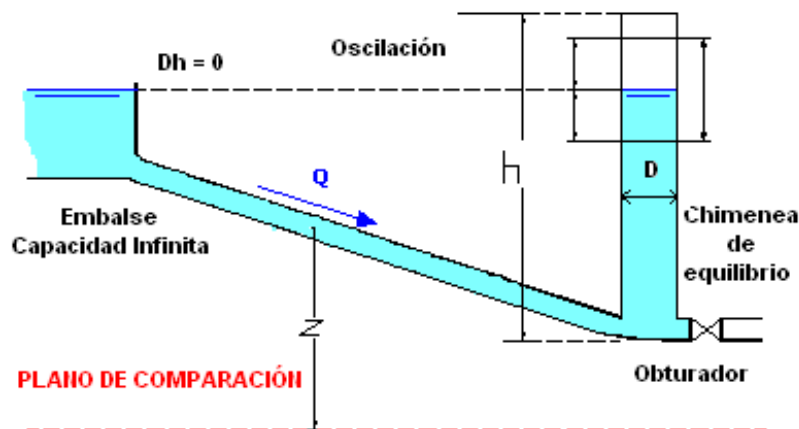


Figura 22
Chimenea de equilibrio

TANQUES DE AIRE

En los casos de una impulsión, muchas veces resulta impracticable la protección con una "chimenea de equilibrio" debido a sus elevados costos.

Para proteger la instalación de impulsión con una chimenea de equilibrio la altura h de la misma debería superar convenientemente la altura manométrica H_m provista por la bomba. Como en la mayoría de los casos esto resulta impracticable, la chimenea puede ser reemplazada por una cámara cerrada, de dimensiones reducidas, que disponga de un cierto volumen de aire que haga las veces de amortiguador.

Es el caso de las "cámaras de aire", las que implican también una oscilación de masa acotada pero con una condición de borde distinta:

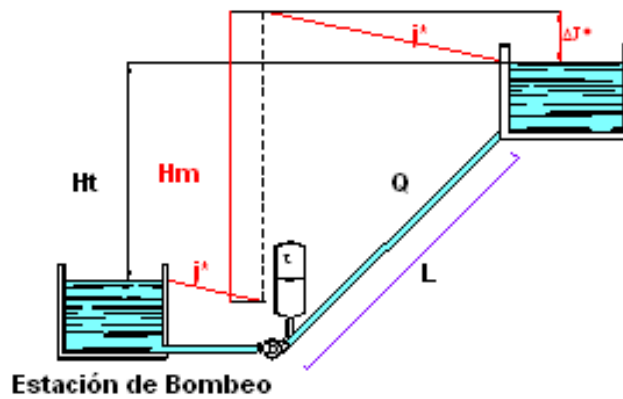


Figura 23
Tanque de aire

DEPÓSITOS UNI o BIDIRECCIONALES

Estos consisten en tanques de reserva ubicados en puntos estratégicos.

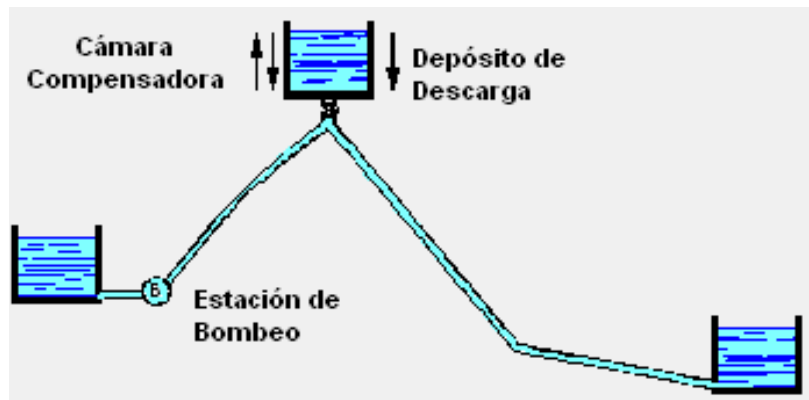


Figura 24
Depósitos uni o bidireccionales

En el caso de los Depósitos de Descarga, el flujo es unidireccional, es decir que únicamente pueden abastecer a la tubería, pero no a la inversa. Para lograr esto, el sistema posee una válvula de no retorno (“Check Valve”) en la tubería de conexión a la conducción principal.

La operación de estos depósitos consiste en ingresar agua en la tubería ante una onda de presión negativa (originada por Golpe de Ariete) con el fin de contrarrestarla. Es importante destacar que este tipo de dispositivo, si está bien dimensionado, no permite bajo ninguna circunstancia el ingreso de aire en la tubería.

Las Cámaras Compensadoras en cambio son de flujo bidireccional: cuando aparece una onda de depresión, descarga agua en la tubería; cuando viene la onda de sobrepresión, alivia a la tubería permitiendo la erogación del caudal de la misma.

Este último dispositivo, además, regula las presiones estáticas en el caso del detenimiento del sistema.

DISPOSITIVOS DE RAMALES EN PARALELO (Diagramas Triangulares)

Este método se aplica para analizar la ley de cierre de acueductos regulados aguas abajo con válvulas tradicionales.

Se propone el cierre secuencial con varios ramales en paralelo de diámetros decrecientes y con sus correspondientes válvulas.

El método a describir puede ser utilizado para un número n arbitrario de ramales. Ello no obstante, es oportuno aclarar que una regulación muy fina puede obtenerse, para grandes diámetros con 3 ramales y para diámetros menores de 500 mm con 2 ramales.

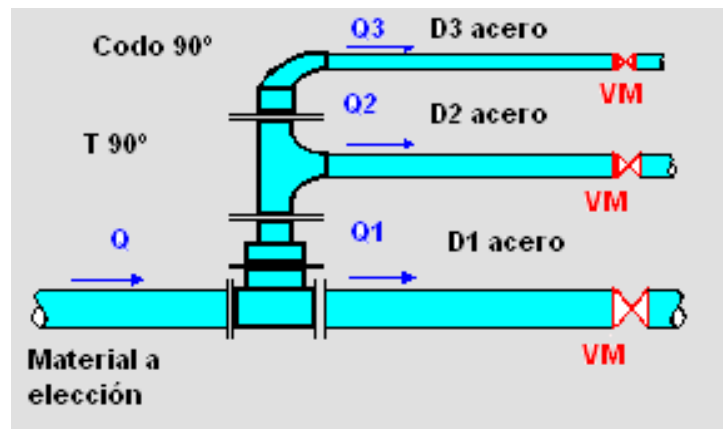


Figura 25
Dispositivo de ramales en paralelo

El procedimiento adoptado para la ley de cierre es el de cerrar las válvulas una a una en forma secuencial y con maniobras que duren $2L/c$ seguidas de períodos de "Uniformización del Régimen" o "descanso" de nL/c segundos de duración, variando n según el criterio del proyectista.

El tiempo estipulado para las maniobras de $2L/c$ se fundamenta en que la máxima sobrepresión para "cierres bruscos" tendrá lugar, en el obturador, justamente en ese momento configurando un diagrama triangular de envolventes de sobrepresiones.

Cada una de las maniobras de cierre dará lugar a un diagrama envolvente triangular el cual no deberá superar a un diagrama preestablecido.

El objetivo principal del método propuesto es el de posibilitar el diseño criterioso y racional de leyes de cierre por parte del proyectista de acueductos regulados aguas abajo, utilizando válvulas tradicionales y por lo tanto más económicas.

VÁLVULAS DE ÚLTIMA TECNOLOGÍA

Actualmente existen en el mercado todo tipo de válvulas de última tecnología que, en algunos casos, pueden ayudarnos inclusive a prevenir o acotar fenómenos transitorios.

De esta manera para proteger las instalaciones de impulsión se puede, por ejemplo, proceder a la instalación de una Válvula Anticipadora de Presión poco después de la bomba para contrarrestar la onda positiva y negativa. Esta última puede complementarse en toda la conducción con las válvulas de aire, cuyo cometido es el que no sea superada una dada depresión fijada como pauta de selección.

Ésta es una solución simple y muy efectiva. Se puede observar la sencillez de su implementación observando la figura 26 a continuación, donde se muestra una instalación típica para la Válvula Anticipadora de presión mencionada.

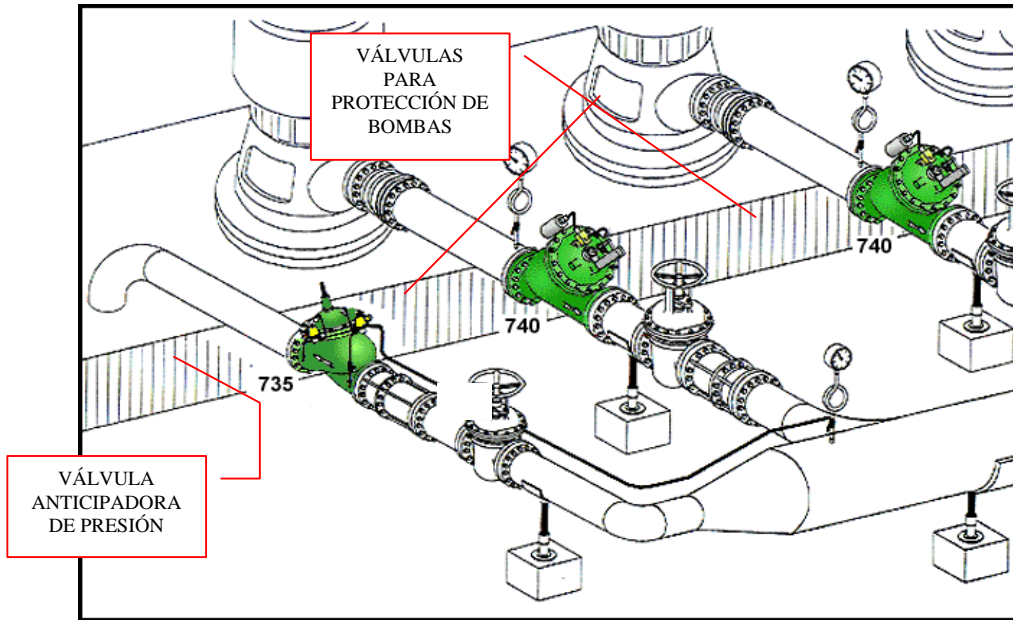
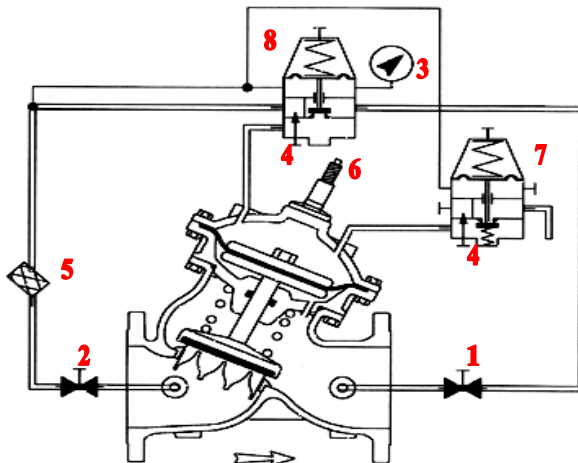


Figura 26

Válvula anticipadora de presión

Este tipo de válvula Anticipadora de Onda es automática y está especialmente diseñada para proteger bombas y tuberías del daño resultante de los cambios bruscos de velocidad del flujo ocasionados por el arranque y detención de las primeras, especialmente en el caso de detención abrupta a causa de una falla en el suministro de energía. En la figura 27 podemos apreciar en detalle su estructura interna:

Referencias:



- 1 - Válvula de Aislación
- 2 - Válvula de Aislación
- 3 - Manómetro
- 4 - Válvula Aguja
- 5 - Filtro de Control
- 6 - Dispositivo de Bloqueo
- 7 - Piloto 1
- 8 - Piloto 2

Figura 27

Estructura interna de la válvula anticipadora

Como puede apreciarse en la figura 27 se trata de una válvula de diafragma y doble cámara. La cámara de control inferior está conectada mediante un orificio ajustado a la presión aguas abajo lo que sirve para amortiguar el cierre de la válvula. La cámara de

control superior, que opera según un principio de control bidireccional, está sometida a presiones variables producidas por los pilotos de regulación y por la válvula aguja de restricción interna de dichos pilotos. Veamos como funciona:

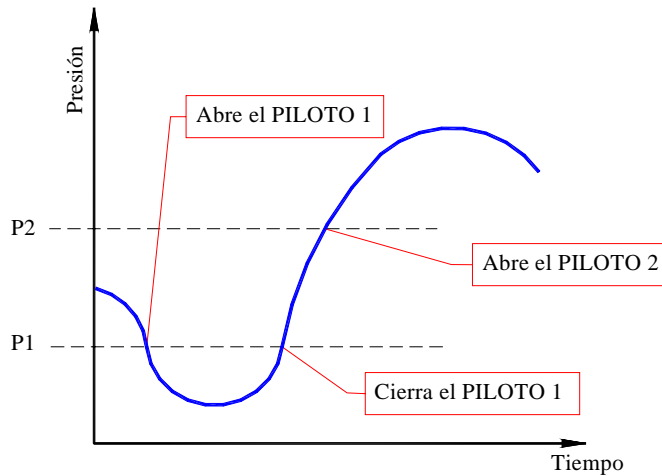


Figura 28
Principio de funcionamiento

La detención abrupta de una bomba generalmente produce una caída en la presión seguida de un incremento importante de la misma.

El Piloto 1 percibe esta caída inicial de presión y se abre, permitiendo que la válvula se abra anticipando el retorno de la presión más alta. Entonces, la válvula libera estas presiones más altas a la atmósfera. El Piloto 2, al sentir este incremento de presión, también se abre para mantener la válvula principal abierta.

Mientras la presión se disipa y se aproxima a un punto establecido, el Piloto 1 se cierra, entonces la presión en la cámara de control superior comienza a crecer y la válvula principal se cierra, permitiendo que la presión del sistema se incremente hasta el valor de presión prefijado para la apertura del Piloto 2.

Independientemente de la anticipación de la onda de presión, esta válvula también mantiene un nivel máximo de presión preestablecido expulsando la presión en exceso a la atmósfera. Cuando la presión del sistema sobrepasa la presión máxima mencionada, se abre el Piloto 2, entonces la presión en la cámara de control superior decrece y la válvula principal se abre para aliviar la presión y sostenerla en el nivel de seteo del piloto. Cuando la presión del sistema cae por debajo de este nivel el Piloto 2 se cierra, aumenta la presión en la cámara superior y la válvula se cierra para seguir manteniendo la presión de seteo.

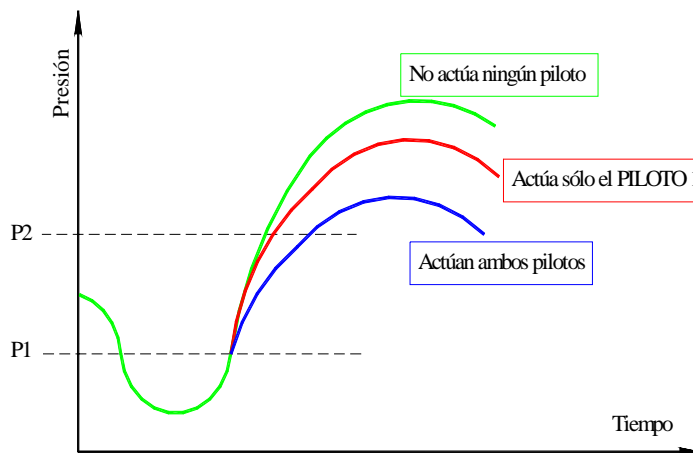


Figura 29

Esquema de funcionamiento para distintas situaciones

Por todo lo dicho anteriormente se puede deducir que la operación de la válvula se compone de dos fases: en la primera (entre la apertura y el cierre del Piloto 1) actúa como anticipadora de onda liberando agua para reducir el pico de presión próximo a producirse; en la segunda fase (a partir del cierre del Piloto 1) actúa como una simple válvula de alivio.

Ambos pilotos poseen un tornillo de ajuste para establecer los niveles deseados de alta y baja presión.

En la figura 30, que se expone a continuación, se esquematiza la protección de una impulsión mediante estas válvulas. En la misma, la altura manométrica H_m y las correspondientes líneas piezométricas implican o acotan las presiones del régimen permanente. Las sobrepresiones positivas y negativas (depresiones) en la impulsión sin ningún tipo de protección quedan convenientemente acotadas por los respectivos diagramas envolventes de sobrepresiones máximas, con sus correspondientes signos y referenciados al nivel estático fijado por la cisterna de descarga.

Evidentemente, en el caso hipotético que el diagrama de depresiones abarque a la impulsión, el piloto de la válvula posibilitará el ingreso de aire de manera tal que la depresión no baje de la prefijada cuando se calibró al mismo.

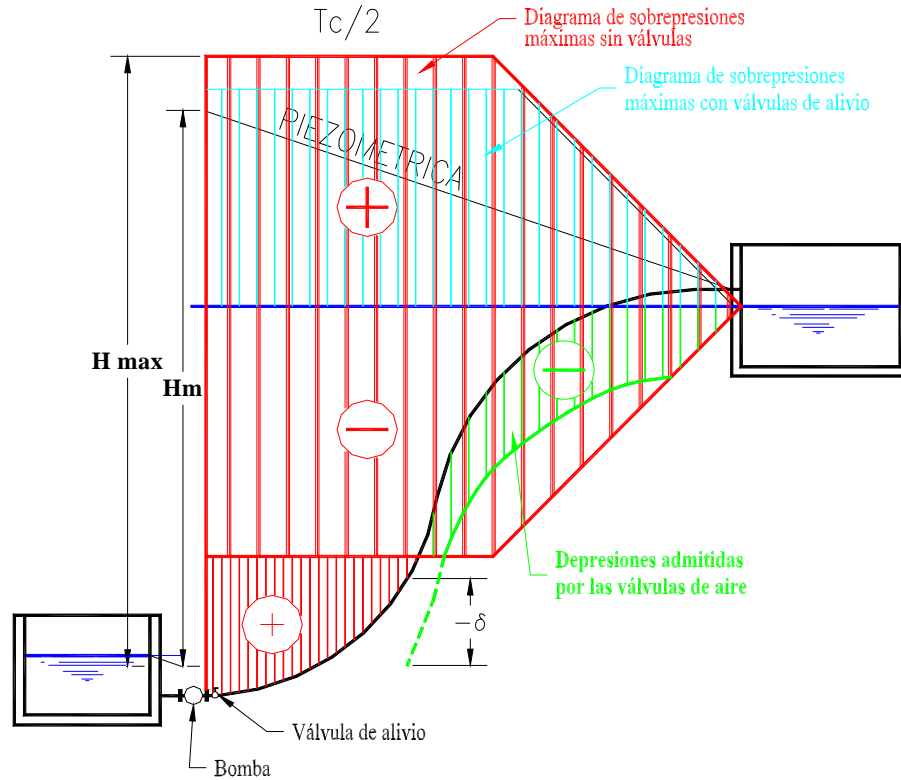


Figura 30
Esquema de impulsión

El caso esquematizado corresponde a una situación en la que el diagrama de envolvente de depresiones no corta a la conducción en su primera parte, por lo que en ese subtramo las presiones quedan positivas. La parte del diagrama que si corta y absorbe al tramo ascendente hacia el depósito de la conducción, quedará acotada por la depresión admitida para las válvulas de aire y que constituyen el parámetro fundamental para su selección.

Nótese que la forma de contrarrestar los efectos del Golpe de Ariete con la Válvula Anticipadora de Presión y las Válvulas de Ingreso de Aire, a presión de línea, constituyen un confiable sistema que resulta, además, muy económico.

Influencia de las Características de la Tubería en el Fenómeno

La Celeridad de Onda “c” con la que se produce el fenómeno de Golpe de Ariete es fundamental a la hora de determinar las sobrepresiones máximas y mínimas resultantes, ya que las mismas resultan directamente proporcionales.

Ahora, el valor de “c” no sólo depende de las características del fluido sino también de las condiciones de “confinamiento” del mismo. Por lo tanto, las propiedades de las tuberías

(diámetro, espesor, módulo de elasticidad) constituyen un factor importantísimo en el fenómeno transitorio resultante en la conducción.

La celeridad “c” representa valores del orden de 300 a 400 m/s en las conducciones de materiales plásticos y de 980 a 1200 en las conducciones rígidas, siendo en general función del diámetro, del espesor y del módulo de elasticidad del material del caño.

Nótese que fácilmente se obtienen para el caso de los caños de materiales rígidos, valores de sobrepresión máxima que responden a la siguiente expresión aproximada (que se obtiene considerando $c \cong 1000$ m/s y $g \cong 10$ m/s²):

$$\Delta h_{\text{máx}} \cong 100 U$$

Con idéntico criterio tendremos para los caños flexibles:

$$\Delta h_{\text{máx}} \cong 40 U$$

Una velocidad de diseño común, o al menos el orden de magnitud es $U = 1$ m/s, por lo que se deduce que son alcanzables sobrepresiones máximas del orden de los 100 m.c.a. (10 atm) para caños rígidos y del orden de los 40 m.c.a (4 atm) en caños flexibles.

Las magnitudes de sobrepresión puestas en juego justifican plenamente las posibilidades de colapso de conducciones de caños rígidos y la necesidad de que los ingenieros evalúen y proyecten, criteriosamente, los órganos y maniobras de cierre.

PRESTACIÓN 4: VERIFICACIÓN CONSIDERANDO LAS CARGAS DEBIDAS AL RELLENO

Generalidades

Evidentemente, el material de relleno de la zanja habrá de ejercer una acción o sollicitación sobre la tubería que tenderá a deformarla (ovalizarla) en función de las características elásticas de la misma y del suelo de apoyo. Obviamente, la intensidad de la sollicitación dependerá de las características del suelo del relleno y de apoyo y de la “Interacción Zanja-Tubería”.

Aquí cobra especial sentido la consideración relativa a la mayor o menor deformación de la tubería según se comporte ésta como rígida o flexible.

En este último caso la mayor deformación implica reacciones laterales que deberán ser equilibradas por los prismas laterales de la zanja, las que deberán ser en consecuencia debidamente compactadas.

La selección de la tubería más adecuada y el correspondiente diseño de la zanja (en general distintas para los distintos materiales del mercado) constituye una decisión ingenieril laboriosa que debe ser cuidadosamente meditada.

Concepto de Tuberías Rígidas o Flexibles

En primera aproximación, definimos a las tuberías rígidas como aquellas que colapsan al ser sometidas a cargas de aplastamiento con deformaciones pequeñas de su diámetro vertical (menores al 1 %).

Las tuberías flexibles colapsan la forma antes que el material puesto que la deformación de su diámetro vertical (deflexión) puede llegar hasta valores muy altos, ovalizándose sin que se rompa, pero colapsando la forma de manera inaceptable (por los problemas que trae a las uniones y pérdida de estanqueidad en las mismas). La deflexión máxima admitida en las normas es del 5 %.

Condiciones de Instalación en Zanja

Condición de Zanja Angosta

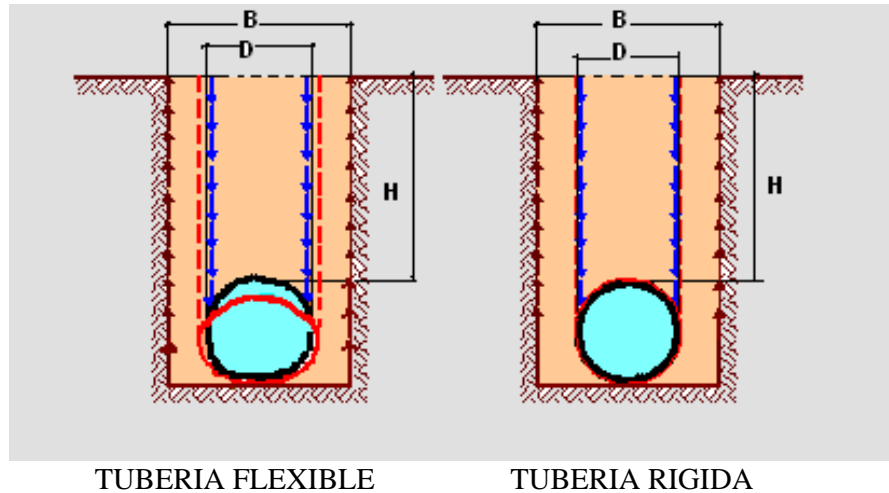


Figura 31
Esquema de zanja angosta

Se define así el caso en el que el ancho B de la zanja es relativamente poco mayor que el diámetro externo de la tubería instalada.

En la figura 31 puede apreciarse la instalación de tuberías flexibles en el primer caso y rígidas en el segundo.

Nos encontramos en el primer caso cuando la tubería se deforma considerablemente en el diámetro vertical, admitiendo una deflexión máxima del 5 % del mismo, ovalizándose debido a las cargas externas hasta ese valor permitido. Los prismas laterales del suelo de relleno tienen la misión de detener y acotar la ovalización.

En el caso de las tuberías rígidas, a las deformaciones correspondientes tan sólo al 1 % de deflexión frente a la acción de las cargas externas le sobreviene inmediatamente el colapso.

Tanto en un caso como en otro la zanja angosta alivia las cargas que efectivamente incidirán sobre la tubería debido a las fuerzas de frotamiento que se inducen en los planos verticales tangentes a la misma. En efecto en el caso de ser esta flexible con respecto al relleno, se deformará más que el prisma central, el que en cierta forma “se colgará” de los planos laterales, los que transmitirán esfuerzos hasta que lleguen a las paredes de la zanja, de donde a su vez se “cuelgan” estos prismas laterales. En este caso tenemos un doble efecto de arco, como resultado del cuál la carga que realmente incide sobre la tubería es considerablemente aliviada.

En el caso de una tubería rígida, se tiene que esta se deforma menos que el prisma central de relleno. Consecuentemente, los planos tangentes transmiten esfuerzos de fricción que se trasladan hasta las paredes de la zanja, las que se encuentran relativamente próximas. Tiene así lugar un efecto de arco simple, puesto que no toda la carga incidirá sobre la tubería.

Es evidente que en uno u otro caso, la zanja angosta ayuda puesto que alivia las cargas que recibiría la tubería de ser B muy grande (zanja ancha).

Condición de Instalación en Terraplén

El caso siguiente constituye la instalación en Terraplén (caso teórico en que B es infinito) o Zanja Ancha (caso particular del anterior más frecuente en la práctica).

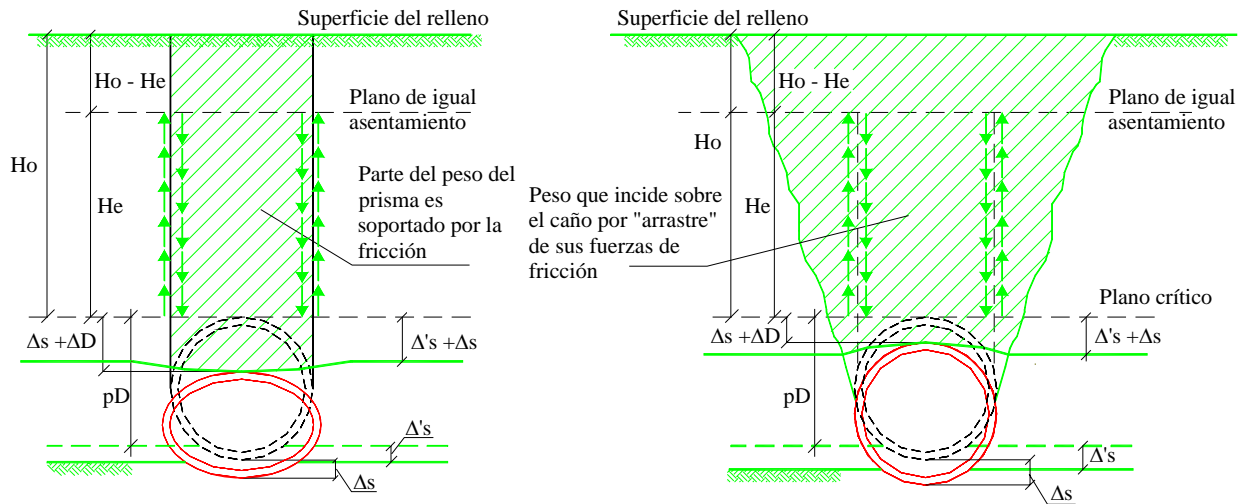


Figura 32
Zanja ancha

En ambas figuras puede ser apreciado que no existe el alivio de las cargas que posibilita la cercanía de las paredes de la zanja, es decir no se pone de manifiesto el beneficioso "efecto de arco". Es por ello que las tuberías resultan más exigidas en esta condición de instalación, por lo que al tener que resistir más cargas deberán contar con mayor espesor y/o mejores condiciones de acondicionamiento en zanja.

Importancia de la Zanja

El desarrollo anterior pone en evidencia claramente la importancia de la "interacción tubería zanja", aspecto que el proyectista deberá evaluar en su diseño. Ya hemos mencionado con anterioridad, que el efecto de la zanja resulta función de la granulometría de su lecho, de las propiedades del suelo del fondo, de los laterales, del ancho B y de sus propiedades mecánicas, todas estas variables combinadas ejercerán acciones que pueden ayudar a la tubería a resistir las cargas en mayor o menor grado.

En el caso de las tuberías flexibles, su poca resistencia al aplastamiento hace que la importancia de la zanja sea aún más relevante que en el caso de las tuberías rígidas. En efecto los laterales de las zanjas fuertemente compactados evitan o acotan la ovalización

de la tubería, la que sólo aporta hasta un máximo de un 20 % como resistencia propia a la deflexión. El 80 % restante lo debe aportar la zanja, o más precisamente sus prismas laterales fuertemente compactados.

Ecuaciones de Marston

La expresión de Marston es:

$$Q = c_D \gamma B^2$$

Para el caso de terraplén (zanja ancha como caso particular) al no existir las paredes laterales (al menos lo suficientemente cerca como para posibilitar el alivio de las cargas) la acción es directamente sobre el Diámetro externo de la tubería D .

La ecuación para condiciones de terraplén se transforma en:

$$Q = c_c \gamma D^2$$

Siendo:

$$c_c = \frac{e^{\pm 2k\mu \frac{H}{D}}}{\pm 2k\mu}$$

Uso de la Ecuación de Marston para el Cálculo de las Cargas debidas al Relleno

Consideraciones Generales para las Ecuaciones de Aplicación en Condiciones de “Zanja Angosta” y “Zanja Ancha”

En resumen, el desarrollo de la teoría lleva para la evaluación de la carga de relleno a las ecuaciones de Marston:

$$Q = C_D \gamma B^2$$

$$Q = C_C \gamma D^2$$

Válida la primera para condición de “Zanja Angosta” y para condición de “Terraplén” la segunda (la zanja ancha como caso particular de aplicación).

En las mismas γ es el “peso específico del material de relleno” y B es el ancho medido en el fondo de la zanja.

Es de destacar que dimensionalmente las anteriores implican cargas (Fuerza) por unidad de longitud de zanja.

Los coeficientes c_D y c_c son funciones de las dimensiones de la zanja (Tapada H y ancho B) y de los parámetros propios del suelo de relleno y de la tubería, en especial su diámetro externo “ D ”.

Las normas para cada tipo de tubería posibilitan su evaluación en función del tipo de suelo, y en el caso de c_c , también del tipo de instalación en terraplén.

En las expresiones previas los coeficientes c_D y c_c están dados por:

$$c_D = \frac{1 - e^{-2k\mu \frac{H}{B}}}{2k\mu} \quad \text{y} \quad c_c = \frac{e^{\pm 2k\mu \frac{H}{D}}}{\pm 2k\mu}$$

En las que:

- e es la base de los logaritmos neperianos.
- k es el “coeficiente de Rankine” .
- ρ es el “ángulo de fricción interna” del material de relleno.
- $\mu = \text{tg } \rho$ es el .”Coeficiente de fricción Interna” del material de relleno.
- $\mu' = \text{tg } \rho'$ es el “Cociente de fricción interna” entre material de relleno y las paredes de la excavación, siendo ρ' el ángulo de fricción correspondiente.

En resumen, las ecuaciones de aplicación práctica, al menos para los materiales de tuberías mas tradicionales, se presentan en el cuadro resumen de la figura 33. Las expresiones más utilizadas en la práctica son las que se encuentran sombreadas en el cuadro resumen.

Los coeficientes y valores de las constantes necesarias para el cálculo de las cargas debidas al relleno de las zanjas, son provistos en las distintas normas vigentes para los distintos materiales de tuberías en forma de Tablas o gráficos.

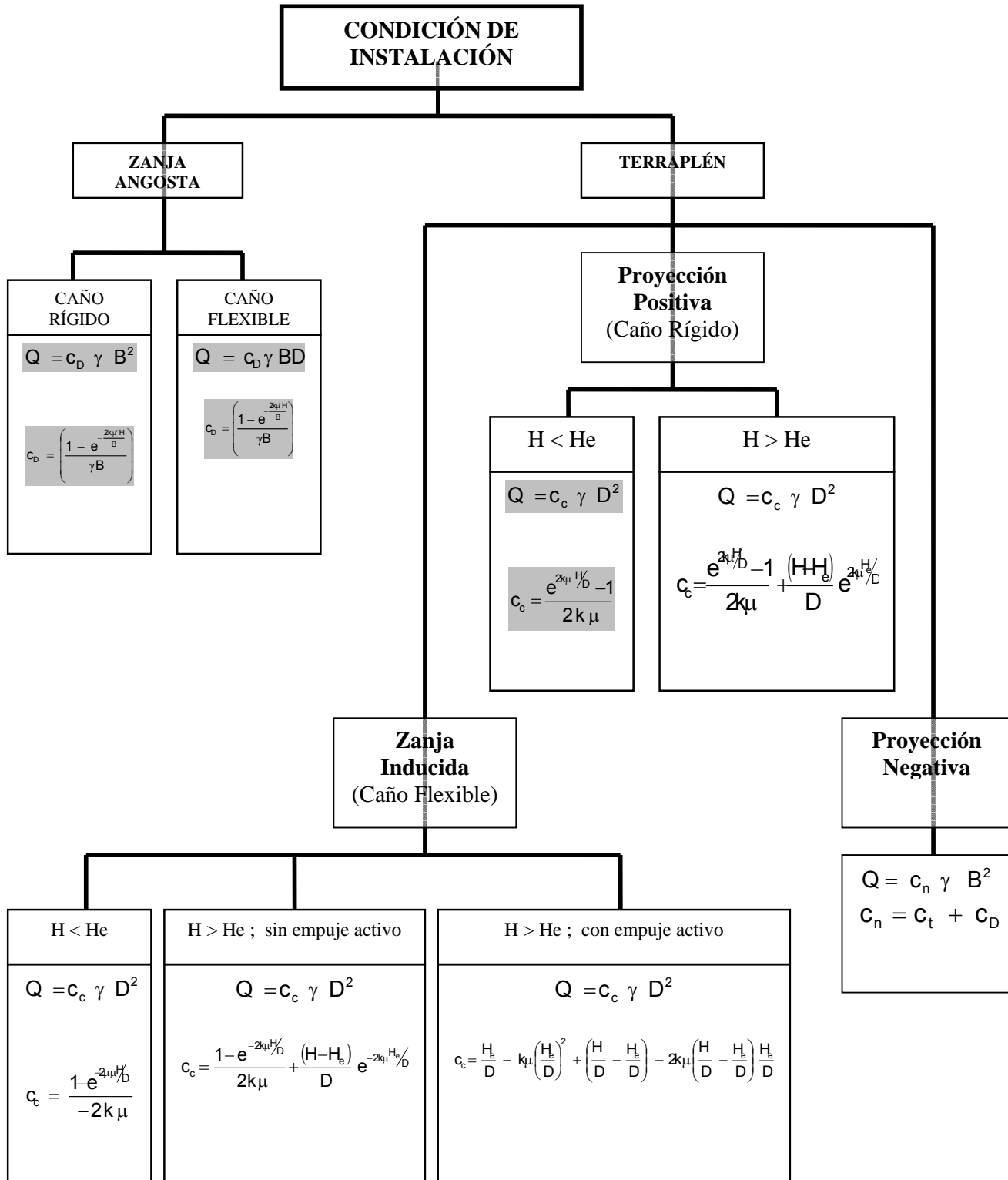


Figura 33
Cuadro resumen

PRESTACIÓN 5: VERIFICACIÓN CONSIDERANDO LAS CARGAS DEBIDAS AL TRÁNSITO

Teoría de Boussisneq para la Evaluación de las Cargas Dinámicas de Tránsito

Generalidades

La teoría de referencia corresponde específicamente a la Mecánica de Suelos y en el caso que nos ocupa se la utilizará sin desarrollarla. De mediar interés por parte del lector se lo remite a la bibliografía especializada.

Ello no obstante, se realizará un análisis conceptual de los criterios rectores de la teoría con miras a su inmediata aplicación práctica para la evaluación de las cargas dinámicas debidas al tránsito vehicular de todo tipo actuante sobre las tuberías instaladas en zanja.

En la figura 33 puede ser apreciado el modelo conceptual que considera la teoría. Se considera como “Hipótesis Simplificativa” una carga concentrada “ P ” aplicada a una superficie horizontal de un “cuerpo infinitamente extenso, isotrópico y homogéneo” y además “elástico en el rango de variación de la fuerza P ”.

El modelo de Boussisneq permite evaluar la Tensión en un punto genérico (punto material de dimensiones infinitesimales) ubicado por la altura “ h ” y ángulo “ θ ” tal como puede ser apreciado en el esquema de la Figura 33.

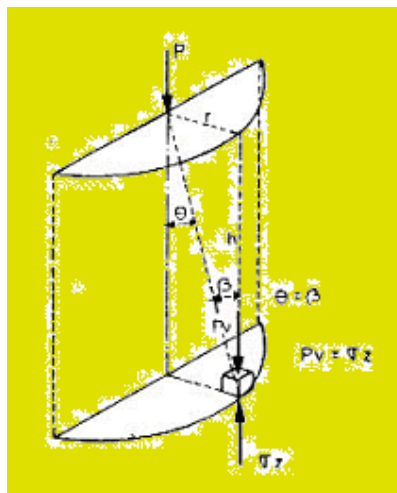


Figura 34
Teoría de Boussisneq

En la figura 34 se puede apreciar que en el elemento diferencial sometido al estado de tensiones que se pretende evaluar, los símbolos utilizados para la tensión, necesariamente

iguales en las caras del elemento, son $\sigma_z ; p_v$, reservándose el primero para la cara de abajo y el segundo para la de arriba.

El desarrollo de la teoría posibilita llegar a la expresión de la tensión σ_z en el punto en estudio dada por:

$$\sigma_z = \frac{3 P}{2 \pi r^2} \cos^3 \theta$$

La relación trigonométrica existente entre r y h posibilita reemplazar en la anterior la que queda entonces:

$$\sigma_z = \frac{3 P}{2 \pi h^2} \cos^5 \theta$$

INTEGRACIÓN

La distribución de tensiones que surge de la integración de la ecuación de Boussinesq tiende a uniformizarse a medida que el plano de aplicación considerado sea más profundo. De allí que se especifiquen tapadas mínimas para las tuberías instaladas en zanja. A medida que el diámetro aumenta para lograr distribuciones más uniformes lógicamente las tapadas deberán ser mayores.

Por ello la experiencia recomienda tapadas no menores a 1, 20 m para diámetros de hasta 700 mm y de 1,50 m para los mayores. En caso de que deban ser instaladas necesariamente a tapadas menores, precauciones especiales deberán ser tenidas en cuenta (mejora de rellenos, losetas de suelo- cemento u hormigones de distintas categorías en función de la necesidad, geogrillas, etc.).

La integración realizada por Hooll Newmarck, sumamente compleja por cierto, lleva a la sencilla expresión final:

$$p_{vc} = \phi c_c P$$

En la que las complejidades de las ecuaciones quedan circunscriptas dentro de los coeficientes que a continuación se describen. Los términos de la ecuación implican:

- P_{vc} presión debida a la carga vertical que actúa sobre la tubería enterrada.
- ϕ coeficiente de impacto (adimensional) que disminuye considerablemente al aumentar la tapada.
- C_c coeficiente de carga obtenido de la integración y la composición con el resto de las acciones debidas al tren de carga en consideración.
- P es la carga debida a una única rueda (dimensionalmente fuerza).

Para pasar de la presión a la carga por metro de desarrollo longitudinal de la tubería, evidentemente la presión dada por la ecuación de Boussinesq debe ser multiplicada por el diámetro externo de la tubería “D”. Por lo que la carga resulta:

$$P_v = p_v D$$

Es oportuno señalar que la expresión de C_C es muy compleja y variable con los distintos tipos de camiones y reglamentaciones de los distintos países, por lo que se encuentra una importante diversidad en las normas nacionales en general.

El coeficiente implica la acción conjunta de las diversas campanas correspondientes a cada una de las cargas que componen el tren de cargas normalizado, de allí su complejidad para el caso de las normas más modernas y por lo tanto más exactas.

A los efectos de dar idea del contenido de las mismas, se destaca que la ecuación del coeficiente C_C resulta para los criterios modernos:

$$C_C = \frac{1}{D} - \frac{0,6366}{D} \left[\text{arc sen} \left(2H \frac{X_1}{X_2 X_3} \right) - \frac{2HD}{X_1} \left(\frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_3} \right) + \frac{\sum L_i}{H^2} \right]$$

En la que:

$$X_1 = 4 H^2 + D^2 + 1$$

$$X_2 = 4 H^2 + 1$$

$$X_3 = 4 H^2 + D^2$$

Y además $\sum L_i$ depende de la distancia entre ejes y ruedas de los distintos camiones tipo.

En cuanto al coeficiente de Impacto las normas más antiguas lo consideran con la expresión:

$$\phi = 1 + \frac{0,3}{H}$$

En cambio los criterios más modernos tienen en cuenta que el coeficiente depende más que de la tapada del peso del camión y de su velocidad.

Los nuevos criterios adoptados sobre todo en la normativa europea, han considerado el criterio de “Tapada Equivalente” originado en una distribución más real de las tensiones en función de las distintas capas (con a su vez distintas propiedades mecánicas) que conforman el pavimento.

El concepto se fundamenta en encontrar una Tapada Equivalente “ H_e ” que mayor a la tapada real “H” con la siguiente ecuación:

$$H_e = H + \frac{0,9}{E_s^{0,333}} \sum_{i=1}^{i=n} t_i E_s^{0,333}$$

En la que cada capa tiene su espesor “ t_i ” y su módulo “ E_i ” siendo “ E_s ” el módulo resistente del suelo natural.

Las normas facilitan mediante tablas de valores los datos que posibilitan el cálculo de la anterior.

FORMAS DE LA EXPRESIÓN DE SPANGLER

La Teoría de Spangler lleva a la práctica expresión:

$$\delta = \frac{[D_l Q + Q_v] K}{\frac{EI}{r^3} + 0,061 E'}$$

En la que:

- δ es la deflexión del diámetro vertical.
- Q es la carga debida al relleno evaluada con la teoría de Marston.
- D_l es un coeficiente de mayoración que tiene en cuenta la deformación en el tiempo.
- Q_v es la carga debida al tránsito.
- R es el radio de la tubería.
- E' es el módulo resistente del suelo.
- E es el módulo de inercia del material de la tubería.
- K es el coeficiente de apoyo.

El coeficiente de mayoración varía desde 1 para material perfectamente compactado hasta 2 para compactado insuficiente (en general se adopta el valor 1,5).

Los valores de E e I los obtiene el fabricante cumplimentando sus normas de fabricación para cada clase de la tubería y los brinda como información en sus catálogos cuando el material de la misma es homogéneo.

En el caso de los materiales heterogéneos (caso del PRFV) el proceso es el que se detalla a continuación.

La expresión de la Rigidez del caño para el ensayo de aplastamiento resulta:

$$R_{sc} = 0,149 \frac{P}{\Delta y}$$

Dado que R_{sc} es de difícil evaluación directa por la heterogeneidad del espesor de la tubería se procede a determinarla en función del ensayo de aplastamiento, fijándose como definición de la “Rigidez Mínima Nominal” del tubo la correspondiente a la relación $\frac{P}{\Delta y}$ obtenida del ensayo cuando se logra una deformación porcentual preestablecida (3 %;...; 5 %) fijadas por las normas de cada material.

Los valores de E' se obtienen en función del tipo de suelo de las normas de referencia.

Las cargas de relleno y las de tránsito se obtienen por aplicación de las teorías respectivas esbozadas más arriba escuetamente y complementando las normas de aplicación para cada material de tubería.

El coeficiente k , es una compleja función del ángulo α que subtiende el sector de perímetro de apoyo. Se determina en función del tipo de zanja elegida y su valor es contemplado y obtenible de las normas que regulan la aplicación del cálculo estructural del material respectivo.

La condición de verificación de las tuberías flexibles es que la deflexión δ para la tubería instalada en la zanja elegida y proyectada no supere el 5 % del diámetro.

EXPRESIÓN DE SPANGLER TENIENDO EN CUENTA LAS DISTINTAS PROPIEDADES DEL SUELO DE RELLENO Y EL NO ALTERADO POR LA EXCAVACIÓN

La industria del PRFV utiliza la expresión de Spangler teniendo en cuenta el coeficiente “ S_c ” impuesto por las normas AWWA, el cual afecta al término de rigidez del suelo de relleno teniendo en cuenta la influencia que sobre éste tiene la distinta compresibilidad del suelo no alterado por la zanja.

Para ello se reemplaza en la expresión de Spangler el valor E' por la siguiente expresión:

$$E' = S_c E'_b$$

En la que:

- E' es el Módulo combinado de reacción del suelo.
- S_c es el Factor de combinación del suelo de soporte (adimensional a obtener de tablas).
- E'_b es módulo de reacción del suelo en la región de apoyo de la tubería (a obtener de tablas).

Para el uso de la tabla (5-4) de la AWWA M 45, la cual propociona los valores de S_c , es necesario conocer el ancho de la zanja “ B_d ” al nivel del “extradós” de la tubería y el “módulo de reacción E'_n ” del suelo nativo a la altura de la misma, el cual se brinda en tablas de la misma norma de diseño.

La expresión de cálculo para ese caso se escribe en consecuencia:

$$\delta = \frac{[D_l Q + Q_v] K}{\frac{EI}{r^3} + 0,061 S_c E'_b}$$

Conceptos de interés para el Cálculo e instalación de las tuberías “flexibles”

Aporte de la Zanja en la Resistencia a la Ovalización

Es oportuno escribir la expresión de Spangler a los efectos del desarrollo conceptual que sigue en forma simplificada y de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{F_c}{F_{rc} + F_{rs}}$$

En la que:

- F_c es el “Factor de Carga” asociado al término $[D_l Q + Q_v] K$.
- F_{rc} es el “ Factor Resistente del Caño” o “Rigidez” de la tubería:

$$F_{rc} = \frac{E I}{r^3} = \frac{2 E}{3 (R - 1)^3}$$

- F_{rs} es el “Factor Resistente del Suelo de Apoyo” correspondiente al término $0,061 E'$.

Resulta oportuno recordar que en las tuberías flexibles el aporte de la “rigidez” propia de la tubería para resistir su deflexión ante las carga externas, oscila entre 10 y 20 %, por lo que el 90 a 80 % restante necesario, lo debe aportar necesariamente la zanja, y más precisamente sus laterales, con el compactado suficiente para que la ovalización no continúe en el tiempo y se mantenga en los valores prefijados (las normas fijan que no debe superarse el 5 % del diámetro vertical). De lo expuesto precedentemente surge el concepto fundamental que, en el caso de las tubería flexibles, la interacción “Tubería -Zanja” no sólo es importante (como lo es para las tuberías que se comportan como rígidas) **sino que además es determinante en la resistencia al “Aplastamiento”**. Puede decirse entonces que en general las tuberías flexibles resisten con gran eficiencia a las tensiones derivadas de la presión interna, pero las cargas que motivan la ovalización deben ser resistidas fundamentalmente por las condiciones mecánicas de la zanja en la que es instalada.

Se estima conveniente desarrollar brevemente un ejemplo ilustrativo en lo conceptual para comprender en general el comportamiento de las tuberías flexibles.

Si se toma una hoja de papel, se puede apreciar la enorme resistencia que presenta al esfuerzo de tracción si se lo somete al mismo jalando de dos extremos. Ésta es una propiedad común a todos los materiales con los que se hacen las tuberías con tendencia a comportarse como “flexibles” (incluidas las de acero de poco espesor).

Cuando una tubería está sometida a presión interna sus paredes están, a su vez, sometidas al esfuerzo de “tracción pura”. En general la aplicación de la fórmula de Mariotte o de sus similares arroja valores muy pequeños de los espesores necesarios como consecuencia de su elevada resistencia (al igual que el caso del papel) a éste esfuerzo.

Volviendo al ejemplo, si se forma un tubo con la hoja de papel, se puede observar que con muy pequeñas sollicitaciones el mismo se puede ovalizar fácilmente. Si se pretende aumentar su resistencia al aplastamiento o lo que es lo mismo, la “rigidez” de la sección transversal, se procede enrollando el papel, aumentando el espesor con los sucesivos arrollamientos, a la vez que se reduce el diámetro, cambiando así drásticamente la relación “Diámetro- Espesor”. Es fácil comprobar entonces que para ovalizar al nuevo tubo obtenido es necesaria una sollicitación de aplastamiento muy superior.

El ejemplo posibilita entonces:

- a) Comprender porque las tuberías flexibles necesitan de la zanja para resistir el aplastamiento y limitar la ovalización a valores que no pueden ser superados.
- b) Interpretar con mas claridad conceptual, como el espesor, y mas precisamente la relación D/e juega un rol fundamental en la resistencia o rigidez.
- c) Comprender también porque son sobredimensionadas las tuberías por los fabricantes frente a los espesores requeridos para la resistencia a la tracción pura (presión interna) dado que necesitan un mínimo de rigidez para su transporte, manipuleo y resistencia en zanja a las cargas externas.
- d) Interpretar el concepto de Rigidez, puesto que éste no es inherente tan sólo a las propiedades mecánicas del material (de por sí de gran resistencia a la Tracción) sino que como puede deducirse de la expresión y de la experiencia del simple ejemplo el “Momento de Inercia baricéntrico de la pared de la tubería” juega un rol preponderante.
- e) Comprender que, con los materiales usuales de las tuberías conocidas como Flexibles “a priori” se podrían lograr tuberías “Rígidas” pero a costos que las sacarían de competencia para lograr los espesores requeridos para esa característica.
- f) Comprender que dentro de los materiales de comportamiento como flexible, existe un comportamiento relativo medido por la “Rigidez Transversal” que tendrá gran incidencia económica en las tuberías instaladas en zanja.

Verificación al pandeo

Al ser las tuberías instaladas en zanja de comportamiento flexible frente al estado de cargas, su característica distintiva de pequeño espesor frente al diámetro, hace que sean susceptibles a deformarse por el efecto de inestabilidad debidas a las cargas denominado pandeo.

La expresión para ésta última, considerada por las AWWA M 11 (acero) Y AWWA M 45 (PRFV) es idéntica y resulta:

$$q_a = \left(\frac{1}{FS} \right) \left(32 R_w B' E' \frac{EI}{D^3} \right)^{0,5}$$

En la que:

- q_a es la presión permitida por pandeo.
- FS es un coeficiente de seguridad, que vale 2,5 para $h/D \geq 2$ y 3 para $h/D < 2$, siendo h la tapada sobre la tubería y D el diámetro externo de la misma.
- E' es el Módulo de reacción del suelo.
- R_w es el Factor de influencia del agua sobre la tubería dado por:

$$R_w = 1 - 0,33 \frac{h_w}{h} \text{ para } 0 \leq h_w \leq h$$

- B' es una coeficiente empírico y adimensional que tiene en cuenta “el soporte elástico” y cuyas expresiones pueden obtenerse de las normas.



“Pautas para el Diseño, Cálculo y Selección de Tuberías en Base al Criterio de Prestaciones Equivalentes”



REFERENCIA A LA TEORÍA MODERNA SOBRE CÁLCULO ESTRUCTURAL DE TUBERÍAS INSTALADAS EN ZANJA

GENERALIDADES

Las normas europeas de cálculo estructural de caños, especialmente las normas ISO, están fundadas en criterios modernos basados en un perfeccionamiento realmente profundo de la teoría tradicional definido por los siguientes conceptos rectores:

- El sobredimensionamiento comprobado de las cañerías instaladas calculadas con las teorías tradicionales.
- La determinación dificultosa de muchas variables de la teoría tradicional. En especial el “coeficiente de asentamiento τ_{SD} ” de aplicación en instalaciones en terraplén.
- La difícil diferenciación entre los casos de “zanja angosta” y “zanja ancha”, la que es imprecisa en la teoría tradicional a punto tal que los diferentes autores brindan valores que difieren hasta en un 100 %.
- La dificultad de cálculo de la altura sobre el extrados de la tubería del “plano de igual asentamiento”. El concepto constituye el pilar de la aplicación de las ecuaciones de la teoría tradicional y si bien racionalmente es de una lógica total y fácilmente comprensible su aplicación es sumamente dificultosa.

La moderna teoría se basa en útiles correcciones conceptuales de la teoría clásica y la corroboración de los resultados experimentales, posibilitando una correlación mucho más ajustada entre valores predichos por la teoría y los medidos efectivamente en la realidad. Los ajustes se realizaron con la aplicación de una modelación basada en la “Teoría de los elementos finitos”.

Esta nueva herramienta de cálculo posibilita, consecuentemente, una actualización (a la vez que fusión) de las Teorías de Marston y Spangler, que permite obtener valores de las deformaciones mucho más aproximadas a los parámetros que pueden medirse en la realidad.

Los nuevos criterios adicionales y enriquecedores de la Teoría Tradicional establecen que el grado de deformación del caño instalado en zanja depende de:

- El tipo de material de relleno y de su grado de compactación.
- El tipo de suelo natural en el fondo y los laterales, claramente diferenciados entre si y sobre todo del material de relleno.
- La distancia del caño a las paredes de la zanja.
- La profundidad de la zanja.

- El tipo de apoyo, sobre todo teniendo en cuenta sus propiedades elásticas, y diferenciando las mismas en los sentidos vertical y horizontal.
- El tipo de caño, en cuanto a sus propiedades dimensionales y mecánicas, en forma mucho más precisa, sobre todo en lo relativo a la “interacción tubería-zanja”.

Todos los parámetros mencionados y su correcta evaluación permiten determinar la distribución de presiones debidas al suelo alrededor del caño y correlacionarla con la deformación de este último.

El método planteado es válido para cualquier material del caño, por lo que la teoría es válida para ser aplicada en todos los casos, lo que implica un importante avance conceptual sobre los criterios tradicionales, los que definen tratamientos distintos juzgando prácticamente “a priori” la condición de “Rígido o Flexible” de la tubería a ser utilizada.

En lo referente a la cargas debidas al relleno, la Teoría de Marston nació para Tuberías Rígidas instaladas en zanja angosta y se la fue extrapolando para distintas condiciones de instalación y “acondicionando” a los caños flexibles.

Las tuberías de comportamiento como Rígido o Flexible, tienen en la Teoría tradicional, un tratamiento diferenciado, tanto en la evaluación de las cargas como en el comportamiento de las tuberías frente a las mismas.

La nueva teoría nació del hecho comprobado que los caños de materiales rígidos se comportaban como tales para diámetros relativamente pequeños. Al proveer la industria diámetros cada vez mayores, se pudo observar que aparecieron comportamientos intermedios, que podían caratularse como de “semirrígidos”.

En particular para los caños de asbesto-cemento, que durante muchos años fueron utilizados en todo el mundo, este hecho empezó a notarse con caños de diámetros superiores, haciéndose particularmente notable a partir del diámetro 1000 mm. Las relaciones entre cargas y deformaciones se hacen en este caso cualitativamente similares a caños de PVC entre diámetros 200 y 400 mm.

En base a lo expuesto, la nueva teoría, **que puede considerarse “unificada”** posibilita el cálculo de caños de cualquier material, **los que pueden comportarse como “rígidos”, “flexibles” o “semirrígidos” y además integra en un único proceso de cálculo, tanto a las cargas actuantes como la interacción “Tubería- Zanja”.**

Si bien en éstos tiempos los cálculos son siempre realizados a través de utilitarios, es de destacar que la nueva teoría moderna sería de imposible realización (o al menos sumamente engorrosa) sin la inestimable ayuda del soporte digital.

En el texto relativo a “Nociones de Cálculo Estructural de Tuberías instaladas en Zanja” (que está inserto en el CD que se entrega a cada asistente al presente curso) se avanza en los conceptos rectores y distintivos de esta teoría, que es racionalmente

“Pautas para el Diseño, Cálculo y Selección de Tuberías en Base al Criterio de Prestaciones Equivalentes”

y prácticamente más exacta que la teoría tradicional, puesto que surge de un notable perfeccionamiento de la misma.

PRESTACIÓN 6: VERIFICACIÓN AL ATAQUE CORROSIVO EXTERNO Y/O INTERNO

Corrosión en Tuberías de Material Cementicio

Las tuberías que contienen material de origen cementicio pueden experimentar corrosión interna y/o externa debido a los siguientes dos fenómenos:

- A) Corrosión Externa por ataque de SO₄ : Ésta aparece cuando el suelo que compone las paredes de la zanja es rico en sulfatos, ya que éstos reaccionan químicamente con el cemento dando lugar a la formación de macromoléculas que, al expandirse para ocupar más espacio producen la rotura del material.

- B) Corrosión Interna por ataque de SH₂ : Ésta puede aparecer en escurrimientos a superficie libre de líquidos cloacales. La reacción química que se produce entre el SH₂ y el cemento (en presencia de oxígeno) también produce una macromolécula que tenderá a romper el material.

Cuando se esté frente al primer caso de corrosión habrá que tomar las precauciones necesarias para evitar la rotura de las tuberías ya sea mediante la utilización de cemento ARS para la fabricación o mediante el revestimiento externo de las mismas.

Si se está frente al segundo caso, primero deberá evaluarse cuán expuesta estará la tubería ante este tipo de corrosión ya que el ataque en este caso dependerá de múltiples variables. Para realizar esta evaluación, se puede recurrir al cálculo del “Índice de Pomeroy”. Dicho índice posibilita evaluar un eventual ataque corrosivo por SH₂ y, en el caso que se produzca, cuantificar la magnitud del mismo. Además brinda elementos de juicio para seleccionar el material del caño, establecer la necesidad o no de revestirlos y prever la vida útil de la conducción. El índice se calcula de la siguiente manera:

$$I_p = \frac{3(DBO)}{\sqrt{i} \sqrt[3]{Q}} \frac{\chi}{Bs} 1,069^{(T-20^\circ)}$$

En la que:

- Ip : es el índice de Pomeroy (adimensional).
- DBO : es la "Demanda bioquímica de oxígeno" en mg/l.
- χ : es el perímetro mojado en m.
- i : es la pendiente de la conducción (adimensional).
- Q : es el caudal promedio en m³/s.
- Bs : es el ancho superficial en m.

- T : es la temperatura del agua en °C.

Las experiencias demuestran que:

- Para $l_p > 7.500$ tiene lugar el ataque corrosivo importante para los hormigones.
- Para $l_p > 23.000$ tiene lugar el ataque corrosivo para los caños de fibrocemento.

En caso de resultar atacado el material de las tuberías por este fenómeno deberá recurrirse al revestimiento interno de las mismas.

Obviamente, cualquier medida que se tome para proteger las tuberías de la corrosión interna o externa dará origen un sobre costo que se adiciona al valor de las tuberías a la hora de compararlas con otras tecnologías disponibles en el mercado.