Tuberías, Materiales, esfuerzos hidráulicos y normativa.

Cabrera Marcet, E., López Jiménez, P.A., Díaz Martínez, J.

3

- El presente documento es un fragmento del libro INGENIERÍA HIDRÁULICA APLICADA A LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA con ISBN 978-84-613-3949-5, editado por la Universitat Politècnica de València.
- La reproducción de cualquier parte de este libro sin el permiso de los propietarios del copyright es ilegal.

1. INTRODUCCIÓN

Como se ha visto en la precedente lección, las fórmulas del cálculo hidráulico "desconocen" el tipo de material que configura la tubería. Su única tarjeta de presentación es la rugosidad ε, parámetro que es variable en el tiempo. En consecuencia, y desde un punto de vista estrictamente hidráulico, el criterio de selección de un material pasaría únicamente por adoptar la tubería más lisa puesto que, a igualdad de diámetro, tenemos máxima capacidad de transporte.

Este es, evidentemente, un análisis muy simple ya que seleccionar un material es cuestión que depende de otros muchos factores. De entre ellos destacaríamos: costo, facilidad de transporte y montaje, resistencia a cargas internas y externas, protección requerida función del tipo de terreno en que va a ser enterrada y del agua a transportar, envejecimiento que puede experimentar, mantenimiento que requiere y tiempo de vida previsto. Y ello sin olvidarnos de la tradición que un determinado material puede tener en un sistema de distribución de agua, y el conocimiento que montadores y personal de mantenimiento tengan del mismo.

No es pues esta una cuestión obvia al no existir una solución óptima. Todos los materiales tienen sus ventajas e inconvenientes y, en consecuencia, el técnico que adopte una solución lo debe de hacer desde su propio escenario. De hecho, podemos adoptar decisiones diferentes en problemas similares y ser ambas soluciones correctas. El objetivo que vamos a tratar de cubrir es poner de relieve las circunstancias no hidráulicas que concurren en el uso de las tuberías debido a que revisten un mayor interés que las estrictamente hidráulicas en no pocas ocasiones.

El tiempo está siendo, asimismo, un importante arbitro en la toma de decisiones y de hecho los criterios que se vienen utilizando hoy en día son bien diferentes de los que se manejaban en los años 60. Ello es debido tanto al desarrollo tecnológico que vienen experimentando algunos materiales, con mención especial para el caso de los plásticos, como a un mejor conocimiento que, con el transcurrir del tiempo, se tiene de los mismos desde la triple perspectiva de a) comportamiento en si mismo, b) mayor o menor envejecimiento y c) posibilidades de rehabilitación.

Los plásticos proporcionan la prueba más evidente de esta evolución temporal de los usos. En efecto, el mercado norteamericano de las tuberías de plástico ha pasado de un consumo real en 1.977 del 15% a una previsión del 50% en el año 2.000 (Jeyapalan et al. (1.995)) . Sin duda que un determinado material en un mercado competitivo dicta, en el medio-largo plazo, su propio éxito o fracaso.

Esta lección trata, fundamentalmente, los aspectos que pueden ser contemplados a la hora de seleccionar un material, así como toda una serie de cuestiones complementarias relativas a su instalación y puesta en servicio. Por tanto, y dentro de este marco genérico, nos vamos a referir de manera mas o menos detallada a:

a) Los criterios generales de utilización de las tuberías, y su relación con la gama de diámetros que se pueden encontrar en el mercado.
b) Las circunstancias que condicionan el tipo de material a utilizar, así como las tendencias de futuro que se adivinan.
c) Algunos de los aspectos prácticos que concurren en su instalación.
d) El análisis de las fuerzas hidrostáticas que actúan en el interior de una conducción y la repercusión de las mismas en el espesor de la tubería.
e) El cálculo de las acciones hidráulicas que aparecen en los cambios de dirección de las conducciones, así como algunas orientaciones para el dimensionado de los anclajes que neutralizan tales acciones.
f) Pruebas que cabe exigir a una tubería antes de su recepción.
g) Algunas consideraciones de carácter práctico sobre la gestión de los proyectos de sistemas hidráulicos a presión.
h) Una breve incursión en el mundo de las Normas que ordenan la mayor parte de las cuestiones analizadas en esta lección.

Es indudable que tan abundante menú no puede ser tratado en profundidad, ni constituye el objetivo fundamental de la presente obra mas en línea con cuestiones de carácter hidráulico. Pero sin duda, ser conscientes de la importancia de un tema ya presupone ser conocedor del mismo y si, además, conseguimos sensibilizar al lector sobre la trascendencia de todas estas cuestiones, creemos que la presente lección habrá cubierto sus objetivos.

La inversión en tuberías representa la partida mas significativa de cualquier sistema de distribución de agua. Supuesta, además, una vida media entorno a 50 años, lo que equivale a una renovación anual del 2% del

tendido de la red, -criterio que se acepta con carácter generalizado en los países mas industrializados-, se comprende cuán activo está, y estará, el mercado de las tuberías a presión. Estas cifras hablan, por si solas, de la importancia del tema que nos ocupa.

En cualquier caso el lector interesado en profundizar en alguno de los aspectos aquí tratados puede consultar las referencias bibliográficas que a lo largo del capítulo se detallan. Sin duda que todo un vasto mundo se encuentra detrás de todas estas cuestiones.

2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA TUBERÍA.

La elección del material de la tubería viene condicionada tanto por el entorno en el que va a ser instalada como por sus condiciones de uso. Ambas circunstancias constituyen datos de partida para tal selección.

En este epígrafe vamos a llevar a cabo una revisión de estas cuestiones previas para en el siguiente referirnos a los materiales existentes en el mercado con sus características y sus comportamientos. Como datos de partida tenemos:

a) La misión asignada a la tubería y su importancia en el conjunto del sistema.
b) El tipo de terreno en que va a ser instalada y el agua que debe transportar, aspectos que condicionan la protección que requiere.
c) Las cargas externas que debe soportar, así como la mayor o menor facilidad de reparación ante una eventual rotura.

Hay otras cuestiones complementarias, en absoluto triviales, que también deben ser tomadas en consideración a la hora de decidirnos por un determinado tipo de material. Tales son la relación calidad/precio en su mas amplia acepción, la facilidad de montaje y reparación, los tipos de rotura que producen, al envejecimiento en el tiempo, la incidencia del material en la calidad de las aguas desde la perspectiva del consumo humano y, en fin, las posibilidades que la tubería presenta para su rehabilitación. Es esta última una cuestión llamada a adquirir un protagonismo notable en un futuro inmediato, tal y como se viene evidenciando en los países mas desarrollados. Por su interés volveremos sobre ello en la lección veintitrés.

Se revisan seguidamente las tres cuestiones a las que nos hemos referido inicialmente y que son más fácilmente objetivables.

2.1 Tipos de conducciones.

Tradicionalmente las conducciones de agua han venido agrupándose en tres grandes bloques:

- Conducción por gravedad, cuando el movimiento es generado por un desnivel geométrico. Puede ser:
  - En régimen de lámina libre.
  - En régimen de presión o conducción forzada.
  - Mixta, esto es, parte en lámina libre, parte en presión.
- Conducciones por impulsión o elevación, cuando el movimiento lo crea una bomba.
- Conducciones especiales

Nosotros vamos a centrarnos en este capítulo en los aspectos no hidráulicos de las conducciones a presión, sean de gravedad o de impulsión, si bien muchas de las consideraciones que aquí se efectuarán serían extrapolables a conducciones con el fluido circulando en régimen de lámina libre.

De hecho, y dado que el transporte y la distribución de agua para el consumo humano exige a las conducciones unas condiciones de impermeabilidad y resistencia a las acciones de todo tipo, ya sean interiores o exteriores, así como las propiedades de invulnerabilidad química o bacteriana, las conducciones utilizadas en su transporte suelen ser cerradas y por lo general a presión.

Desde un punto de vista estrictamente hidráulico cabría, además, exigirles lisura, no solo cuando la tubería es nueva, sino también cuando lleva algunos años de funcionamiento. En otras palabras, nos debe importar mucho que la conducción envejezca lo menos posible. Sobre este tema, como ya se ha dicho, volveremos en el capítulo 23.

Los diferentes tipos de respuesta de un material ante todo este tipo de exigencias debe condicionar en gran medida su posible selección, tema del que no puede estar ausente, en igualdad de condiciones, el precio final del metro lineal de la tubería.

Atendiendo al papel que desarrollan, encontramos dentro de los grandes sistemas a presión dos clases de conducciones: las tuberías de aducción y transporte y las de distribución.

Se dan detalles, a continuación, de estos conceptos.

Tuberías principales de aducción y transporte.

Las principales arterias de los sistemas de abastecimiento de agua son las tuberías de aducción y transporte. En los grandes abastecimientos los diámetros de estas tuberías de aducción acostumbran a situarse entre 500 mm y 1.200 mm, y no es infrecuente ver conducciones de traída con diámetros iguales a 2.000 mm. Como límite podemos citar el caso de la ciudad de México en donde la tubería principal tiene un diámetro igual a 6.000 mm.

Los distintos fabricantes tienen en catálogo una amplia gama de diámetros, que con el paso del tiempo se va ampliando, debido tanto a la mejora de la tecnología como a un incremento de las necesidades. Por lo general la longitud media del tubo se sitúa en torno a 6 mts, si bien en ocasiones podemos encontrarnos longitudes superiores, sobre todo en el caso del acero.

Por lo general las tuberías de transporte no son susceptibles de conexiones de servicio y las interconexiones con las tuberías de distribución se limitan al mínimo número indispensable para posibilitar la completa distribución del servicio. Las distancias de interconexión dependen de la capacidad hidráulica del sistema de distribución, si bien 300 mts. parece una distancia media y razonable.

Para su instalación se dispone de toda una serie completa de accesorios para cada tipo de tubería que nos van a posibilitar los cambios de dirección, vaciados, conexiones, purgas, etc. En no pocos materiales es posible incluso lograr suaves cambios de dirección, mediante un ángulo máximo admisible de giro, en cada una de las juntas que incluye el tendido de la tubería sin necesidad de recurrir a codo o pieza especial.

Todas las consideraciones sobre la presión de trabajo de las tuberías de aducción y transporte están ligadas a las presiones de servicio de las tuberías de los sistemas de distribución. En España raramente se encuentran redes de distribución con presiones de servicio superiores a los 50 m.c.a. si bien en otros países, cual es Estados Unidos, este límite máximo puede llegar a situarse en torno a los 70 m.c.a. Esta es la razón por la cual en la mayor parte de las tuberías de transporte y aducción la presión nominal de trabajo se sitúe por debajo de los 100 m.c.a. Ello no obstante, en ocasiones encontramos aducciones en donde se llegan a alcanzar hasta los 175 m.c.a., correspondiéndose esta presión con los valores límites para los que se fabrican la mayor parte de elementos complementarios como válvulas y accesorios. Se encuentran valores por encima de esta presión de referencia, aunque no son usuales.

Determinados tipos de materiales posibilitan que la tubería tenga su máxima competitividad en la gama de las presiones altas, en tanto que otros encuentran una mejor penetración en el mercado en la gama de bajas presiones.

Las tuberías de hormigón armado tienden por lo general a ser menos competitivas en la zona de altas presiones. Por otra parte las grandes tuberías de acero o fundición requieren un espesor mínimo para evitar su colapso por posibles depresiones o incluso por el propio proceso de fabricación, lo que se traduce en una superior utilización en la gama de altas presiones.

En casos especiales, como los transportes de agua a presión a grandes distancias y con importantes caudales (D > 1.000 mm y L > 50 Km), las presiones requeridas para trasegar el fluido desde la fuente hasta el punto de consumo, con un costo razonable, son muy importantes. Estos tipos de instalaciones, así como la solución que finalmente se adopte, dependen en gran medida de la viabilidad de los equipos de bombeo requeridos, así como de la existencia en el mercado de la gama de tuberías y valvulería requerida por la instalación. Sin ninguna duda que una fabricación "por encargo" resulta siempre mas cara. Al-Shaikh et al. (1.995) dan cuenta de un transporte de agua de estas características consistente en conducir el agua a través del desierto desde plantas desalinizadoras en la costa hasta centros de consumo urbanos.

Se comprende que en el caso de aducciones debamos pedir a la conducción la máxima fiabilidad y la mayor duración, en tiempo, posible. En otras palabras a estas conducciones se les debe exigir las máximas garantías.

Tuberías de distribución.

Por tuberías de distribución entendemos aquellas que llevan a cabo el suministro propiamente dicho a los usuarios del servicio. Constituyen el elemento esencial y mas costoso de todas las partidas incluidas en un abastecimiento y por lo tanto su tamaño y características deben seleccionarse sobre la base de las condiciones de servicio conjuntamente con criterios económicos rigurosos. La fiabilidad, siendo sin duda importante, no resulta ahora vital.

La red de distribución debe satisfacer tanto la demanda actual, doméstica e industrial, como la prevista en el horizonte, en las condiciones de presión de servicio previamente establecidas. También debe contemplar el caudal adicional requerido para actuar con eficacia ante eventuales demandas de caudal contra incendios. Las tuberías deben dimensionarse con el diámetro más económico que satisfaga estos requerimientos. Ello, en definitiva, equivale a adoptar una solución que cumpla con las exigencias de servicio fijadas en las condiciones de suministro y comportando un gasto mínimo, determinado a partir de la suma de los costos de inversión, implantación, explotación y mantenimiento.

El rango de diámetros de las tuberías de distribución es amplísimo, comenzando en 50 mm y pudiendo alcanzar los (400 - 500) mm en abastecimientos de gran entidad. Las velocidades de agua recomendables se sitúan en el intervalo (1 - 1,5) m/seg. En cualquier caso, el diámetro mínimo aconsejable en un sistema de distribución de una área residencial que cuente con hidrantes contra incendios, es de 150 mm.

La red de distribución propiamente dicha acostumbra a subdividirse en dos niveles, dando lugar a lo que conocemos como tuberías secundarias y terciarias. En estas últimas conducciones las válvulas de seccionamiento no deben separarse más allá de los 200 mts.

Generalmente la red de distribución es mallada, buscándose en todo momento una máxima flexibilidad en el trazado con objeto de poder llevar a cabo el suministro a un mismo punto siguiendo trayectos alternativos, posibilidad esta de un máximo interés en caso de avería o rotura de la conducción. También ello evita largos tiempos de residencia del agua en la red. Asimismo una flexibilidad apoyada en un número suficiente de válvulas, resulta fundamental cuando se aborda la rehabilitación de una determinada zona de la red de distribución.

Desde el punto de vista de optimizar los diámetros de las distintas conducciones a la hora de intentar, en la medida de lo posible, forzar una distribución de caudales en una red de distribución, la estrategia más adecuada es la de una fuente única con derivaciones de tipo radial al objeto de que los caudales circulantes vayan disminuyendo rápida y progresivamente, evitando circunvalaciones del flujo. Debemos ser conscientes que cuando reducimos el caudal a la mitad, las pérdidas de carga, a igualdad de diámetros, se dividen por cuatro. El inconveniente de esta estrategia es la existencia de tuberías terminales que, con total independencia del tipo de material utilizado, requerirán de purgas y limpiezas periódicas.

Los niveles de presión deben ser los adecuados, ya que con ellos aumenta la calidad del servicio pero también la entidad de las fugas. Refiriéndonos al caso concreto de un abastecimiento, se estima que la solución de compromiso se encuentra en el intervalo 35 - 40 m.c.a. De hecho los países que tienen establecidos estándares de calidad se mueven en este rango.

2.2 Protección contra entornos agresivos.

Cuando se trata de seleccionar el material de una tubería, resulta imprescindible proteger la conducción tanto del agua que se transporta como de posibles efectos indeseables debidos a entornos agresivos .

De acuerdo con el CEN, Comité Europeo de la Estandarización (1992), las medidas de protección que pueden utilizarse son:

- Revestimientos exteriores para las tuberías de materiales férricos, adecuados a los niveles de corrosión del terreno.
- Protección catódica.
- Diferentes tipos de protecciones, como por ejemplo el uso de geotextiles.
- Tuberías de protección envolventes, e incluso protección metálica para tuberías de plástico en suelos

contaminados.
- Revestimientos, o adecuadas mezclas de hormigón, para tuberías de hormigón en suelos agresivos.

La contaminación del terreno debida a sustancias orgánicas como hidrocarbonos y cloruros pueden tener efectos adversos sobre:

- La calidad del agua potable, como consecuencia de la penetración de sustancias orgánicas a través de tuberías.
- Las propiedades de las tuberías de plástico.
- La permeabilidad y duración de las juntas de elastómeros.
- La resistencia a la corrosión de los componentes metálicos de tuberías y/o juntas.

Cuando el análisis de las tuberías en servicio indique un nivel de agresividad alto por parte del terreno que las rodea, deben tomarse en consideración, por parte del proyectista, las siguientes medidas preventivas:

- Cambiar las tuberías de plástico por otros materiales menos vulnerables.
- Proteger las tuberías de plástico, o de cualquier otro material, mediante los correspondientes conductores protectores.
- Adoptar métodos de protección adecuados contra la corrosión en tuberías metálicas.
- Estudiar métodos alternativos.

La agresividad de terrenos se establece a partir de diferentes criterios. Uno de los mas utilizados es el de Steinrath, que puede encontrarse en las Normas para el abastecimiento de agua del Canal de Isabel II (1.992). A modo de resumen, los aspectos que contempla esta clasificación son:

- Tipo de suelo (calcáreo, margo, arenisco)
- Estado del suelo (homogéneo, no homogéneo, etc)
- Resistencia específica.
- Porcentaje de humedad.
- Acidez (pH).
- Potencial Redox
- Contenido en carbonato cálcico y magnésico.
- Contenido en azufre.
- Contenido en cloruros.
- Contenido en sulfatos

Basalo (1992) analiza la interacción suelo-tuberías metálicas y de cemento, así como los mecanismos de protección con especial énfasis en la protección catódica.

Por lo que respecta a la interacción agua-tuberías el problema se puede presentar en una triple vertiente: la corrosión de tuberías que no están adecuadamente revestidas, el envejecimiento por incrustaciones y sedimentos que aumentan a largo plazo la rugosidad, cuando no disminuyen el diámetro y, finalmente, por los problemas de calidad del agua desde una perspectiva estrictamente sanitaria. El análisis de estas cuestiones desborda al alcance de este Curso y, además, caen de lleno en el campo de la Ingeniería Química. Algunos detalles relativos a estas cuestiones pueden verse en Legrand y Leroy (1990).

2.3 Esfuerzos sobre tuberías

	HORMIGÓN CAMISA	HORMIGÓN PRETENS.	AMIANTO CEMENTO	PVC	POLIETIL.	ACERO	FUNDIC. DÚCTIL
FRAGILIDAD	SI AL TRANSPOR.	SI A LAS RANURAS	POSIBLE ROTURA POR FLEXIÓN	SI A LOS CHOQUES	NO	NO	NO
RESISTENCIA A LA PRESIÓN	<15 bar	< 15 bar	< 15 bar	< 15 bar	< 10 bar	< 100 bar	< 27 bar
PROTECCIÓN CATÓDICA	BUENA, SALVO CORRIENTE VAGABUN.	BUENA, SALVO C0RRIENTES VAGABUN.	BUENA.	BUENA.	BUENA.	NECESITA PROTEC. ESPECIAL.	BUENA, SALVO TERR. AGRE-
FACILIDAD DE REPARACIÓN MODIFICAC.	DIFÍCIL	MUY DIFÍCIL	FÁCIL	FÁCIL	FÁCIL	BASTANTE FÁCIL	FÁCIL
NORMALIZ. DE PIEZAS ESPECIALES	BAJO PEDIDO	BAJO PEDIDO	DEPENDE DE LA GAMA DE PRESIONES	SI, EN PVC O EN FUNDICIÓN	SI, LIMITADA A PEQUEÑAS PRESIONES	SI	SI
TIPOS DE JUNTAS	MANGUITO ANILLO O SOLD.	JUNTA DE CAUCHO	SUPERSIMPLO GIBAULT O RK	MANGUITO DE CAUCHO	RACOR ENROSCAD.O SOLDADO	SOLDADURA AL ARCO	CAUCHO
PESO (facilidad de transporte)	ELEVADO	ELEVADO	DISCRETO	ESCASO	ESCASO A MEDIO	ELEVADO A MEDIO	MEDIO
LONGITUDES CORRIENTES	3 A 5 METROS	3 A 5 METROS	5 METROS	5 A 6 METROS	CARRETES DE HASTA	6 METROS	6 METROS
RUGOSIDAD	BUENA	BUENA	BUENA	MUY BUENA	MUY BUENA	BASTANTE BUENA	BUENA, (REVEST. DE MORT.)
LOCALIZAC. ELECTROMAG.	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI
COMENTARIOS	Sólo para grandes diámetros	Aducciones y grandes diámetros.	φ ext. variable según la clase de presión.	Las piezas especiales de fundición precisan un hilo de	Para acometidas principalm.	Necesita envoltura exterior e interior.	Reune las ventajas del acero y fundic.

Buena parte de las tuberías a presión se instalan enterradas, por lo que deben soportar tanto el peso de las tierras como el de cargas puntuales debidas al tráfico. Las primeras se denominan permanentes o muertas y las segundas dinámicas, o vivas. Logicamente las tuberías deben ser capaces de asumir estos esfuerzos y, en consecuencia, deben realizarse los cálculos mecánicos oportunos que confirmen no se va a producir el aplastamiento de las mismas.

Estos cálculos mecánicos dependen, básicamente, de tres factores: el tipo de zanja en que se instalan las conducciones (zanja abierta o cerrada, terraplen, etc), el tipo de relleno que se utiliza y, finalmente, las características resistentes del material. Dato fundamental de partida es la carga total que debe soportar la tubería.

Desde que Marston comenzó a desarrollar en 1913 estos estudios en la Universidad de Iowa, esta teoría ha sido la referencia básica de la que han partido todos los posteriores desarrollos. El trabajo de Marston, mezcla de desarrollos teóricos y experimentales, se resume en Marston (1930). Sin embargo no es este un tema cerrado, toda vez que constantemente aparecen nuevas aportaciones (Stein(1995), Kawabata y Mohri (1995), Gerbault (1995), etc.

Desde el punto de vista de la aplicación inmediata la mayor parte de las Normas existentes, a las que nos referiremos en el correspondiente epígrafe, abordan el cálculo mecánico de tuberías. Algunas se refieren a un material concreto, otras tienen un carácter más general. Es el propio fabricante de la tubería quien puede dar una información detallada al respecto a cualquier usuario, suministrando en algunos casos incluso un paquete informático adaptado al material comercializado (Uralita (1993)) que permite llevar a cabo los cálculos con gran comodidad y ajustados a la Norma UNE 88.211, correspondiente al amianto-cemento.

El entrar en los detalles del cálculo mecánico de cargas exteriores queda fuera del alcance de esta obra, mas centrada en cuestiones hidráulicas. Sin embargo es un tema ampliamente documentado, cual corresponde a su importancia. Entre las referencias castellanas a consultar destacaríamos la obra de Mayol (1981, 1983, 1993) y entre las sajonas los manuales de la American Water Works Association referidas a los diferentes materiales tal cual la AWWA M9(1995), relativa al hormigón, la AWWA M11(1989), correspondiente al acero, o la AWWA M23(1.990) relativa al PVC. Pero, y en ello hay que insistir, son muy abundantes.

Hablando de cargas externas es muy importante señalar que, en función de la clase de material, la puesta en obra de la tubería puede presentar una mayor o menor relevancia, aún siendo siempre una cuestión importante para garantizar una larga vida de la conducción y un bajo número de averías,. Y así por ejemplo, un material con un módulo elástico E elevado -fundición-, soporta mucho mejor la flexión longitudinal del tubo que un material mas frágil -amianto cemento-, tal cual pone de manifiesto la Tabla 3.1. Ello no constituye ningún inconveniente para este segundo material si se procura el que la tubería descanse perfectamente, y de manera continua, sobre la generatriz longitudinal inferior. Sin embargo, en el supuesto de que ello no se cuide adecuadamente, la fundición presentará muchos menos problemas en el medio-largo plazo. Pero, por contra, a igualdad de diámetro es apreciablemente más cara.

Es importante insistir, para concluir, que la selección de un material es un proceso dinámico, y una solución tomada hace algunos años puede resultar menos adecuada en el momento presente. Las tecnologías de fabricación y sus costos asociados, sobre todo en lo relativo a los plásticos, están jugando un papel definitivo.

Tras esta panorámica general introductoria vamos a efectuar una somera presentación de los materiales que con mayor frecuencia se utilizan. Todos tienen una amplia presencia en cualquier mercado medianamente competitivo.

3. PRINCIPALES MATERIALES UTILIZADOS EN TUBERÍAS A PRESIÓN.

Son muchos, como ya se está viendo, los criterios que condicionan la selección del material de una tubería, por lo que antes de entrar en el detalle de las características de cada material parece oportuno aportar una panorámica general (Tabla 3.1) referida a los materiales que se consideran en este capítulo y que son los que habitualmente se usan en este país. Dicha tabla ha sido extraída de Valiron (1986), y ha sido incluida en idénticos términos a los que allí figuran por parecernos objetiva y completa.

A partir de dicha tabla se constata lo anticipado: que no existe una solución óptima, y que en función de los criterios que se prioricen, los resultados pueden ser completamente diferentes. Por ejemplo, Auli(1990) efectúa una comparación para una presión dada (7.5 bares) de los costes de los diferentes materiales en función del diámetro, lo que sin duda constituye uno de los criterios básicos de selección del material, pero no el único. En Stift y Ruchti (1990), se presenta un estudio comparativo entre la tubería de hormigón pretensado, tradicionalmente utilizada por una distribuidora de agua del área de California frente a la tubería de acero, analizando pros y contras de cada material. La conclusión final del artículo fue la conveniencia de incluir ambos materiales en el Pliego de Condiciones que se redactó para la adjudicación de una importante obra, por cuanto con ello se aumentaba la competitividad en el suministro, ya que el acero garantizaba una "calidad global" similar a la del material tradicionalmente utilizado hasta ese momento, el hormigón.

Reiterando, nuevamente, que no existe un material absolutamente superior a los demás, pasamos a describir las particularidades de cada uno de ellos.

3.1 Tuberías de plástico (PVC) y (PE).

Básicamente se utilizan dos clases: el Polietileno (PE) y el Policloruro de Vinilo (PVC), siendo este segundo material mas apto para trabajar en la gama de presiones altas. Las propiedades genéricas que vamos a enumerar se refieren a ambas clases de materiales y, en cualquier caso, han sido recogidas de manera resumida en la Tabla 3.1.

Como ventajas citaremos el hecho de presentar la máxima capacidad hidráulica al poderse catalogar como tuberías hidrodinámicamente lisas. Desde el punto de vista de la resistencia a terrenos agresivos son las que mejores prestaciones poseen. Finalmente, y en base a su bajo peso, son muy manejables y fáciles de montar.

Las limitaciones también están bastante bien definidas: su deformabilidad ante cargas externas les hace perder su geometría cilíndrica y ello las hace vulnerables a las depresiones. De otra parte sus coeficientes de resistencia a la tracción que proporcionan las hacen poco útiles cuando nos situamos en la gama de presiones elevadas, sobre todo a partir de un determinado diámetro.

El hecho de que las tuberías de plástico sean relativamente nuevas y que sus características se vean sensiblemente modificadas tanto a causa de la temperatura como por el paso del tiempo, ver p.e. Mayol(1981), aconsejan el uso de un elevado factor de seguridad. En Jeyapalan(1990) se aportan referencias a cerca de la importante evolución experimentada por este material a partir de 1980.

Sin duda que estos materiales tienen un prometedor futuro sobre todo en la relativo al Polietileno y sus múltiple variedades. Tal cual se ha comentado, su penetración en el mercado USA es cada vez mayor (Jeyapalan et al. (1.995)), aunque en otros países como Alemania (Hirner(1.996)), su uso parece se mantiene mas estable.

En el manual M 23 de AWWA, PVC pipe. Design and Installation (1.980), se detallan aspectos prácticos relativos a la fabricación, montaje y diferentes singularidades de este material. Su consulta resulta de gran interés para todos los usuarios reales y potenciales. En el apartado 8º de la presente lección, se aportan las Normas UNE relativas a estos materiales, que debido a sus singularidades y rápida expansión han merecido, por parte de los Comités de Normalización, una atención singular.

3.2 Tubería de fundición dúctil.

Es el material que ha heredado la tradición de las tuberías de fundición gris, ampliamente utilizadas hasta hace alguna década y que cayeron en desuso por su elevada fragilidad y su vulnerabilidad a la corrosión, sobre todo en terrenos agresivos. La actual fundición dúctil ha venido a resolver, en buena medida, tales inconvenientes.

Contiene aproximadamente un 3,5% de carbón en forma esferoidal o de nódulos lo que le otorga el nombre de dúctil. Estos nódulos son los responsables de un material mas elástico (menos frágil), y en consecuencia queda obviado el primer inconveniente de la fundición gris. El segundo inconveniente, su vulnerabilidad a la corrosión, sigue presente debido al elevado contenido de carbón que continua teniendo. Sin embargo los revestimientos que se llevan a cabo con las tecnologías actuales son muy eficaces y este problema queda plenamente resuelto salvo en casos muy especiales y concretos.

El revestimiento interior de la fundición se lleva a cabo con mortero de cemento y el exterior con pintura bituminosa. Algunos fabricantes, recientemente, están recurriendo a un recubrimiento interior alternativo de carácter plástico, lo que le confiere a la conducción una protección similar, o incluso superior a la del mortero, al tiempo que aumenta su lisura. La actual tecnología permite una total integración de estos recubrimientos interiores con la fundición dúctil propiamente dicha, lo que se puede constatar plenamente en caso de una fractura.

Tiene mas resistencia y ductilidad que el acero por lo que, ante cargas externas de terreno y tráfico, su comportamiento se asemeja al de una tubería totalmente flexible. Ello se traduce en una gran resistencia estructural, haciéndola menos sensible que otros materiales a una deficiente puesta en obra de la tubería.

Las ventajas de la fundición dúctil son su elevada resistencia y baja fragilidad, así como su fácil mecanización. Asimismo, y como consecuencia de su elevado módulo elástico de Young, E, presenta para un determinado espesor una resistencia a la presión interior muy elevada que la hace especialmente competitiva cuando se trata de instalaciones cuyas presiones máximas son importantes. Su punto débil es la vulnerabilidad a la

corrosión, aspecto este felizmente superado con los recubrimientos actuales, salvo cuando se instala en terrenos muy abrasivos. En estos casos debe recabarse la experiencia del fabricante, primer interesado en no proporcionar a los clientes experiencias desagradables.

Aún teniendo un precio superior al de otros materiales, la fundición dúctil viene ganando cota de mercado en los últimos años, tanto por ser la heredera natural de la fundición gris de gran tradición en muchos países, -Alemania, (Hirner (1.996)-, como por sus excelentes prestaciones. En España, en los últimos años, ha tenido una importante penetración en el mercado, fundamentalmente en el campo de los abastecimientos de agua. Su implantación actual es notable, con clara tendencia al alza.

3.3 Tubería de presión de hormigón armado y pretensado.

Esta tubería, a efectos de su comportamiento mecánico ante solicitaciones de cargas externas, se comporta como una conducción rígida o semirrígida.

Se fabrica para una amplia gama de diámetros que partiendo de 200 mm alcanza los 5.000 mm, e incluso valores superiores, si bien el intervalo de mayor utilización se sitúa entre los 600 mm y los 2.000 mm.

Una de las ventajas de la tubería de hormigón es que puede fabricarse para un amplío rango de condiciones de servicio, incluyendo grandes cargas externas e internas e incluso para una combinación de ambas. También presenta una excelente resistencia a las presiones negativas, por lo que difícilmente puede colapsarse, siendo ante este tipo de solicitaciones el material que mejor se comporta.

Otra ventaja significativa la constituye el hecho de que el revestimiento de protección es intrínseco al propio material de la tubería. La posibilidad de una pérdida de revestimiento por excoriación es, en este caso, muy pequeña.

La principal desventaja de la tubería de hormigón es su elevado peso en los grandes diámetros, lo que conlleva altos costos de transporte. También su manipulación in situ y la dificultad que presenta el cortar los tubos para adaptarlos a las condiciones que cada montaje requiere, constituye una notable limitación, sobre todo cuando se trata de reparar una avería.

En España su uso es casi privativo de las grandes obras de transporte y de los abastecimientos que tienen ya una cierta entidad. No abunda información específica de este material. La referencia mas recurrida es la Instrucción del Instituto Torroja (1.980). Un manual de uso mucho mas práctico, desde la perspectiva del usuario de la tubería, y que recomendamos decididamente, es el M9 de la AWWA, Concrete Pressure Pipe (1.995), recientemente actualizado. También los fabricantes pueden aportar información específica, habida cuenta las variantes que acostumbra a presentar este tipo de material, función de los diferentes tipos de armadura metálica que se utilizan. La armadura resulta imprescindible para absorber los esfuerzos de tracción generados por la presión interior del agua.

3.4 Tubería de acero.

Este tipo de tubería se fabrica en un amplio rango de diámetros, desde 400 mm hasta 3600 mm, e incluso superiores. Su máxima utilización, en los países en que tiene una amplia tradición (Estados Unidos) corresponde al rango de diámetros 400mm ÷ 1500 mm.

Ha sido práctica común en el pasado dotar de un espesor mínimo de 6 mm las paredes de la tubería para diámetros superiores a los 600 mm, lo que resulta conveniente tanto para prevenir posibles colapsos de la tubería por depresión, como por constituir un factor de seguridad adicional ante una hipotética corrosión. En cualquier caso, los revestimientos que se aplican a los diferentes materiales metálicos, ya descritos con ocasión de las tuberías de fundición, así como la utilización de la protección catódica, ha posibilitado el disminuir estos espesores de pared sin pérdida de eficacia, cuando las condiciones de servicio no han requerido timbrajes superiores.

Las ventajas de la tubería de acero son un coste de implantación relativamente discreto, baja fragilidad y un amplio rango de tipos de juntas y diámetros disponibles. Asimismo es muy resistente a condiciones extremas de operación, pudiendo llegar a soportar presiones internas de hasta 400 m.c.a.

Su principal desventaja, como se ha dicho, radica en el riesgo de corrosión externa, por lo que se aconseja un recubrimiento con tratamientos bituminosos especiales. Abundante información al respecto se encuentra en

Association General des Hygienistes et Techniques Municipaux (1.987).

Su uso en España, y por lo que a abastecimientos y riegos se refiere, es realmente esporádico. Encontramos su máxima utilización en las tuberías forzadas de los aprovechamientos hidroeléctricos. Tal vez ello se haya debido a que, hasta ahora, ningún fabricante ha apostado con fuerza por este material. En USA su uso en abastecimientos no es infrecuente (Stift y Ruchti(1990)), y de acuerdo con Jeyapalan et al.(1.995), viene desplazando con fuerza al hormigón en aquel mercado.

Detalles complementarios del uso de este material pueden encontrarse en el manual M11 de AWWA, Steel pipe. A guide for Design and Installation(1.989).

3.5 Tuberías de amianto cemento.

Este tipo de conducción se comercializa en el intervalo 50 mm a 900 mm, presentando su máxima aplicabilidad entre los 100 mm y los 500mm e incluso 600 mm.

Como ventajas significativas de este material pueden destacarse su fácil manipulación y mecanización en obra, así como sus buenas características ante terrenos agresivos salvo los que sean muy ácidos o contengan sulfatos. También su elevada capacidad hidráulica y bajo costo inicial lo hacen sumamente atractivo.

Como inconveniente debemos señalar su fragilidad a solicitaciones derivadas de grandes cargas de impacto. En particular, y sobre todo para pequeños diámetros, debe procurarse una zanja de asiento uniforme con el fin de evitar, en la medida de lo posible, roturas por flexión ante cargas puntuales. No hay que olvidar que los materiales frágiles son los mas sensibles a una deficiente puesta en obra.

En España la tubería de amianto cemento ha gozado de un gran predicamento hasta hace una década. Sin ninguna duda era la mas utilizada debido, fundamentalmente, a su excelente relación calidad/precio y a una tupida y activa red de comercialización. Sin embargo la polémica suscitada por su posible carácter cancerígeno, así como algunas deficientes puestas en obra, que han generado no pocos problemas, las han hecho entrar en franca recesión. Conviene decir que algunos países (USA, Alemania, Holanda, etc.), han prohibido su uso en abastecimientos de agua. Sin embargo ha quedado bien claro que su potencial cancerígeno es consecuencia, únicamente, de su posible inhalación, y ello afecta únicamente al proceso de fabricación, montaje y reparación, siendo además subsanable con las adecuadas precauciones (mascarilla respiratoria). En ningún caso se cuestiona el uso del material para el transporte de agua.

Su gran tradición, así como el conocimiento y comprensión de sus deficiencias, pueden jugar a favor de un material cuyas prestaciones son notables cuando se compara su precio con el de los otros materiales competidores.

3.6 Cuestiones complementarias

A la hora de decidirnos por un determinado material, además de tomar en consideración sus características así como su relación precio calidad, hay que considerar otros factores.

En primer lugar la especialización del personal encargado de su montaje y mantenimiento. Es indudable que con un personal de montaje cualificado un material menos noble puede proporciona resultados tan satisfactorios como los de otro de mejores prestaciones. Un montaje menos cuidado siempre demanda el mejor material, si se quieren evitar problemas futuros.

El mantenimiento de toda red de distribución requiere disponer de un stock suficiente. En consecuencia cuantos menos materiales se utilicen menos almacenamiento se requerirá y, por consiguiente, si un material se comporta correctamente y su precio en el mercado continua siendo competitivo, no parece lógico sustituirlo por otro material que esté mas de moda.

La mayor o menor sencillez con que puede llevarse a cabo una reparación con un determinado material, y el tiempo que se invierte en la misma, es también un parámetro a considerar. La facilidad con que se corta un tubo, el personal y medios que requiere su manipulación, -no se dispone de los mismos útiles de trabajo en un montaje, por lo general responsabilidad de una potente empresa, que en una reparación rutinaria llevada a cabo por el propio personal de mantenimiento-, el tipo de junta con que cuenta, el tiempo de respuesta del proveedor en caso de requerirse una determinada pieza, etc., son detalles a los que el día a día les da su debida importancia.

Finalmente el tipo de rotura que acostumbra a presentar un determinado material puede tener notable importancia. De hecho la detección de una fuga será mas o menos sencilla en función de la clase de rotura, toda vez que para su localización acústica es muy importante el tipo de escape del agua a presión.

Concretando algo mas esta cuestión podemos clasificar las fugas y/o roturas en seis grandes grupos:

a) Fisura, consistente en una raja longitudinal a lo largo de una generatriz del tubo.
b) Astilla, que es una rotura en raja menos larga pero mas ancha que la correspondiente a la fisura.
c) Picadura, cuando la tubería aparece perforada por pequeños poros.
d) Orificio, equivalente a una picadura con poros de mayor tamaño.
e) Juntas, cuando la tubería pierde agua por las uniones de los tubos.
f) Rotura neta o tronchado, correspondiente a una sección limpia y transversal del eje de la tubería.

Se comprende que cuando mas clara sea la rotura mejor detección tiene y, consecuentemente, podrá ser objeto de una reparación mas rápida. De hecho, una fisura en la generatriz inferior de un tubo, debida a un mal asentamiento de una tubería frágil puesta en obra incorrectamente, presenta una detección compleja, al generarse el ruido del escape del agua en el asentamiento del tubo, que es la parte mas distante de la superficie donde opera el correlador que, generalmente, se utiliza para localizar la avería.

Es de gran interés disponer de una base de datos de las roturas y/o fugas que presentan las tuberías, así como el detalle del tipo de fuga producido, para poder tener elementos de juicio de primera mano acerca del comportamiento de cada material.

Sin ánimo de ser exhaustivo si queremos efectuar una primera aproximación a las incidencias que acostumbran a presentarse en cada uno de los diferentes materiales.

a) Plásticos

Las averías que suele presentar tienen forma de fisura o raja longitudinal, y aparecen por lo general cuando la tubería ya tiene unos años. Posiblemente es debido al tipo de estructura molecular que se rigidita longitudinalmente. Las actuales estructuras reticulares parece no presentan este tipo de roturas.

b) Fundición dúctil

En forma de astilla, cuando la rotura es debida a una sobrepresión generada, por ejemplo, por una bolsa de aire. También el tubo se astilla como consecuencia de un progresivo deterioro del mismo, debido al óxido. Dichas astillas acostumbran a tener una importante longitud que obliga a cambiar la totalidad del tubo.

La conducción puede llegar a tener una fractura limpia, en forma de tronchado, cuando como consecuencia de un asentamiento del terreno o debido a una sobrecarga puntual se ve sometida a un importante esfuerzo cortante.

c) Hormigón armado

El que mejor se comporta a los efectos de averías es el hormigón armado con camisa de chapa, que en muy raras ocasiones presenta fugas, salvo cuando las provoca un accidente. Cabe la posibilidad de que un poro en la chapa ocasione, con el paso del tiempo, la oxidación de la misma hasta que el propio oxido de lugar a un aumento de volumen que a la larga provoca una rotura del hormigón y, consecuentemente, la aparición de la fuga.

El hormigón con armadura metálica convencional rompe en forma de astilla, como consecuencia de una sobrepresión, o con un tronchado si un asentamiento del terreno da lugar a un esfuerzo cortante puro, tal cual ocurría con la fundición.

Las tuberías de hormigón, de excelentes prestaciones mecánicas, tienen como talón de Aquiles las juntas tanto las elásticas como las soldadas.

d) Acero

Las principales roturas del hierro acostumbran a ser por aplastamiento, debidas a depresiones o a sobrecargas externas, ya que esta tubería presenta escasa rigidez ante esfuerzos cortantes o aplastamientos. Ello es debido

a que con un escaso espesor, la nobleza de este material posibilita soportar importantes cargas internas. Si se recurre a espesores superiores para obviar estas limitaciones, el material deja de ser competitivo.

Como consecuencia de algún defecto de fabricación pueden generarse picaduras o incluso poros de mayor entidad que a la larga pueden derivar en fugas importantes. En cualquier caso, estos defectos tienen fácil detección si se utilizan métodos acústicos.

e) Fibrocemento

Suelen astillarse cuando se les somete a una presión superior a la que pueden soportar y también son susceptibles de experimentar un tronchado ante esfuerzos cortantes derivados de asentamientos del terreno o de cargas puntuales externas bien localizadas. Su punto flaco tradicional eran las uniones metálicas, tipo Gibault, ya que el hierro no protegido acababa oxidándose y ello, con el tiempo, se convertía en una fuga. Este problema ha sido satisfactoriamente resuelto, hace ya algunos años, al utilizar, para materializar las juntas, el amianto cemento conjuntamente con aros elásticos . De hecho, en general la mejor junta es la realizada con el material de la propia tubería y el complemento de aros de estanqueidad de caucho, tal cual las actuales RK, propias del amianto-cemento.

3.7 Conclusión

En el año 1.975, el Comité "on pipeline planning" de la American Society of Civil Engineering (ASCE), editó la publicación Pipeline design for water and wastewater. En ella se describen las principales características de los diferentes materiales que aquí hemos considerado, salvo los plásticos, de muy escasa utilización en aquel entonces. El paso del tiempo no ha afectado las características fundamentales de los referidos materiales, pero sí ha traído, debido a la tecnología aparecida, un cambio en su competitividad y prestaciones. Y la mayor evidencia de ello es en una modificación sustantiva de sus cotas de mercado.

El mundo de las tuberías, sus materiales y las circunstancias que rodean su uso es de una gran complejidad, sobre todo en circunstancias no convencionales. La decisión final es sencilla cuando se ha venido utilizando un material, se le conoce bien y sus resultados han sido satisfactorios. Cuando, sin experiencia previa en un determinado uso se cambia de tipo de tubería, deben tomarse todo tipo de precauciones ya que las sorpresas que a largo plazo pueden presentarse son, en ocasiones, muy desagradables.

La información, con detalles complementarios sobre el uso y las características de los distintos materiales, que existe en la literatura es abundante. En España, entre las más relevantes, citaremos las Recomendaciones para la instalación, adjudicación y reparación de canalizaciones de Agua Potable de AEAS (1992), las Normas para el abastecimiento de agua del Canal de Isabel II (1.992) y sobre todas la obra de Mayol (1981, 1.983 y 1.993).

Por lo que se refiere al mundo tecnológico más representativo, el sajón, las iniciativas promovidas por ASCE y AWWA reúnen el triple requisito de calidad, objetividad y actualidad, por lo que su seguimiento es altamente recomendable para quienes estén interesados en el tema. De entre las primeras destacamos las conferencias sobre "Advances in underground pipeline engineering" (Jeyapalan(1985), Kienow (1.990) y Jeyapalan y Jeyapalan (1.995)), en las que se discuten los temas de protección, análisis de cargas, comportamiento de materiales, etc. Por lo que a la AWWA se refiere son de especial interés las publicaciones sobre el uso, instalación y explotación de los diferentes materiales (por ejemplo las AWWA M9, M11, y M23 a las que ya nos hemos referido, o los manuales específicos sobre protección de tuberías, AWWA (1.991)) .

Ya en Inglaterra, podemos citar la serie de conferencias de la British Hydrodinamic Research Association (BHRA) sobre "Internal and external protection of pipes" (p.e. Galka (1985)), si bien el nivel de actividad de BHRA es muy inferior al de ASCE o AWWA.

Debido a que las tuberías se proyectan para que duren muchos años -su tiempo de amortización no debe ser, en ningún caso, inferior a los 40 años, trabajandose casi siempre con el horizonte de los 50 años-, la selección de su material es cuestión de vital importancia. Por ello debemos saludar con interés nuevas técnicas que han aparecido con fuerza en estos últimos años y que posibilitan un mejor conocimiento del comportamiento de una tubería y, consecuentemente, una mejor explotación del sistema en el medio-largo plazo.

Podemos clasificarlas en tres bloques: a) Bases de datos y su explotación, b) Análisis de la fiabilidad y c) Rehabilitación. Procedemos a una somera introducción de las mismas, dejando para los capítulos 22 y 23 una descripción mas completa de las mismas.

a) *Bases de datos*. Para un abastecimiento es de un gran interés disponer del historial de los fallos de su sistema de tuberías de distribución en el tiempo. Detalles acerca de este tipo de bases de datos pueden encontrarse en Goodrich et al.(1989). De otra parte una aplicación concreta para conocer cuando conviene iniciar una campaña de detección de fugas, una reparación o una reposición, se detalla en Cabrera et al(1995).

b) *Fiabilidad*. Concepto intrínsecamente ligado a la calidad del servicio, puede depender, en gran medida, del tipo de material de la tubería. Goulter(1995) presenta un excelente resumen de estos conceptos aunque mas detalles pueden encontrarse en Mays(1989).

c) *Rehabilitación*. De acuerdo con Alegre (1995), rehabilitación es aquel conjunto de actividades requeridas para transformar un sistema de suministro de agua defectuoso o inadecuado en uno que facilita la calidad de servicio para sus consumidores al tiempo que se vigila y controla la relación coste/efectividad de estas actuaciones. Por tanto la rehabilitación va desde la pura sustitución hasta el nuevo revestimiento de una vieja tubería de acuerdo con técnicas que han tenido su origen en la industria del gas (Maine(1993)).

El auge que este tema está cobrando es consecuencia de la antigüedad de nuestros sistemas de distribución que comienzan a exigir una renovación progresiva. En Hirner (1.996) y Allen (1.996), se presenta el estado del arte de la cuestión en dos países buenos referentes en el tema: Alemania e Inglaterrra. La preocupación e interés de los Estados Unidos por esta cuestión queda perfectamente reflejada, por ejemplo, en los Proceedings del reciente Symposium de AWWA (1.993), Distribution System Symposium de San Diego. La inmensa mayoría de las contribuciones que allí se presentaron, caen de pleno en el tema de la rehabilitación.

Generalmente, en países que mantienen sus infraestructuras, se acepta como valor de referencia la cifra de un 2% de renovación de red cada año. Ello equivale a admitir un período de amortización de 50 años, y puede representar anualmente una longitud de tubería realmente importante para cada país.

Sin ninguna duda que el desarrollo de todas estas nuevas técnicas va a ir aportando, en un inmediato futuro, importantes datos complementarios sobre los diferentes materiales de tuberías que existen en el mercado. Volveremos sobre tales técnicas, como ya ha quedado dicho, en la parte final del presente Curso.

4. ESFUERZOS HIDRÁULICOS SOBRE TUBERÍAS.

La circulación del agua a presión por una tubería origina unos esfuerzos internos y externos que han de ser calculados para evitar incidentes desagradables. Así por ejemplo, la presión interior crea unas tensiones tangenciales sobre la pared de la tubería que someten al material a un esfuerzo de tracción; por lo que el espesor de las paredes de la conducción debe ser calculado en función de la presión a que va a ser sometida dicha conducción. De igual manera, en codos, bifurcaciones, cambios de dirección, etc., se producen esfuerzos que hay que tener en cuenta a la hora de montar e instalar una tubería. Estos esfuerzos tienen un origen hidráulico y serán objeto de estudio en el presente apartado. Comenzamos con el primero de ellos.

4.1 Esfuerzos debidos a la presión interior. Timbraje de tuberías.

Un dato fundamental a tener en cuenta, cuando tenemos que proyectar una instalación, es el de la presión interna que es capaz de soportar la conducción.

Esta será función, como veremos seguidamente, del espesor de las paredes de la tubería, de su diámetro y, finalmente, del material empleado.

La expresión que liga todos estos parámetros se puede obtener fácilmente. Para ello consideraremos un tramo de tubería de 1 m de longitud, en la cual su espesor es muy pequeño comparado con el diámetro. Llamemos D al diámetro interior de la misma y e al espesor de las paredes, siendo p la presión interior y σ la tensión a la que está trabajando el material.

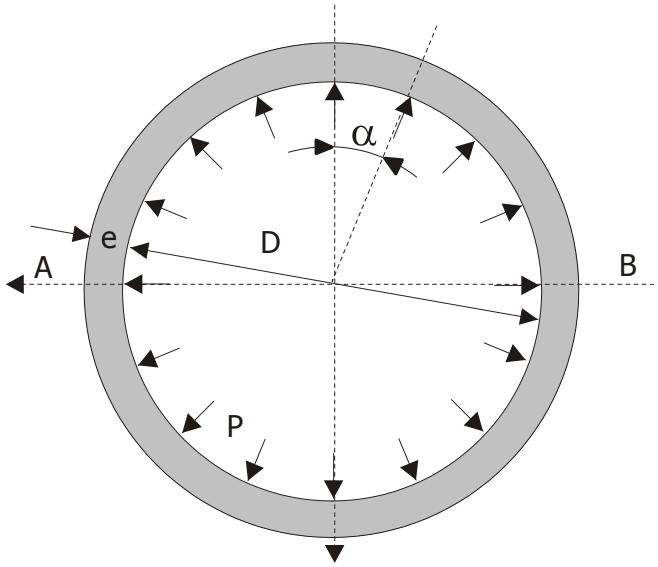

FIGURA 3.1 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA TUBERÍA

La parte del tubo superior al plano A-B (Figura 3.1) estará en equilibrio considerando conjuntamente las fuerzas ejercidas por el fluido así como las reacciones que en A y B se ejercen por la parte inferior de la tubería, que serán normales a la sección longitudinal de la tubería y de valor e . σ cada una.

La resultante de las fuerzas interiores, por metro de longitud de tubería, será:

- Componente vertical F_V:

$$F_V = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} p\cos\alpha dS = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} p\frac{D}{2}\cos\alpha d\alpha = pD$$

en donde dS es un diferencial de la superficie interior de la tubería.

- Componente horizontal, F_H:

$$F_H = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} psen\alpha dS = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} p\frac{D}{2} sen\alpha d\alpha = 0$$

El equilibrio entre las reacciones y la resultante de las fuerzas interiores proporciona (Figura 3.2.)

$$2e\sigma = pD$$

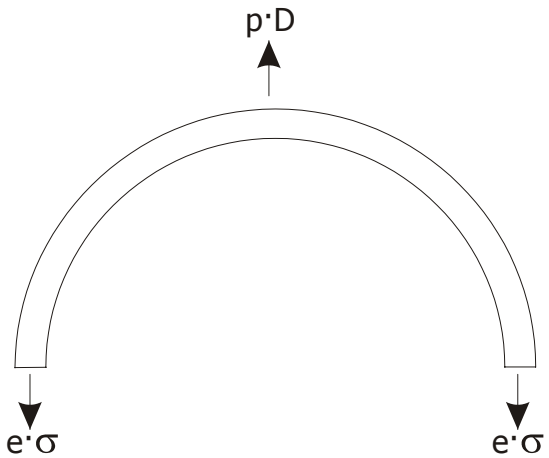

FIGURA 3.2 EQUILIBRIO DE FUERZAS

luego:

$$\sigma = \frac{pD}{2e} \tag{3.1}$$

que es la tensión a que estará sometido el material y que tendrá que ser, en cualquier caso, inferior a la máxima tensión que puede llegar a admitir, $\sigma_{adm.}$

Las condiciones límite se alcanzarán cuando $\sigma = \sigma_{adm}$, de manera que la máxima presión que podrá soportar la tubería será:

$$p_{\max} = \frac{2e\,\sigma_{adm}}{2e} \tag{3.2}$$

que, como vemos, aumenta con el espesor y la carga límite de trabajo que puede llegar a soportar el material.

Evidentemente, a igualdad de espesor y material, cuanto mayor sea el diámetro de la conducción, menor será la presión a la que podemos someter la conducción. Esto es así debido a que al aumentar D se incrementa la superficie interior de la tubería y, consecuentemente, la resultante de las fuerzas interiores que deben ser compensadas por las reacciones, 2 e σ, que permanecen constantes.

En tubos en los que la relación e/D > 1/20, las tensiones no se reparten uniformemente en la pared, dando lugar a expresiones alternativas para el cálculo de las tensiones de trabajo de la conducción, tanto las tangenciales como las radiales, estas últimas inexistentes en el supuesto anterior.

El esfuerzo tangencial, a una distancia r del centro de la tubería A, $\sigma_t(r)$, resulta ser:

$$\sigma_t(r) = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2 p}{\left(\frac{D}{2}+e\right)^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}\left(1 + \frac{\left(\frac{D}{2}+e\right)^2}{r^2}\right) \tag{3.3}$$

mientras que el radial, $\sigma_r(r)$ es:

$$\sigma_r(r) = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2 p}{\left(\frac{D}{2}+e\right)^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}\left(1 - \frac{\left(\frac{D}{2}+e\right)^2}{r^2}\right) \tag{3.4}$$

Generalmente, la relación entre el espesor y el diámetro es tal que existe toda una gama de "clases" de tubería, de manera que cada "clase" tiene una presión nominal de trabajo. El "timbraje" responde precisamente al espesor capaz de soportar una determinada presión.

El detallar las tuberías normalizadas que pueden encontrarse en el mercado queda fuera del alcance de la presente obra. Dependen del fabricante y del país y se detallan en los catálogos de las diferentes casas comerciales. Es destacable el hecho de que las tuberías de plástico se referencian a partir del diámetro exterior, mientras que el resto de los materiales se referencian utilizando el diámetro interior. Como además los coeficientes de trabajo σ_{max} de los plásticos son los mas bajos de la gama (ver Tabla 3.2), los espesores acostumbran a ser importantes. Ello se traduce en un diámetro interior bastante diferente del exterior. Es muy importante tener presente estas cuestiones prácticas, que suelen venir reguladas por las Normas de cada país.

	$\sigma_{máx}$ (kp/cm²)	E (kp/cm²)	NOTAS
HORMIGÓN CON CAMISA DE CHAPA	*DEPENDE RELACIÓN ACERO/HORMIGÓN*	*DEPENDE RELACIÓN ACERO/ HORMIGÓN*	*CONSULTAR FABRICANTE*
HORMIGÓN PRETENSADO	*DEPENDE RELACIÓN ACERO/HORMIGÓN*	*DEPENDE RELACIÓN ACERO/HORMIGÓN*	
POLIETILENO	25 ÷ 80 (baja densidad ÷ alta densidad)	2.000 ÷ 9.000 (baja densidad ÷ alta densidad)	Depende de las calidades. Si aparece un sólo valor corresponde al más usual
FUNDICIÓN DÚCTIL	1800 ÷ 2500	1.700.000	
AMIANTO CEMENTO	300	180.000	
ACERO	2600	2.100.000	

TABLA 3.2

Los parámetros que definen las características resistentes del material son la tensión máxima admisible a tracción, σ_{max}, así como el módulo elástico de Young, E. Han sido detallados en la Tabla 3.2 estos valores para los materiales considerados.

Ejemplo 3.1. Determinación de presión máxima admisible en función del material.

Calcular la máxima presión que puede admitir una tubería de 300mm de diámetro interior y 15 mm de espesor en función del material utilizado. El coeficiente de seguridad considerado es 2.

La expresión (3.2), conjuntamente con el factor de seguridad adoptado, proporciona:

$$p_{\max} = 0{,}5\,\frac{2e\,\sigma_{adm}}{D} = 0.05\,\sigma_{adm}$$

A partir de la Tabla 3.2 se obtiene:

PVC, p_{max}= 4.0 kp/cm²
PE, p_{max}= 2,62 kp/cm²
Fundición, p_{max}=107,50 kp/cm²
Amianto - cemento, p_{max}= 15 kp/cm²
Acero, p_{max}= 130 kp/cm²

En donde se han utilizado, cuando procede, los valores intermedios del intervalo detallado en la Tabla 3.2..

4.2 Cálculo de esfuerzos en piezas especiales.

Como consecuencia de las variaciones experimentadas por la presión, cantidad de movimiento, etc., en válvulas, codos, bifurcaciones, y cualquier cambio de dirección de la conducción, aparecen unos esfuerzos que deben ser absorbidos, si el terreno no fuera capaz de ello por anclajes. Estos macizos se calcularán de forma que la tubería quede absolutamente inmóvil, debido a la repercusión negativa que ello puede tener sobre todo en juntas y elementos complementarios de la tubería. Si la conducción está enterrada las mismas tierras de relleno pueden ser suficiente, si el diámetro no es muy grande (D < 500 mm.), para absorber estos esfuerzos. De ahí la gran importancia de cuantificar estas acciones, al objeto de calcular el anclaje necesario.

La forma de calcular estos empujes es mediante la ecuación de la cantidad de movimiento (2.3), vista en el capítulo precedente. Recordemos que, básicamente, esta ecuación viene a constituir una expresión vectorial de equilibrio, en el caso de régimen permanente, entre las fuerzas exteriores que actúan sobre la superficie que delimita a un volumen de fluido y la variación de la cantidad de movimiento con el tiempo que atraviesa este volumen de fluido.

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = \rho Q(\vec{V}_s - \vec{V}_e)$$

El primer miembro de la precedente ecuación, para el caso de un codo de ángulo α como el que aparece en la Figura 3.3, se tiene:

$$\Sigma F_{ext,x} = F - p_1 Asen\frac{\alpha}{2} - p_2 Asen\frac{\alpha}{2}$$

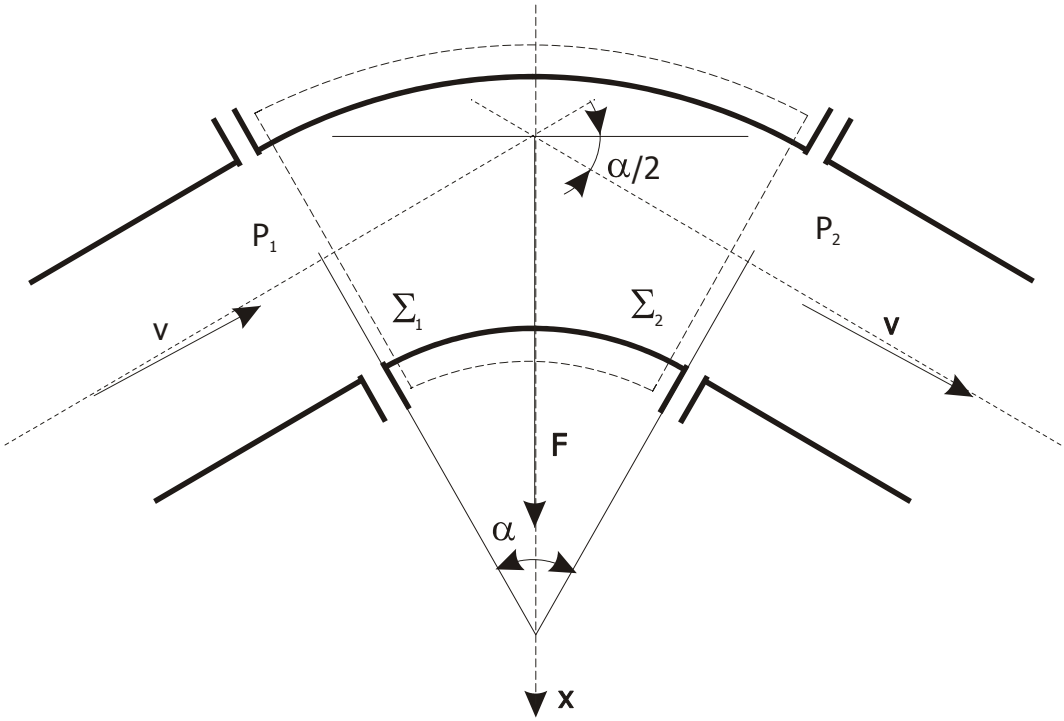

FIGURA 3.3

Donde F es la reacción del terreno y anclajes, tomando el volumen de control señalado a trazo discontinuo y aplicando la ecuación (2.3) , mientras que p_1 y p_2 son las presiones aguas arriba y abajo del tramo de tubería considerado, todo ello proyectado sobre el eje x.

Por lo que al segundo miembro de la ecuación (2.3) respecta, tenemos:

$$\rho Q(\vec{V}_s - \vec{V}_e) = 2\rho Qvsen\frac{\alpha}{2}$$

Igualando ambas:

$$F - p_1 A sen\frac{\alpha}{2} - p_2 A sen\frac{\alpha}{2} = 2\rho Q v sen\frac{\alpha}{2}$$

Si despreciamos la pequeña pérdida de carga entre 1 y 2 y dado que la altura geométrica de ambos puntos es la misma, p_1 resulta prácticamente igual a p_2 por lo que:

luego:

$$F = 2pAsen\frac{\alpha}{2} + 2\rho\frac{Q^2}{A}sen\frac{\alpha}{2}$$

$$F = 2\left(pA + \rho\frac{Q^2}{A}\right)sen\frac{\alpha}{2} - 2pAsen\frac{\alpha}{2} \qquad (3.6)$$

Ahora bien, teniendo en cuenta el elevado valor de p en unidades estándar (1m.c.a.=1.000 Kp/m^2) y la reducida magnitud que representa a Q cuando se expresa en las mismas unidades, m^3/seg., el segundo sumando resulta, como se ve, despreciable, lo que justifica la aproximación efectuada. El resultado obtenido: fuerzas hidrodinámicas despreciables frente a las hidrostáticas, acostumbra a ser un denominador común en todo este tipo de acciones.

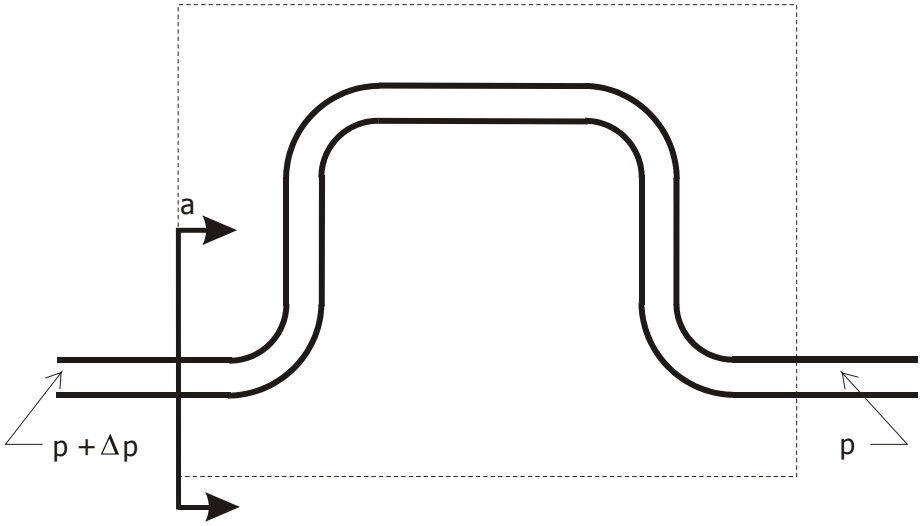

FIGURA 3.4

Para otros casos como bifurcaciones, reducciones, etc., y para determinar este tipo de acciones, se aplicaría *mutatis mutandi* la ecuación de la cantidad de movimiento de forma análoga.

Es importante consignar que los transitorios hidráulicos pueden provocar desequilibrios pasajeros en los niveles de presión en una tubería, y ello se traduce en importantes acciones mecánicas en los cambios de dirección. Supongamos una conducción en la que se ha trazado una lira para obviar, por ejemplo, un problema de dilatación térmica (Figura 3.4).

Un cierre instantáneo de una válvula en el extremo de la izquierda de la tubería genera una sobrepresión Δp que viaja a una celeridad *a* tal y como se detallará en las lección 10. Durante escasas décimas de segundo existirá un desequilibrio dinámico transitorio en el conjunto de la lira de valor:

$$F_d = \Delta p.A \qquad (3.7)$$

Asimismo, una vez alcance la sobrepresión al extremo derecho de la lira (o del codo), la presión final a tener en cuenta para calcular los esfuerzos hidráulicos en todo el conjunto, es p+Δp. En ocasiones Δp puede exceder varias veces el valor de p, por lo que al calcular los esfuerzos no pueden ignorarse las sobrepresiones debidas a los transitorios hidráulicos.

En el supuesto de un transitorio hidráulico, la expresión de partida que hemos adoptado, análoga a la (2.3), no es del todo correcta al deberse incluir en la misma un término complementario que tiene en cuenta la variación temporal de la cantidad de movimiento del fluido encerrada en el codo. Este sumando puede llegar a ser significativo en el supuesto de una brusca maniobra, contribuyendo a hacer mayores los esfuerzos mecánicos calculados. El detalle completo queda fuera de la presente obra.

En cualquier caso, en la práctica, los anclajes acostumbran a sobredimensionarse notablemente, por lo que en cierto modo ya se están contemplando estas singularidades. El cálculo de los anclajes propiamente dicho viene detallado en Mayol(1993), si bien en AEAS(1992) y en Canal de Isabel II (1.992) se dan criterios y tablas de carácter práctico para su dimensionado en proyectos e instalaciones reales.

En montajes muy específicos, tal cual conducciones en plataformas marinas (extracción de petróleo), las tuberías metálicas no pueden quedar absolutamente inmóviles debido a las dificultades que presenta el anclaje. En estos casos el cálculo de acciones en los cambios de dirección es complejo, sobre todo en los períodos transitorios. Debe efectuarse integrando conjuntamente las acciones hidráulicas y mecánicas. Es lo que se ha dado en llamar interacción fluido-estructura (ver p.e. Wigget et al, 1980). Ello refuerza la regla de oro de que el mejor montaje es el que inmoviliza absolutamente la tubería.

5. MONTAJE E INSTALACIÓN DE TUBERÍAS.

El montaje y la instalación de tuberías son aspectos de vital importancia cuando se pretende garantizar el correcto funcionamiento del sistema en el medio - largo plazo. Y son tanto más importantes cuanto más limitadas sean las características resistentes del material a instalar. En cualquier caso, en un Curso con un marcado cariz hidráulico, vamos a dedicar poca atención a estas cuestiones de carácter eminentemente práctico, pero entendemos que un buen proyecto de cálculo puede verse arruinado por una mala puesta en obra, por lo que resulta imprescindible enfatizar en estos aspectos.

A nuestro entender, el montaje e instalación de las tuberías debe cuidar, entre otros muchos, cuatro aspectos fundamentales:

a) Las uniones entre los distintos tubos, que deben resultar absolutamente estancas. Las juntas utilizadas deben estar ampliamente contrastadas toda vez que, tal cual la experiencia demuestra, constituyen el punto más vulnerable de la conducción.
b) La tubería debe quedar totalmente inmóvil, con la ayuda de los correspondientes anclajes, al objeto de que los esfuerzos hidráulicos (permanentes o transitorios) no se traduzcan, en el medio-largo plazo, en averías y fugas, particularmente en las uniones.
c) Las cargas externas, tanto las permanentes debidas a los rellenos de zanja, como las transitorias ocasionadas por el tráfico rodado, deben ser perfectamente absorbidas por la propia tubería.
d) La tubería debe quedar perfectamente protegida ante agentes externos, fundamentalmente terrenos agresivos.

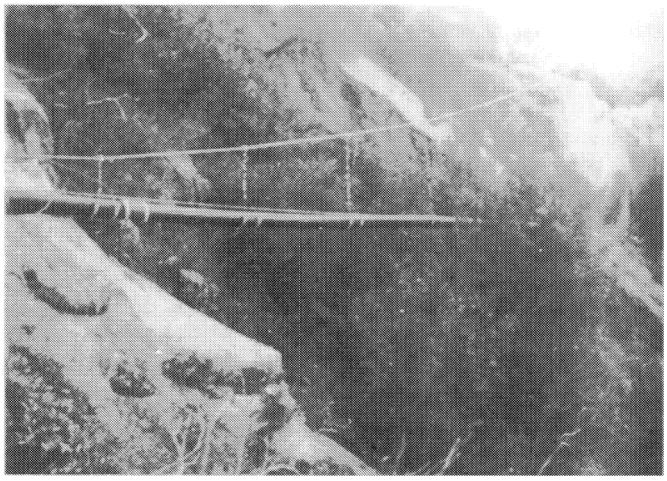

FIGURA 3.5 TUBERÍA DE 300 MM DE DIÁMETRO DE PEAD DE ALTA DENSIDAD, EN MC COY CANYON, CALIFORNIA (TANNER Y SICKAFOOSE, (1989))