

CAPÍTULO XI. CONDUCCIÓN DE AGUA CRUDA Y TRATADA

ÍNDICE

1. GENERALIDADES SOBRE CONDUCCIONES.....	1
1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL	1
1.2. TIPOS DE LÍNEAS DE CONDUCCIÓN.....	2
2. CONDUCCIONES A GRAVEDAD	4
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE CONDUCCIONES A GRAVEDAD	4
2.2. CONDUCTOS ABIERTOS Y CERRADOS	5
2.3. DISEÑO DE CANALES.....	6
2.3.1. <i>Canales sin Recubrimiento y no Erosionables</i>	6
2.3.1.1. Velocidad Máxima Permisible.....	7
2.3.1.2. Procedimiento de Diseño.....	7
3. CONDUCCIONES EN PRESIÓN	10
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL	10
3.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS	13
3.3. DETERMINACIÓN DE DIÁMETROS Y MATERIALES A UTILIZAR	14
3.4. REVESTIMIENTOS INTERIORES.....	14
3.5. PRESENCIA DE NAPAS FREÁTICAS	14
3.6. COLOCACIÓN EN ZANJA	15
3.6.1. <i>Estados de Carga a Considerar</i>	16
3.6.2. <i>Tapada</i>	18
3.7. COLOCACIÓN SOBRE APOYOS TIPO SILLETA	19
3.8. ANCLAJES	20
3.8.1. <i>Vinculación Interna y Externa de los Nudos</i>	24

3.9. CRUCE DE INSTALACIONES EXISTENTES	26
3.9.1. <i>Cruce Superior de Cursos Naturales de Agua, Canales o Carreteras</i>	<i>26</i>
3.9.2. <i>Cruce Inferior de Vías Férreas, Rutas Nacionales o Provinciales.....</i>	<i>26</i>
3.9.2.1. <i>Cruces de Vías Férreas.....</i>	<i>28</i>
3.9.2.2. <i>Cruces de Rutas Nacionales o Provinciales</i>	<i>31</i>
3.10. PIEZAS ESPECIALES.....	32
3.10.1. <i>Juntas</i>	<i>32</i>
3.10.2. <i>Juntas de Transición.....</i>	<i>35</i>
3.10.3. <i>Curvas y Codos</i>	<i>36</i>
3.10.4. <i>Tes.....</i>	<i>37</i>
3.10.5. <i>Reducciones.....</i>	<i>37</i>
3.10.6. <i>Piezas Terminales.....</i>	<i>38</i>
3.10.7. <i>Uniones.....</i>	<i>39</i>
3.10.8. <i>Piezas de Montaje e Intervención</i>	<i>39</i>
3.11. VÁLVULAS DE CIERRE	40
3.11.1. <i>Válvulas Esclusas.....</i>	<i>40</i>
3.11.2. <i>Válvula Mariposa</i>	<i>42</i>
3.12. VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN	43
3.13. VÁLVULA ANTIRRETORNO O DE RETENCIÓN	43
3.14. VENTILACIÓN DE LAS CONDUCCIONES A PRESIÓN	44
3.15. CÁMARAS DE DESAGÜE	60
3.16. GOLPE DE ARIETE.....	63
3.16.1. <i>Causas</i>	<i>66</i>
3.16.2. <i>Consecuencias.....</i>	<i>67</i>
3.16.3. <i>Técnicas y Mecanismos de Control.....</i>	<i>68</i>
3.17. PREVENCIÓN PARA EVITAR ROTURAS SÚBITAS.....	69
3.18. COLOCACIÓN DE LAS TUBERÍAS	70
3.18.1. <i>Generalidades</i>	<i>70</i>
3.18.2. <i>Requisitos Específicos</i>	<i>71</i>
3.18.3. <i>Instalaciones Submarinas o Subfluviales.....</i>	<i>71</i>
3.19. PRUEBAS HIDRÁULICAS Y RELLENO	73
3.20. PREVENCIÓN FRENTE A PROBLEMAS SÍSMICOS.....	75
4. INCRUSTACIÓN Y CORROSIÓN DE CAÑERÍAS	79
4.1. INTRODUCCIÓN	79
4.2. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS.....	84
4.3. TIPOS DE CORROSIÓN.....	86
4.3.1. <i>Corrosión Interna.....</i>	<i>86</i>
4.3.2. <i>Corrosión Externa</i>	<i>90</i>
4.3.3. <i>Tipos de Corrosión.....</i>	<i>91</i>
4.4. MÉTODOS PARA EL CONTROL DE LA INCRUSTACIÓN Y LA CORROSIÓN.....	98
4.4.1. <i>Control por Diseño</i>	<i>99</i>
4.4.2. <i>Control por Modificación del Ambiente</i>	<i>100</i>
4.4.3. <i>Control por Técnicas Electrolíticas – Protección Catódica</i>	<i>100</i>

4.4.4. Selección del Método de Control	103
4.5. DEGRADACIÓN DE HORMIGONES.....	103
4.5.1. Principales Factores de la Degradación de Estructuras Cementicias	103
4.5.2. Factores que Dañan el Hormigón.....	104
4.5.3. Medidas Para Prevenir la Degradación de las Estructuras Cementicias	107
5. BIBLIOGRAFÍA.....	109

LISTA DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. Medidas de zanjas normatizadas utilizadas por Aguas Argentinas	16
Tabla 2. Valores de carga admisibles en el fondo de las zanjas	24
Tabla 3. Dimensiones de los caños.....	28
Tabla 4. Dimensiones de caños conductores y caños camisa.....	32
Tabla 5. Válvulas de aire	50
Tabla 6. Serie galvánica para materiales utilizados en los sistemas de agua	93

FIGURAS

Figura 1. Canales abiertos y cerrados.....	3
Figura 2. Tuberías en presión.....	3
Figura 3. Elementos característicos de un canal.....	4
Figura 4. Datos de los Estados Unidos y de la URSS sobre velocidades permisibles en suelos no cohesivos.....	8
Figura 5. Curvas que muestran los datos de la URSS sobre velocidades permisibles en suelos cohesivos.....	8
Figura 6. Curvas de la URSS que muestran correcciones por profundidad para velocidades permisibles tanto para materiales cohesivos como para materiales no cohesivos	9
Figura 7. Diámetro interior y exterior	11
Figura 8. Denominación según altura.....	11
Figura 9. Colocación en zanja	15
Figura 10. Soporte de silleta.....	20
Figura 11. Fuerza debida a la acción dinámica.....	21
Figura 12. Sistema rígido.....	25
Figura 13. Sistema no rígido.....	25
Figura 14. Cruce superior de cursos de agua, canales o carreteras	27
Figura 15. Cruce tipo Grupo I	29
Figura 16. Cruce tipo Grupo II y III	30
Figura 17. Junta elástica.....	33
Figura 18. Junta acerrojada.....	33
Figura 19. Junta mecánica	34
Figura 20. Junta bridada.....	34
Figura 21. Junta roscada macho	35
Figura 22. Junta soldada	35
Figura 23. Juntas de transición.....	36
Figura 24. Curvas y codos.....	36
Figura 25. Tes.....	37
Figura 26. Reducciones	38
Figura 27. Piezas terminales (tapones).....	38
Figura 28. Uniones	39
Figura 29. Piezas de montaje e intervención	39
Figura 30. Válvulas esclusas.....	40
Figura 31. Instalaciones de válvulas esclusas	42
Figura 32. Válvula mariposa	42
Figura 33. Cámara para válvula mariposa	43
Figura 34. Válvula de retención	44
Figura 35. Esquema de ubicación de válvulas de aire y cámaras de desagüe en una conducción....	45
Figura 36. Columna de ventilación	45
Figura 37. Torre de ventilación	46
Figura 38. Válvulas de aire de tres posiciones.....	47
Figura 39. Perfiles de conducciones.....	48
Figura 40. Perfil en terreno horizontal tipo “dientes de sierra” (se ha acentuado la escala vertical) ...	49
Figura 41. Cámara y conexión para válvula de aire	49
Figura 42. Derrame por orificios	51
Figura 43. Sección contraída.....	54
Figura 44. Expansión adiabática	54
Figura 45. Cámara de desagüe	60
Figura 46. Tramo final de una conducción	61
Figura 47. Tramos intermedios de una conducción	63
Figura 48. Sobrepresión en función del tiempo de maniobra.....	65
Figura 49. Llenado de una impulsión inicialmente vacía.....	66
Figura 50. Llenado de una columna de descarga antes de una válvula de retención cerrada.....	67
Figura 51. Reacciones eléctricas y químicas que se producen en una celda de corrosión.....	83

Figura 52. Anodo pequeño - Cátodo grande.....	94
Figura 53. Relación superficial ánodo - Cátodo favorable	94
Figura 54. Corrosión por corrientes parásitas.....	98
Figura 55. Protección catódica con ánodo perdido o de “sacrificio”	101
Figura 56. Protección catódica por corriente externa	102
Figura 57. Corrosión localizada	102

1. GENERALIDADES SOBRE CONDUCCIONES

1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Las obras destinadas al transporte de agua reciben el nombre de "Líneas de Conducción".

La nomenclatura normalmente utilizada clasifica a las líneas de conducción en:

- Aducciones que corresponden al caso de las líneas de conducción que se utilizan para agua cruda.
- Conducciones para aquellas que se emplean en el transporte de agua tratada.

Trazado

La topografía y la geotecnia normalmente condicionan el trazado, siendo difícil en general adoptar una traza recta (menor distancia) entre el comienzo y fin de las líneas de conducción.

También condicionan la forma de ejecutar la obra ya sea por zanjeo total o parcial, colocación sobre terreno natural o mediante cunas de apoyo para las tuberías, por excavación, terraplén o a media ladera para los canales.

Recomendaciones sobre el trazado

Entre las recomendaciones que pueden formularse en cuanto al trazado desde el punto de vista técnico, pueden citarse:

- Tender a la menor longitud.
- Tender hacia largas alineaciones, evitando en todo lo posible, los cambios de dirección tanto vertical como horizontal para ahorrar piezas especiales para las tuberías y para ahorrar saltos, rápidos y curvas en el caso de canales.
- Estudiar la posibilidad de seguir caminos o zonas de dominio público, a pesar de la mayor longitud del posible recorrido.
- Evaluar distintas soluciones, ya sea rodeando cada obstáculo topográfico o mediante obras especiales como túneles, sifones, etc.
- Evitar bombeos innecesarios.

El estudio del trazado generalmente pasa por varias etapas sucesivas hasta su diseño definitivo. Sobre una cartografía adecuada se deben plantear en gabinete las posibles soluciones, que deberán ser evaluadas, una vez que se haya efectuado un recorrido de las distintas trazas, analizando las características topográficas del terreno así como sus condiciones geológicas, registrando todos los condicionantes por obras públicas o privadas y evaluando su impacto ambiental.

Factores condicionantes

Dada la gran variedad de factores condicionantes que influyen en la elección de la traza de una línea de conducción, generalmente es necesario efectuar una comparación entre posibles soluciones, teniendo en cuenta:

- Posibles trazas y obras especiales requeridas.
- Perfiles en las posibles soluciones.
- Existencia de un camino de servicio o no.
- Pendiente longitudinal.
- Pendiente transversal del terreno.
- Tipo de terreno.
- Aspectos económicos.
- Aspectos ambientales.

La gama de soluciones a evaluar deberá estar formada por la combinación de alternativas consideradas como posibles en el reconocimiento de las probables trazas.

Se pueden considerar como posibles una serie de secciones tipo establecidas previamente (enterrada, con taludes, a media ladera, etc.).

Dentro de cada una de ellas se deben definir los valores máximos y mínimos de los parámetros geométricos, tales como tapada, ancho de zanja o terraplén, etc.

Materiales

Diversos materiales están disponibles en el mercado, para la ejecución de las Conducciones.

El proyectista deberá tener un acabado conocimiento de los materiales en uso, pero en el caso de diseños de optimización de instalaciones existentes, es necesario que conozca también los de uso más antiguo, ya que muchas instalaciones que todavía se encuentran en servicio han sido construidas con materiales y accesorios para los que, por razones técnicas o económicas, puede haberse discontinuado su fabricación.

1.2. TIPOS DE LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

Para las líneas de conducción de agua desde el punto de vista hidráulico se plantean dos tipos de escurrimiento:

- A gravedad (canalizaciones abiertas o cerradas).
- En presión (tuberías o conductos en presión).

Las a gravedad son aquellas en que la fuerza tractiva está originada solo por la presencia de un campo gravitacional (campo gravitatorio terrestre) y poseen una superficie libre (plano equipotencial o isobárico) en contacto con la atmósfera.

La conducción se materializa por un límite sólido que contiene al fluido a transportar, en este caso agua como se observa en la **Figura 1**.

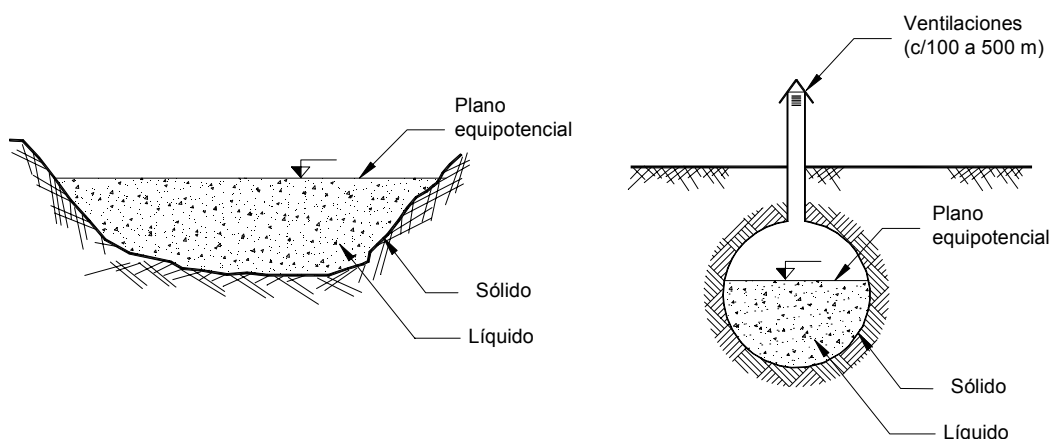


Figura 1. Canales abiertos y cerrados

Las en presión son aquellas en la que la fuerza tractiva está originada en una diferencia de presiones.

Están materializadas por un conducto sólido cerrado que contiene al fluido a transportar, como se observa en la **Figura 2**, en el cual la presión interior puede ser mayor o menor que la atmosférica.

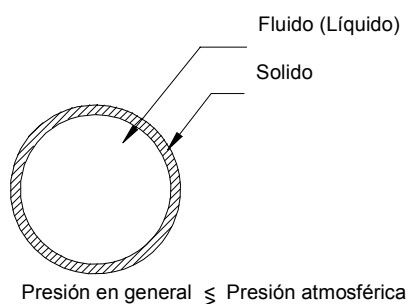


Figura 2. Tuberías en presión

Las conducciones en presión que se originan en estaciones de bombeo se denominan genéricamente cañerías de impulsión o impulsiones.

2. CONDUCCIONES A GRAVEDAD

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE CONDUCCIONES A GRAVEDAD

Cuando se tiene un canal con generatrices paralelas, sección prismática y el régimen es permanente y uniforme, permanecen constantes los elementos geométricos e hidráulicos.

Los elementos característicos (ver **Figura 3**) tanto hidráulicos como geométricos de un canal, expresando sus magnitudes en el sistema técnico de unidades son:

Q = caudal o gasto [m^3/s]

A = área (hidráulica) de la sección transversal [m^2]

U = velocidad media [m/s], expresada por $U = Q/A$

h = tirante hidráulico normal [m]. Es la distancia máxima vertical comprendida entre la superficie libre del líquido y el punto más bajo del fondo o solera del canal

i = pendiente longitudinal del fondo del canal, habitualmente expresada en ‰

x = perímetro mojado [m]. Es la longitud del contorno de la sección transversal en contacto con el agua

R = radio hidráulico [m]. Se expresa por A/X

j = pendiente de la línea piezométrica

j^* = pendiente de la línea de energía total

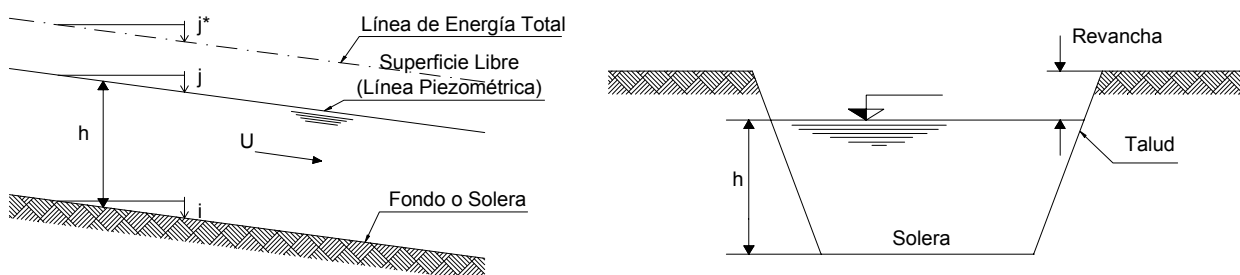


Figura 3. Elementos característicos de un canal

Las secciones transversales se pueden clasificar en:

- De contorno abierto (canales a cielo abierto)
- De contorno cerrado (canales entubados)

Las principales formas geométricas de las secciones abiertas son:

- Trapecial
- Trapecial asimétrica
- Triangular
- Rectangular
- Tolva
- Semicircular
- Combinada trapecial-rectangular

En cuanto a las de sección cerrada se tiene:

- Segmento de círculo
- Ovoidal
- Parabólica
- Rectangular
- Modelo Tipo OSN

Condición de mínima resistencia o gasto máximo

En los canales de cualquier forma de sección, tanto abiertos como cerrados, la condición de mínima resistencia y en consecuencia un gasto máximo se cumple cuando el perímetro mojado X es el mínimo o el radio hidráulico R es máximo.

Para la sección trapecial se logra con aquella que corresponde a un semihexágono regular (taludes inclinados 30°). En las rectangulares y en las tolvas cuando el radio hidráulico es la mitad del tirante.

Un caso especial es la sección segmento de círculo donde la relación tirante-diámetro que maximiza la velocidad ($h/D = 0,81$) no coincide con la que permite el gasto máximo ($h/D = 0,94$).

2.2. CONDUCTOS ABIERTOS Y CERRADOS

Si las características topográficas del trazado posibilitan indistintamente la selección de uno u otro tipo de conducto, existe sin embargo un limitante que es la calidad del agua a transportar.

En el caso de conducción de agua desde fuentes de provisión subterráneas, ya sean pozos profundos, manantiales, lloraderos u ojos de agua, presuponen en general, debe considerarse que la explotación de estas fuentes es viable cuando cumplen con los parámetros químicos establecidos en las Normas de Calidad, dado que se descuenta el cumplimiento de los requerimientos físicos en lo que hace a temperatura, sólidos sedimentables, turbiedad y características organolépticas, con el agregado tan solo de un tratamiento precautorio de desinfección bacteriológica.

En el caso de agua potabilizada razones de orden sanitario también son un límite para su selección, dada la posibilidad de su contaminación.

Estas razones restringen la selección en los casos indicados a conductos cerrados, ya sean diseñados hidráulicamente como canales a gravedad o tuberías en presión.

Para los conductos cerrados a gravedad debe también considerarse el riesgo ante la posibilidad de contaminación por infiltraciones en las juntas constructivas y para las conducciones abiertas a gravedad las posibles evaporaciones ante condiciones de temperatura y humedad medio ambiente que pueden aumentar en los períodos críticos de provisión.

En cuanto a los desagües de plantas de tratamiento se aconseja, para evitar toda posibilidad de riesgos a la salud humana y al ambiente, también la adopción de conductos cerrados.

2.3. DISEÑO DE CANALES

En el Anexo II – Temas de Hidráulica de las Fundamentaciones - se desarrollan aspectos referidos al cálculo y dimensionamiento de canales.

2.3.1. Canales sin Recubrimiento y no Erosionables

Cuando se construye un canal, ya sea por excavación, terraplenes o a media ladera, en un suelo natural es decir sin recubrimiento, su comportamiento es función de una variedad de factores físicos y de condiciones de campo complejas de difícil evaluación, que al presente escapa al alcance de una formulación puramente teórica.

Al momento existen dos métodos de aproximación para su diseño, a saber:

- Método de la velocidad permisible
- Método de las fuerzas tractivas

El método de la velocidad permisible es el de mayor difusión en los Estados Unidos con el fin de asegurar un canal libre de socavación.

El método de la fuerza tractiva ha sido empleado en Europa y sujeto a investigaciones exhaustivas por el U.S. Bureau of Reclamation y se recomienda solo tentativamente para el diseño.

Es fundamental entender que cualquiera sea el método aplicado, en el estado actual del arte de la ingeniería de canales solo sirven como guía y no suplantán la experiencia y el criterio del proyectista.

2.3.1.1. Velocidad Máxima Permisible

Desde el punto de vista histórico la primera referencia se encuentra en Robert G. Kennedy, "The prevention of silting in irrigation canals", Proceedings, Vol. 119, Institution of Civil Engineers London, 1895 que se continua con los trabajos de Echeverry, "Irrigation practice and engineering", Vol II, Mc Gran Hill Book Company Inc, New York, 1915 y las difundidas tablas de Fortier y Scobey, ver F.C. Scobey. "The flow of water in irrigation channels".U.S. Departament of Agriculture, Professional Paper, Bulletin N° 194, 1915.

En 1936 en una revista rusa (ver "The maximun permissible meam velocity in open channels", Hydrotechnical construction N° 5, Moscú, mayo de 1936) se publicaron valores de las velocidades medias máximas permisibles superadas las cuales se provoca la socavación en suelos cohesivos o no y con corrección en función de la profundidad del canal, que constituye en la actualidad la fuente más amplia y confiable. **Figura 4, Figura 5 y Figura 6.**

2.3.1.2. Procedimiento de Diseño

Para un canal de sección trapezoidal, los pasos a seguir son:

- Conocido el material que materializa la sección del canal, se adopta el coeficiente n de Manning y la pendiente del talud lateral m . A continuación se debe estimar la velocidad máxima permitida de acuerdo a la **Figura 4, Figura 5 y Figura 6.**
- Se despeja de la expresión de Chezy – Manning el radio hidráulico

$$R = \left(\frac{n U_{max}}{i^{1/2}} \right)^{3/2}$$

- Se determina el área

$$A = \frac{Q}{U_{max}}$$

- Se calcula el perímetro mojado

$$x = \frac{A}{R}$$

- Resolviendo simultáneamente las siguientes expresiones se despeja h (tirante) y B_f (base de fondo)

$$A = (B_f + m h) h$$

$$x = B_f + 2 h \sqrt{1 + m^2}$$

- Se agrega una revancha y se adaptan las medidas para lograr un diseño práctico

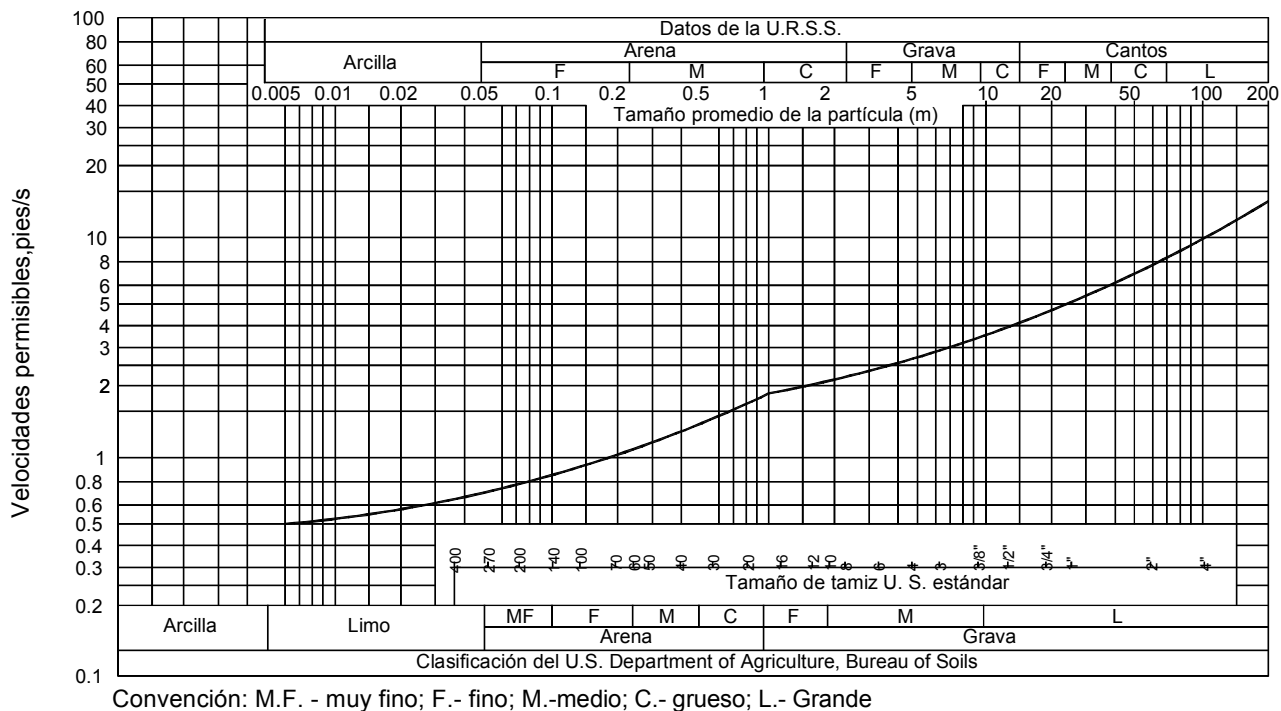


Figura 4. Datos de los Estados Unidos y de la URSS sobre velocidades permisibles en suelos no cohesivos

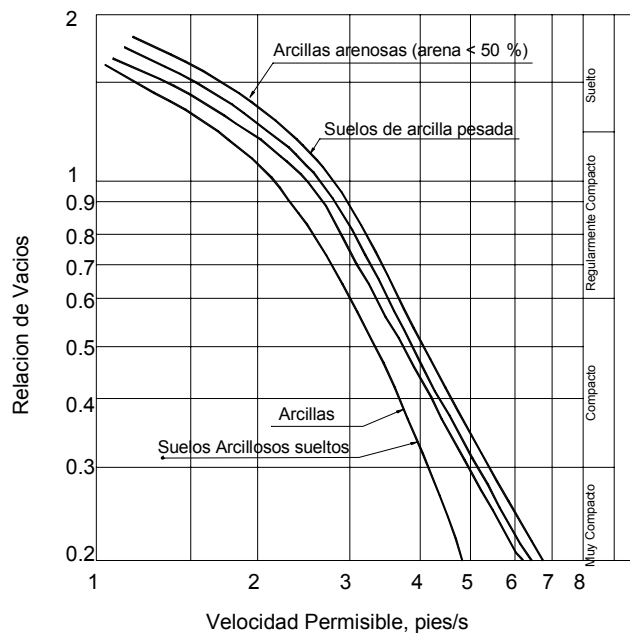


Figura 5. Curvas que muestran los datos de la URSS sobre velocidades permisibles en suelos cohesivos

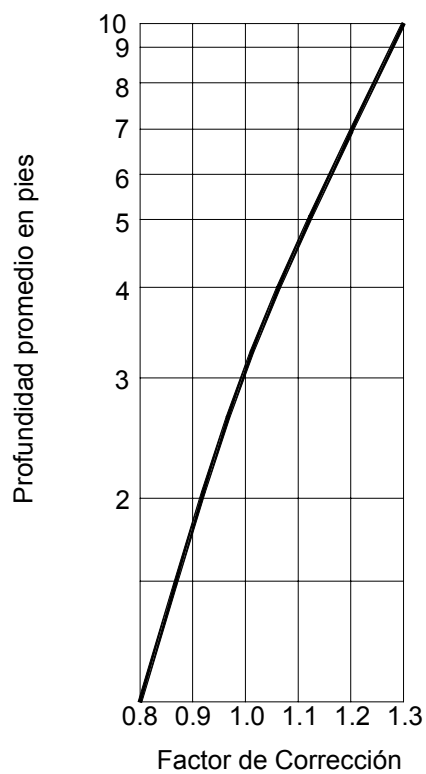


Figura 6. Curvas de la URSS que muestran correcciones por profundidad para velocidades permisibles tanto para materiales cohesivos como para materiales no cohesivos

3. CONDUCCIONES EN PRESIÓN

3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Sin que implique una lista taxativa o un orden de prelación los materiales normalmente utilizados para cañerías de conducción comprenden (por orden alfabético):

- A, acero
- A C, asbesto cemento
- F.D., hierro dúctil
- H° A°, hormigón armado y hormigón pretensado
- P.E.A.D., polietileno de alta densidad
- P.R.F.V., plástico reforzado con fibra de vidrio
- P.V.C., policloruro de vinilo

En el Anexo IV “Calidad de Insumos y Materiales Utilizados en Sistemas de Abastecimiento de Agua” se ha desarrollado en profundidad la normativa correspondiente al tema tuberías, piezas especiales y válvulas.

Numerosos organismos tanto nacionales como internacionales han desarrollado un cuerpo normativo en relación a tuberías, piezas especiales y válvulas.

Cabe mencionar en lo que hace a las líneas de conducción de agua:

- AFNOR, Asociación Francesa de Normalización.
- ANSI, American National Standard Institute.
- ASME, American Society of Mechanical Engineers.
- ASTM, American Society for Testing and Materials.
- AWS, American Welding Society.
- AWWA, American Water Works Association.
- IRAM, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
- ISO, International Organization for Standardization.
- OSN, Obras Sanitarias de la Nación.
- PCA, Portland Cement Association, E.E.U.U.

Los principales elementos geométricos (**Figura 7**) de la sección transversal de una tubería son:

- DN: Diámetro nominal. Corresponde al diámetro con que son habitualmente designadas las tuberías, tanto técnicamente como en el comercio.
- DE: Diámetro exterior. Es el máximo de la sección normal de la tubería.
- DI: Diámetro interior. Es el mínimo de la sección normal de la tubería. Corresponde al diámetro neto de la sección para aquellos materiales que no emplean un recubrimiento protector interno y el hidráulicamente aprovechable en los que utilizan un recubrimiento protector interior.

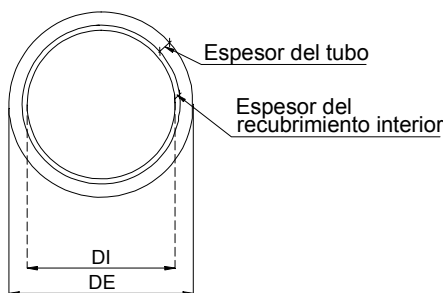


Figura 7. Diámetro interior y exterior

Para las tuberías fabricadas con acero (A) (con DN mayor o igual de 356 mm = 14 pulgadas), P.E.A.D., P.R.F.V. y P.V.C. el diámetro nominal DN coincide con el diámetro exterior DE. Esto significa que con el aumento de la presión de diseño (ó “clase”) - que ocasiona la necesidad de aumentar el espesor- la sección hidráulica de pasaje del líquido disminuye.

En el caso de tuberías fabricadas con asbesto cemento (AC), hierro dúctil (FD) y hormigón armado (H°A°) el diámetro nominal DN coincide con el diámetro interior DI por lo que no se modifica la sección hidráulica de pasaje con el aumento de la clase.

En tuberías de acero (A) con diámetro nominal DN menor de 306 mm (14 pulgadas) este no coincide ni con el diámetro interior DI ni con el diámetro exterior DE, estando establecidos en las normas (ASTM, AWWA, IRAM) sus respectivos valores.

En la **Figura 8** se hallan indicadas las denominaciones de las diferentes posiciones en altura de la sección normal.

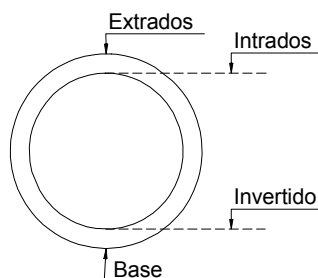


Figura 8. Denominación según altura

Únicamente las tuberías construidas con materiales susceptibles de sufrir un ataque por la calidad del agua a transportar utilizan un recubrimiento protector interno, tal el caso del acero y el hierro dúctil.

En las condiciones normales de colocación de las tuberías para líneas de conducción las mismas se ubican en zanjas, que a la vez que ofrecen una protección mecánica ante cargas externas de tránsito, liberan el trazado (que habitualmente se realiza por calles o por las zonas libres de las rutas) y las protegen de posibles congelamientos.

En las mismas se denomina tapada a la medida de la cubierta de tierra entre el nivel del terreno natural, veredas o pavimentos y el extradós de la cañería.

Para el dimensionamiento estructural de una tubería se deben considerar diversos estados de carga tales como presión interior, depresión, carga de terreno, carga de tránsito, nivel freático, altura de agua (cruces inferiores de cursos de agua), cargas concentradas o distribuidas particulares (válvulas, aislantes exteriores, obreros, etc.) y sobrepresiones y depresiones ocasionadas por movimientos impermanentes bruscamente variados (golpe de ariete), los que combinados de acuerdo a su simultaneidad determinan el espesor y la clase correspondiente.

En los casos que se deban salvar obstáculos tales como cursos de agua, caminos, depresiones del terreno, etc. mediante cruces superiores las tuberías se apoyan puntual y cíclicamente en soportes de silleta.

Dado que en todo cambio de dirección, diámetro, presencia de ramales de derivación, tapones terminales, etc. se originan fuerzas por acción dinámica de las corrientes y que en los casos de cierres de las tuberías (tapones terminales, válvulas) se originan fuerzas hidrostáticas, estas situaciones deberán ser equilibradas por juntas rígidas o por anclajes o dados de hormigón.

Especial atención y precauciones deben adoptarse para la realización de cruces inferiores de vías férreas y rutas nacionales o provinciales, cumpliendo con los requerimientos de los entes pertinentes.

La vinculación de los diferentes tramos rectos de tuberías y válvulas se materializan mediante las denominadas piezas especiales que también comprenden las de montaje e intervención que son las que fundamentalmente permiten efectuar reparaciones originadas por modificaciones, ampliaciones y/o mantenimiento, tanto preventivo como correctivo.

Las válvulas de cierre tienen como función permitir aislar distintos tramos de las líneas de conducción y permitir efectuar reparaciones o la limpieza de las mismas.

Las válvulas reguladoras de presión permiten dividir las líneas de conducción en tramos de manera tal que la presión en cada una de ellos no supere un valor prefijado, permitiendo así disminuir las clases de las tuberías a utilizar.

En las impulsiones se deben colocar válvulas de retención que tienen por objeto no permitir el vaciado de la línea de conducción cuando no operan las bombas, impidiendo asimismo la rotación de estas en sentido contrario al de funcionamiento y el deterioro de los cojinetes de empuje hidrodinámico.

Para permitir el egreso de aire durante el llenado de las tuberías y el ingreso durante el vaciado se deberán instalar, en los puntos más altos, columnas o torres de ventilación y/o válvulas de aire. Este tipo de instalación se debe complementar con cámaras de desagüe en los puntos más bajos.

Finalmente, se deben realizar, tramo a tramo, pruebas hidráulicas que permitirán detectar pérdidas, corregirlas y comprobar que en este aspecto la instalación cumple con lo especificado en la normativa al respecto.

3.2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Velocidad

Según la información suministrada por los fabricantes y como consta en la bibliografía, no se han detectado fallas localizadas tanto en materiales empleados en su estructura como en los recubrimientos internos (en aquellos que los requieren) con el empleo de velocidades medias de conducción del orden de los 5 m/s.

Si bien se efectúan variados y exhaustivos controles durante el proceso de fabricación en lo que respecta a la materia prima, parámetros dimensionales y acabado del producto terminado, es dable recordar que existen tolerancias establecidas por normas y que en toda producción seriada pueden algunos de los elementos individuales ser más susceptibles que otros a acusar a través del tiempo alguna falla, especialmente en una localización puntual en su estructura y/o recubrimiento.

Como es común en las variadas disciplinas de la ingeniería, se considera un coeficiente de seguridad para cubrirse de tales eventos.

En el presente caso, y coincidiendo asimismo con las recomendaciones de la bibliografía, normas y proyectos ejecutados, se adopta un coeficiente de seguridad del orden de 1,66 que lleva a fijar una velocidad media máxima admisible de 3 m/s.

Para el caso de transporte de agua que incluyan materiales sedimentables y para evitar embancamientos y las inherentes tareas de mantenimiento, se deberá contar con los parámetros necesarios (temperatura, diámetros de las partículas y masa específica de las mismas) a fin de determinar por alguno de los métodos usualmente aceptados (ecuación de CAMP-SHIELDS, teoría de las fuerzas tractivas) la velocidad mínima de transporte requerida a fin de verificar la condición de autolimpieza.

Presión

La presión máxima de servicio que debe soportar la instalación define, como se ha indicado, la "clase" de las tuberías a utilizar y por lo tanto el espesor de las paredes de los caños y las características de las piezas especiales.

3.3. DETERMINACIÓN DE DIÁMETROS Y MATERIALES A UTILIZAR

Fijado el período de diseño u horizonte de proyecto y los datos básicos de diseño se está en condición de determinar el caudal de cálculo que debe corresponder al caudal máximo diario para el horizonte de proyecto y debe incluir el rendimiento, estimado en base a las pérdidas por junta y cantidad de las mismas en la longitud de diseño.

Adoptando velocidades medias máximas habituales en la técnica se puede estimar entonces el o los diámetros necesarios.

Asimismo con la topografía correspondiente a la zona de emplazamiento de la conducción se pueden determinar las presiones a las que estarán sometidas las tuberías cuando funcionen en régimen permanente, debiéndose adicionar las originadas por regímenes impermanente (golpe de ariete) en base a la experiencia del proyectista.

Se pueden así definir los posibles diámetros y clase de las tuberías a utilizar en el proyecto.

Para cada material, si bien la oferta teórica presupone una importante gama de diámetros y clases, razones de fabricación local o costo de producción la limitan. Tampoco se debe perder de vista que lo que se debe considerar es el precio de la tubería colocada que incluye provisión, cargas y descargas, transporte, acopio, desfile (presentación de las tuberías sobre el terreno natural y paralelamente a la zanja), colocación, montaje, incidencia de piezas especiales y prueba hidráulica.

3.4. REVESTIMIENTOS INTERIORES

Sólo para el hierro dúctil o el acero se plantea la necesidad de contar con recubrimiento interior para la conducción de agua cruda o tratada.

En el caso del hierro dúctil los fabricantes suministran tres tipos básicos de protección interior.

- Clásica mediante mortero de cemento: agua cruda o potable.
- Reforzada mediante mortero de cemento aluminoso: aguas agresivas (blandas, ácidas, fuertemente abrasivas).
- Especial, con material a determinar, para efluentes industriales.

En cuanto al acero podrá aplicarse indistintamente un recubrimiento interior de mortero de cemento o epoxi líquido.

3.5. PRESENCIA DE NAPAS FREÁTICAS

Los materiales actualmente empleados para la fabricación de tuberías (P.E.A.D., P.V.C., F.D., A C, A, P.R.F.V., H° A°) son por su propia naturaleza impermeables.

En cuanto a las uniones, los tipos empleados (soldado, pegado, espiga y enchufe con aro de goma, bridado) son diseñadas para trabajar en relación a la clase adoptada para la tubería.

Para la situación normal la presión interna es mayor que la exterior considerando la presencia de napas freáticas y como resultado las posibles pérdidas en las juntas serán de adentro hacia afuera.

Sólo en los puntos singulares del trazado (lomas en que la línea piezométrica se encuentre más baja que la napa freática) o en el caso de una conducción vacía se podría generar un problema por el eventual ingreso de agua exterior y por consiguiente no potable al conducto.

Para los valores de las diferencias de presión posibles en estos casos las juntas antes mencionadas se comportan como estancas (soldado, pegado, bridado) o prácticamente estancas (aro de goma), con lo que de haberse alcanzado resultados satisfactorios en las pruebas hidráulicas normatizadas se deberían cumplir también los requerimientos del tema.

Sin embargo, no debe dejar de considerarse, especialmente en el caso de las juntas con aro de goma, que por envejecimiento del material de la junta, por incorrecta colocación del aro, o por desajustes de los mismos producidos por vibraciones u otras causas, la junta puede dejar de ser estanca y se produzcan fugas o ingreso de agua contaminada a las tuberías.

3.6. COLOCACIÓN EN ZANJA

Sus detalles se observan en la **Figura 9**. Las medidas normalmente utilizadas de A y B en función de DN se indican en la **Tabla 1**.

Los anchos de zanja (A) se miden a la altura del extradós del caño.

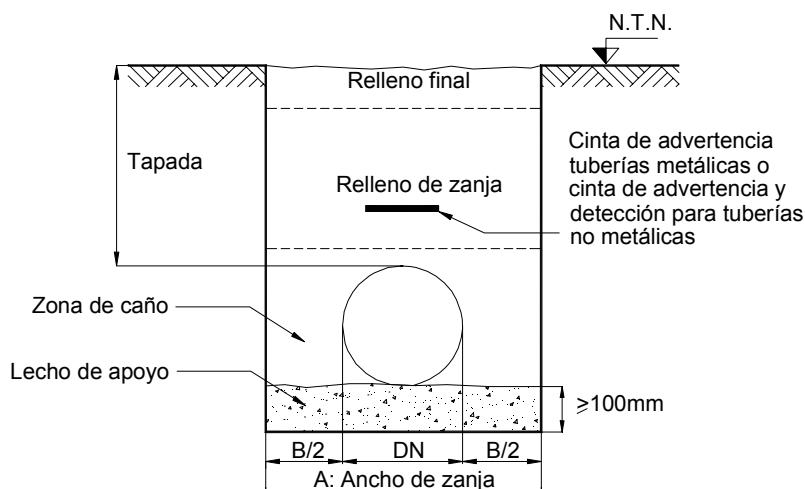


Figura 9. Colocación en zanja

Las medidas indicadas en la **Tabla 1** permiten calcular los volúmenes de excavación y son especialmente útiles para la confección del presupuesto de estos trabajos, dado que como habitualmente se establece en los pliegos, son los anchos máximos a certificar en obra.

La posibilidad de disminuir los mismos será función del equipo disponible en obra, ancho que deberá permitir efectuar la colocación y el correspondiente compactado del relleno, por lo que el proyectista podrá, en función de lo dicho, reducir el ancho.

Tanto en el apoyo de la cañería en el fondo de la zanja como en el posterior relleno de la misma se deben respetar estrictamente las especificaciones que al respecto proponen los fabricantes de la cañería.

DN mm	A mm	B cm
100	400	30
150	500	35
200	500	30
250	600	35
300	700	40
400	800	40
500	900	40
600	1000	40
> 700	DN + 500	50

Tabla 1. Medidas de zanjas normatizadas utilizadas por Aguas Argentinas

3.6.1. Estados de Carga a Considerar

Para el dimensionamiento o verificación de las tuberías en zanja se deben considerar los siguientes estados de carga combinados convenientemente:

- Presión interior.
- Depresión.
- Carga de terreno.
- Carga de tránsito.
- Nivel Freático.

El comportamiento estructural de una tubería enterrada sólo se comprende considerando el sistema suelo tubo.

En efecto, la interacción de los conductos con el suelo que los rodea depende de la rigidez o de la flexibilidad de ellos, que ocasiona estados de carga diferentes.

Las tuberías pueden ser clasificadas en tres categorías, según su resistencia a las cargas exteriores en:

- Tubos rígidos.
- Tubos flexibles.
- Tubos semirígidos.

En los tubos rígidos, tal como el caso del asbesto cemento, hormigón armado y hormigón pretensionado, estos no admiten más que una ovalización muy pequeña antes de la rotura.

Esta deformación (ovalización) es insuficiente para poner en juego las reacciones de apoyo lateral del relleno. Toda la carga vertical originada por el relleno y el tránsito debe ser soportada por la tubería, lo que ocasiona grandes tensiones por flexión en la pared.

El criterio de dimensionamiento es generalmente la carga máxima de rotura, con la consecuencia que en los tubos rígidos se maximizan las tensiones en las generatrices superior e inferior. El sistema suelo-tubo rígido es sumamente dependiente del ángulo de apoyo inferior y por lo tanto de una buena preparación de la cuna de apoyo.

Para los tubos flexibles, tal como el caso de los materiales plásticos (PEAD, PRFV, PVC) y del acero, estos admiten sin ruptura una importante deformación vertical por ovalización y la carga vertical de relleno y tránsito está equilibrada por las reacciones laterales del relleno.

El criterio de dimensionamiento usual es la deformación u ovalización máxima admisible así como la resistencia al pandeo o equilibrio elástico. La consecuencia es que la estabilidad del sistema suelo-tubo es directamente dependiente de la capacidad del relleno de generar una reacción pasiva de apoyo y por lo tanto del módulo de reacción de Spangler E' que es función del tipo de suelo empleado en el relleno y su compactación.

Finalmente para los tubos semirígidos, tal como el caso del hierro dúctil (FD), estos admiten ovalizaciones suficientes para que una parte de la carga vertical sea tomada por la reacción pasiva lateral del relleno y el resto por la flexión de las paredes del tubo, repartida en función de la resistencia propia de la tubería y la que aporta el relleno. El criterio de dimensionamiento es tensiones máximas por flexión para diámetros pequeños (menores de 100 mm) y ovalización máxima para los diámetros superiores. Este material ofrece una seguridad extra para el caso de una evolución desfavorable en el tiempo de cargas o condiciones de apoyo.

Las metodologías de cálculo y los parámetros necesarios se hallan, para los materiales considerados, en las correspondientes normas ANSI, ASTM, AWWA, IRAM, ISO y OSN que se describen en el Anexo IV "Calidad de Insumos y Materiales Utilizados en Sistemas de Abastecimiento de Agua".

Asimismo en las "Normas de Estudio, Criterios de Diseño y Presentación de Proyectos de Desagües Cloacales", Fundamentación de Normas, Volumen III, numeral 8.2 y 8C del COFAPyS (hoy ENOHSA) se pueden encontrar los conceptos de Cálculo Estructural de Caños y Teoría del Cálculo Estructural de Cañerías.

3.6.2. Tapada

La tapada mínima deberá ser tal que garantice una protección adecuada ante cualquier esfuerzo externo a que la tubería pueda estar sometida.

En terrenos normales se puede recomendar como valor de la tapada mínima 1,00 m. Este valor, usualmente adoptado por diversas normas y en la mayoría de los proyectos, provee una suficiente revancha ante situaciones tales como futuros cruces superiores de conductos, cables de energía y comunicaciones, caminos secundarios y su subrasante, paso de equipos con cargas axiales superiores a las de cálculo, etc., a los efectos de su equilibrio estructural.

Cuando circunstancias particulares en el trazado tales como el cruce superior de conductos existentes (desagües cloacales, pluviales, etc.) impida su cumplimiento, será necesario prever elementos de protección que aseguren que la tubería no será sometida a esfuerzos excesivos.

Si bien no existe un límite teórico para la tapada máxima, razones de orden práctico, de excavación y para los materiales usualmente utilizados, se aconseja no superar 6 m. En muchos casos la profundidad a la cual se coloca la cañería resulta de la comparación de costos entre la excavación y la provisión de accesorios (válvulas de limpieza, de aire, etc.) que deban colocarse para acompañar la topografía del terreno.

Tapada para evitar el congelamiento

Para las zonas en que la temperatura sea menor que el punto de congelamiento se debe verificar que la tapada mínima sea igual o mayor que la determinada para evitar su congelamiento.

Para ello se puede considerar la fórmula de COHEN-FIELDING:

$$X = K\sqrt{F} \quad (1)$$

Donde:

X = tapada mínima para evitar el congelamiento [m]

K = factor; $\begin{cases} K = 0,074 & \text{terreno sin nieve} \\ K = 0,046 & \text{para manto de nieve superior a 30 cm} \end{cases}$

F = índice de congelamiento [día – °C]

Se determina con la expresión:

$$F = \sum_{i=1}^n \text{número de días en el mes. (Temperatura mínima media mensual menor de 0 °C, considerada en valor absoluto),} \quad (1')$$

n = cantidad de meses con temperatura mínima media mensual menor de 0 °C.

Ejemplo

De acuerdo a las estadísticas disponibles para una cierta localidad se tienen los siguientes valores:

Mes	Cantidad de días/mes	Temperatura mínima media mensual menor de 0 °C en valor absoluto	Índice de congelamiento mensual
Mayo	31	1,8	55,80
Junio	30	3,3	99,00
Julio	31	4,3	133,30
Agosto	31	3,2	99,20
Setiembre	30	0,2	6,00
Índice de congelamiento =			393,30

La zona de la tubería corresponde a terrenos sin nieve.

$$X = 0,074 \sqrt{393,30}$$

$$X = 1,47 \text{ m}$$

3.7. COLOCACIÓN SOBRE APOYOS TIPO SILLETA

Un tubo que se soporta por apoyos o soportes tipo silleta actúa como un puente autoportante.

En los primeros diseños la luz libre se adoptaba empíricamente y fue aumentando en forma progresiva conforme la experiencia confirmaba que dichos aumentos eran seguros.

Con mayores requerimientos de luces a salvar y aumento del diámetros se aplicó la teoría común de la flexión como establece la resistencia de materiales.

La observación en ciertos casos de la presencia de deformaciones permanentes por haberse superado los valores de la tensión de fluencia, permitió constatar, por medio de la teoría de la elasticidad, que para la condición de carga con tubo parcialmente lleno, generalmente no se mantiene la sección circular entre soportes, no se pueden aplicar las fórmulas comunes de la flexión y el esfuerzo máximo es superior a lo calculado, haciéndose máximo dicho esfuerzo para la condición de tubo medio lleno.

Para la selección de la luz el tubo debe ser verificado por flecha máxima y a los esfuerzos locales en la silleta tanto longitudinales como tangenciales, tal cual está descrito en, Manual M11 de la AWWA.

En la **Figura 10** se observa un diseño típico de un soporte tipo silleta.

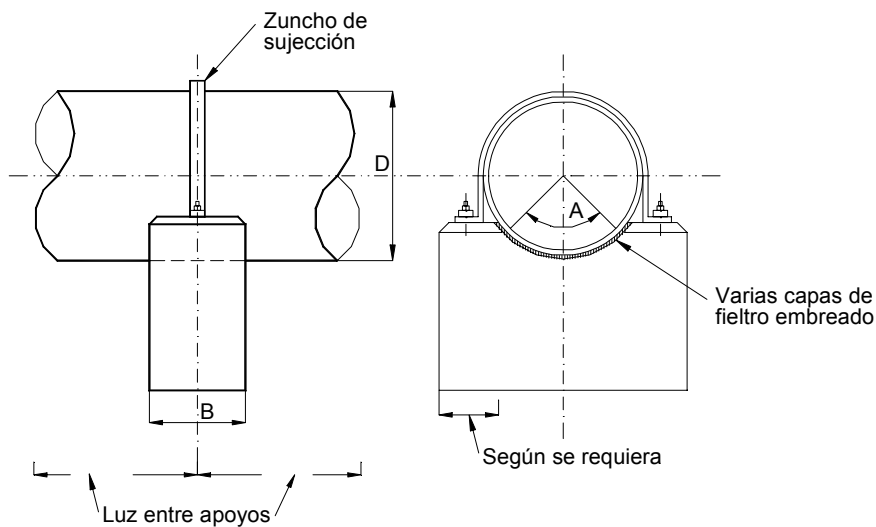


Figura 10. Soporte de sileta

3.8. ANCLAJES

Un chorro líquido desviado por una superficie sólida cualquiera ejerce un empuje dinámico sobre esta. El proceso tiene cierta analogía con el choque de dos sólidos, aunque se distingue del mismo en la continuidad que caracteriza al proceso hidráulico.

No es difícil comprender, teniendo en cuenta el Tercer Principio de la Dinámica, que este empuje (F) es igual y contrario a la acción (R) que la superficie ejerce sobre la vena líquida, siendo esta última la acción necesaria para producir el cambio de dirección y aún de velocidad del fluido.

El problema se resuelve mediante el teorema de la cantidad de movimiento o teorema del momentum, mejor denominado como "ecuaciones integrales del equilibrio dinámico", que se aplica no sólo a una partícula sino al conjunto que forma una porción cualquiera y se cumplen aun en casos que no pueden estudiarse con las ecuaciones diferenciales (o locales) del movimiento.

La ecuación integral del equilibrio dinámico, comúnmente denominada acción dinámica, se puede expresar en notación vectorial por:

$$\vec{G} + \vec{P} + \vec{L} + \vec{M}_1 - \vec{M}_2 = 0 \quad (2)$$

donde:

G = fuerzas de masa, en nuestro caso el peso

P = fuerza de presión

L = fuerza debida a la inercia local

M = momentum

La fuerza debida a la inercia local L es la resultante que corresponde a la derivada local de la velocidad \vec{U} respecto del tiempo t que se expresa por:

$$L = -\rho \iiint_{\tau} \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} d\tau$$

donde ρ es la masa específica y τ volumen.

L tiene valor sólo para los movimientos impermanentes donde se cumple que:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} \neq 0$$

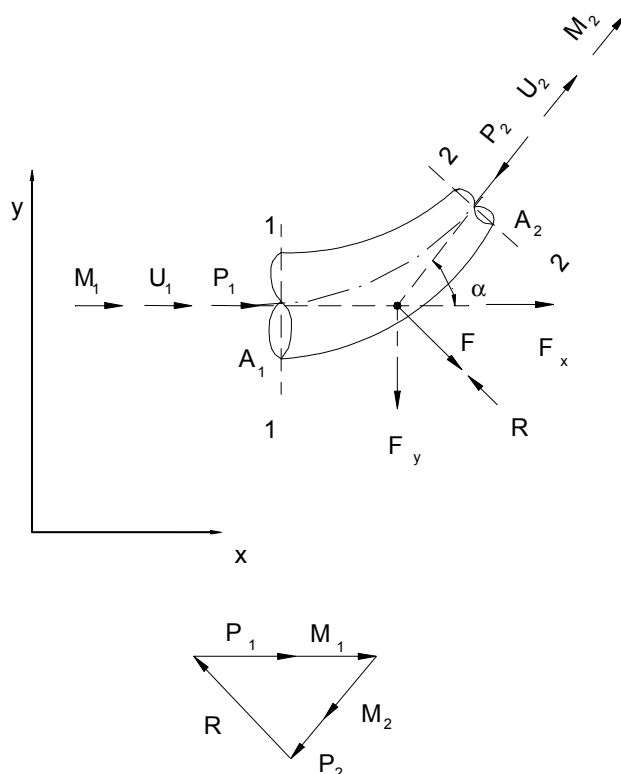


Figura 11. Fuerza debida a la acción dinámica

Para el caso de movimiento permanente se tiene:

$$L = 0$$

Suponiendo un sistema de ejes x, y, z como el de la **Figura 11**, siendo el eje z vertical el peso no tiene proyección sobre los ejes $X - Y$ ubicados en el plano horizontal:

$$G = 0$$

Como se observa en la **Figura 11** se puede entonces expresar:

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{M}_1 - \vec{M}_2 + \vec{R} = 0 \quad (3)$$

siendo:

$$P_1 = A_1 p_1 \quad (4)$$

$$P_2 = A_2 p_2 \quad (5)$$

$$M_1 = A_1 U_1^2 \gamma / g \quad (6)$$

$$M_2 = A_2 U_2^2 \gamma / g \quad (7)$$

Las proyecciones sobre los ejes cartesianos ortogonales x – y son:

$$P_{1x} = A_1 p_1 \quad (8)$$

$$P_{1y} = A_1 p_1 \text{ sen } 0 = 0 \quad (9)$$

$$P_{2x} = -A_2 p_2 \cos \alpha \quad (10)$$

$$P_{2y} = -A_2 p_2 \text{ sen } \alpha \quad (11)$$

$$M_{1x} = A_1 U_1^2 \gamma / g \quad (12)$$

$$M_{1y} = A_1 U_1^2 \gamma / g \text{ sen } 0 = 0 \quad (13)$$

$$M_{2x} = A_2 U_2^2 \gamma / g \cos \alpha \quad (14)$$

$$M_{2y} = A_2 U_2^2 \gamma / g \text{ sen } \alpha \quad (15)$$

Como se ha dicho, por el Principio de Acción y Reacción:

$$\vec{R} = -\vec{F} \quad (16)$$

$$\vec{F} = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{M}_1 - \vec{M}_2 \quad (17)$$

Considerando el signo de las proyecciones en los ejes se tiene:

$$F_x = A_1 \left(p_1 + \frac{\gamma}{g} U_1^2 \right) - \cos \alpha A_2 \left(p_2 + \frac{\gamma}{g} U_2^2 \right) \quad (18)$$

$$F_y = -A_2 \text{ sen } \alpha \left(p_2 + \frac{\gamma}{g} U_2^2 \right) \quad (19)$$

Aplicando el teorema de Bernoulli entre la sección 1-1 y la 2-2 con pérdida de energía nula e igual cota topográfica de entrada que de salida:

$$p_2 = p_1 + \frac{\gamma}{2g} (U_1^2 - U_2^2) \quad (20)$$

Adoptando la siguiente relación:

$$\frac{D_1}{D_2} = k \quad (21)$$

Resulta:

$$\frac{A_1}{A_2} = k^2 \quad (22)$$

y:

$$U_2 = \frac{Q}{A_1} \quad k^2 = U_1 k^2 \quad (23)$$

Se tiene entonces:

$$p_2 = p_1 + \frac{\gamma}{2g} U_1^2 (1 - k^4) \quad (24)$$

por lo que finalmente se obtiene:

$$F_x = \frac{p_1 \pi D_1^2}{4} \left(1 - \frac{\cos \alpha}{k^2} \right) + \frac{\gamma}{g} \frac{\pi D_1^2}{4} U_1^2 \left[1 - \cos \alpha \left(\frac{1 - k^4}{2k^2} \right) - \cos \alpha k^2 \right] \quad (25)$$

$$F_y = \frac{-\pi D_1^2}{4k^2} \sin \alpha \left\{ p_1 + \frac{\gamma U_1^2}{g} \left[\left(\frac{1 - k^4}{2} \right) + k^4 \right] \right\} \quad (26)$$

donde:

p_1 = presión en la sección de entrada (kg/m²)

D_1 = diámetro de entrada (m)

D_2 = diámetro de salida (m)

U_1 = velocidad media de ingreso (m/s)

π = 3,14

k = relación diámetro de entrada D_1 a diámetro de salida D_2

γ = peso específico del agua (1000 kg/m^3)

g = aceleración de la gravedad $g = 9,80 \text{ (m/s}^2\text{)}$

α = ángulo de desvío del conducto

F = empuje (kg.)

R = acción (kg.)

La **Tabla 2** muestra los valores normalmente usados en una primera aproximación para las cargas verticales en el fondo de las zanjas en función de las características del suelo.

Las cargas admisibles en sentido horizontal, esto es en la pared de la zanja, habitualmente se fijan en la mitad de las adoptadas en sentido vertical.

Material	Carga en Kg / cm^2
Roca, de acuerdo a su naturaleza y estado	20
Roca alterada manteniendo su estructura original, requiriendo martillo neumático o explosivos para el desmonte	10
Roca alterada, necesitándose solo pico para la excavación	3
Pedregullo, grava o arena gruesa, necesitándose pico para la excavación	4
Arcilla rígida que no puede moldearse con la mano	4
Arcilla dura difícilmente moldeable a mano	3
Arena gruesa compacta	2
Arena suelta o arcilla blanda excavada a pala	menos de 1

Fuente: Tubulações para agua - W. G. Wiendl

Tabla 2. Valores de carga admisibles en el fondo de las zanjas

Cálculos más precisos deberán considerar la cohesión y la fricción del suelo.

3.8.1. Vinculación Interna y Externa de los Nudos

Se entiende por nudo el conjunto de piezas especiales y válvulas que materializan todo cambio de dirección, sección y/o derivación. Los elementos que lo componen pueden estar rígidamente vinculados entre sí (uniones bridadas, soldadas, etc.) y se comportan como un todo, o vinculados por juntas no rigidizantes (aros de goma, etc.) que les permite comportarse de manera individual.

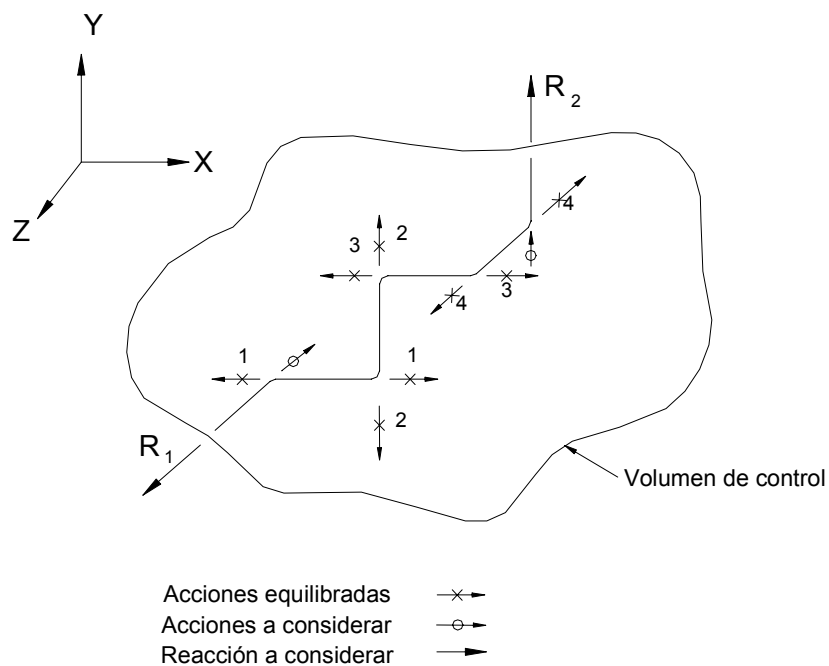


Figura 12. Sistema rígido

Para los sistemas rígidos las acciones dinámicas de cada componente se suman vectorialmente dando lugar en el caso más general a una resultante y un par de translación, es decir se debe considerar sólo lo externo al volumen de control, aplicando las ecuaciones (25) y (26).

Igual concepto se aplica para múltiples cambios espaciales definidos por nudos (Figura 12).

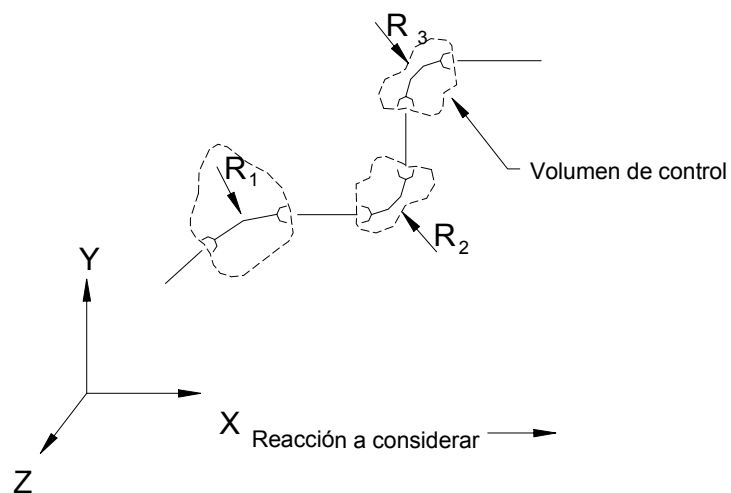


Figura 13. Sistema no rígido

Caso contrario son las uniones no rígidas en la que cada elemento se debe considerar individualmente para evitar el colapso del nudo por las acciones dinámicas (**Figura 13**).

3.9. CRUCE DE INSTALACIONES EXISTENTES

3.9.1. Cruce Superior de Cursos Naturales de Agua, Canales o Carreteras

Fundamentalmente se pueden identificar cuatro tipos de diseños como se indica en la **Figura 14**.

- Tipo I : Recomendado para cruces de canales u otros lugares bajos, empleando un solo tramo de tubo.
- Tipo II : Para cruces de carreteras, canales o ríos donde la longitud a salvar hace necesario dos columnas intermedias de soporte. Luces habituales: 20 a 40 m.
- Tipo III: Difiere del anterior en que los tramos extremos son 0,80 de la luz central, pudiéndose emplear para cruces más largos que el Tipo II. Luces habituales: 30 a 80 m.
- Tipo IV: Diseño para una serie de claros libres relativamente grandes.

Cuando existen estructuras, como puentes ferroviarios o carreteras, que atraviesen el obstáculo a salvar, pueden utilizarse como sostén de la tubería. Para ello es necesario verificar que no se ponga en peligro la estabilidad de la estructura y diseñar los apoyos de la tubería previendo las necesarias juntas de expansión para absorber movimientos y dilataciones diferenciales.

3.9.2. Cruce Inferior de Vías Férreas, Rutas Nacionales o Provinciales

Dada la importancia que un cruce tiene en la estabilidad de dichas obras y sin perjuicio de lo establecido por las autoridades competentes, deben contar con un caño de prerrevestimiento y un caño camisa que proteja a la conducción propiamente dicha como se describe a continuación.

La camisa deberá iniciarse en una cámara y tener pendiente hacia una cámara cuya finalidad es la de poder observar cualquier pérdida de importancia y drenar las eventuales pérdidas normales de las juntas.

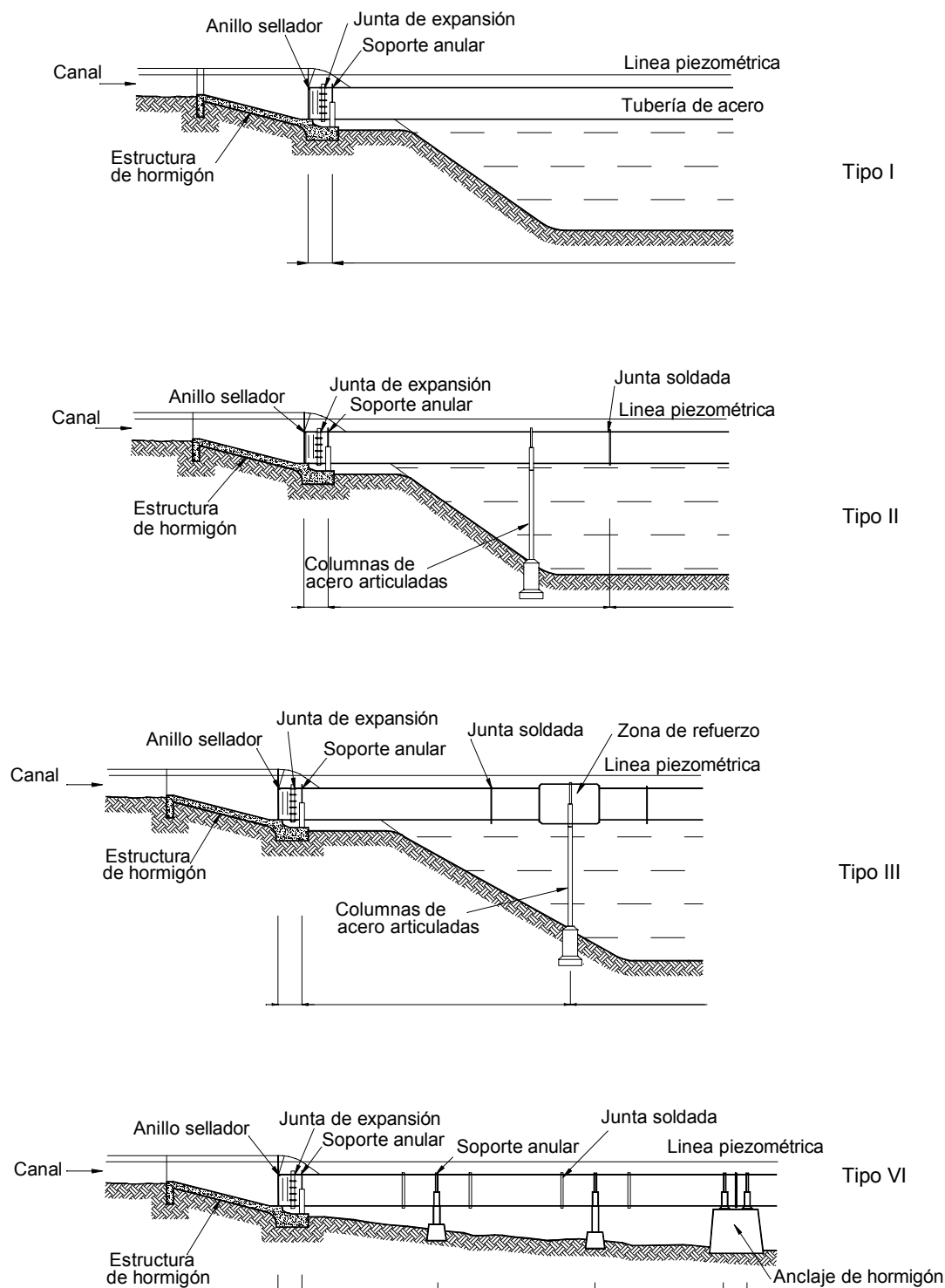


Figura 14. Cruce superior de cursos de agua, canales o carreteras

3.9.2.1. Cruces de Vías Férreas

El ancho de la zona de vías se define como la suma del ancho de la zona de vías propiamente dicho más las cunetas de drenaje y una revancha de seguridad en ambos extremos del orden de 1 metro.

Los cruces, como se observa en la **Figura 15** y la **Figura 16**, tienen mayores requerimientos en función del diámetro de la conducción comprendiendo:

- Grupo I $DN \leq 400 \text{ mm}$
- Grupo II $500 \leq DN \leq 1200 \text{ mm}$
- Grupo III $DN > 1200 \text{ mm}$

Cruces del tipo I

Sus detalles se observan en la **Figura 15**.

La excavación se debe realizar con máquina tunelera que permita hincar simultáneamente con el avance a la cañería de acero que oficia de pre-revestimiento. Las dimensiones y espesores de este pre-revestimiento de acero deben ser los indicados en la **Tabla 3** y los distintos tramos de caño que la componen deben ser soldados en todo el perímetro al precedente.

Diámetro nominal del cruce	Caño conductor				Caño camisa			Caño de pre-revestimiento		
	Material	Diámetro interior	Diámetro exterior	Espesor	Material	Diámetro interior	Espesor	Material	Diámetro exterior	Espesor
D ⁻ (mm)		Di (mm)	De (mm)	e (mm)		Dc (mm)	ec (mm)		Dp (mm)	ep (mm)
150	P.V.C.	-	160	7,7	P.R.F.V. 16 Bar	300	4,75	Acero	406,4	4,76
200	Clase	-	225	10,8		350	5,4		457,2	5,56
250	10	-	250	11,9		400	6,1		508,0	6,35
300		-	355	15,0		450	6,8		558,8	3,35
400	P.R.F.V. 10 Bar	400	-	5,5		500	7,5		609,6	7,14

Tabla 3. Dimensiones de los caños

La camisa de PRFV se debe colocar de modo que quede centrada dentro del pre-revestimiento; para ello debe llevar adheridos elementos que permitan su centrado y deslizamiento. Puede estar constituida por caños de PRFV de clase 16 bar, del espesor y diámetros indicados en la **Tabla 3** y longitud no inferior a los 12 m.

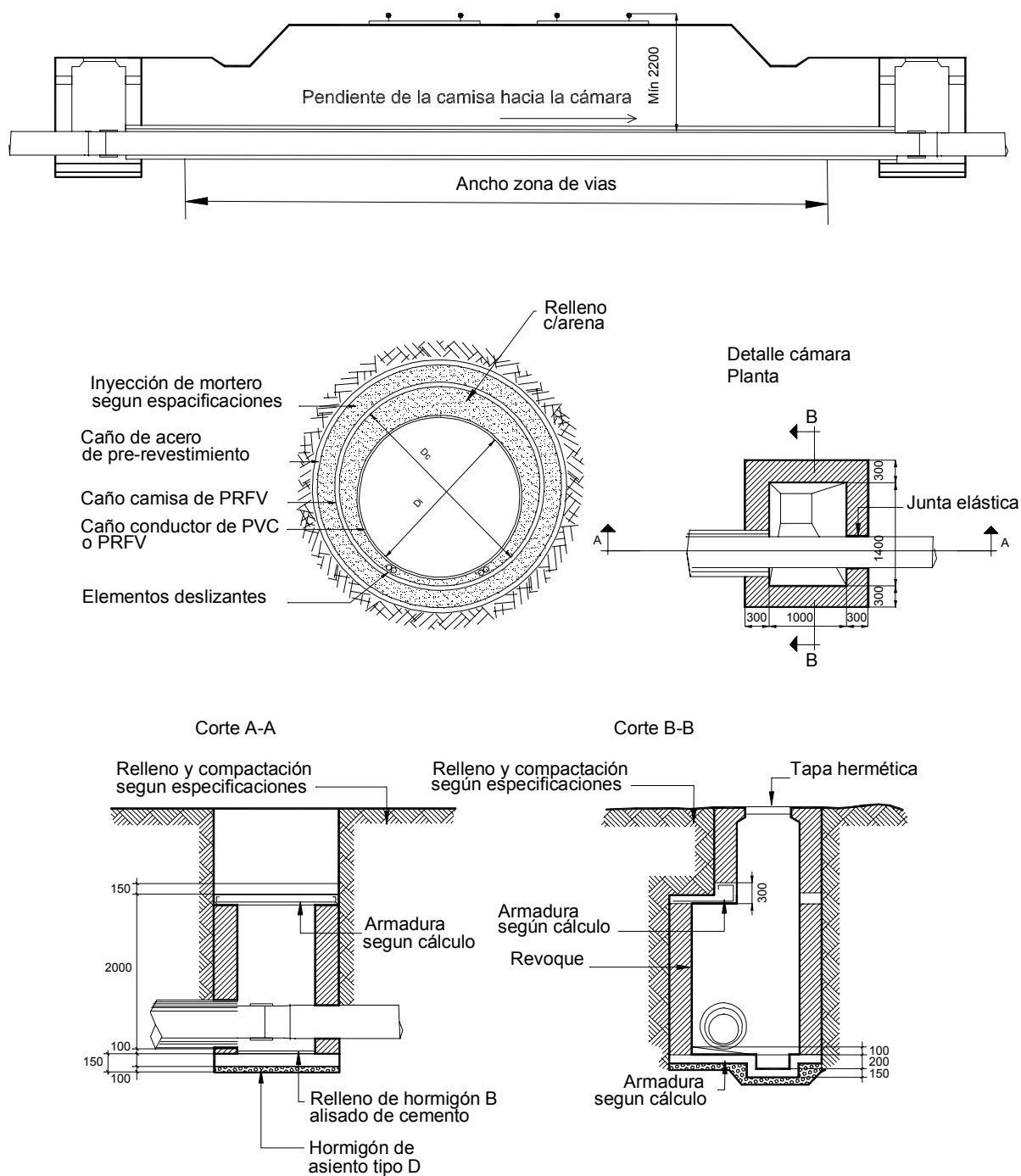


Figura 15. Cruce tipo Grupo I

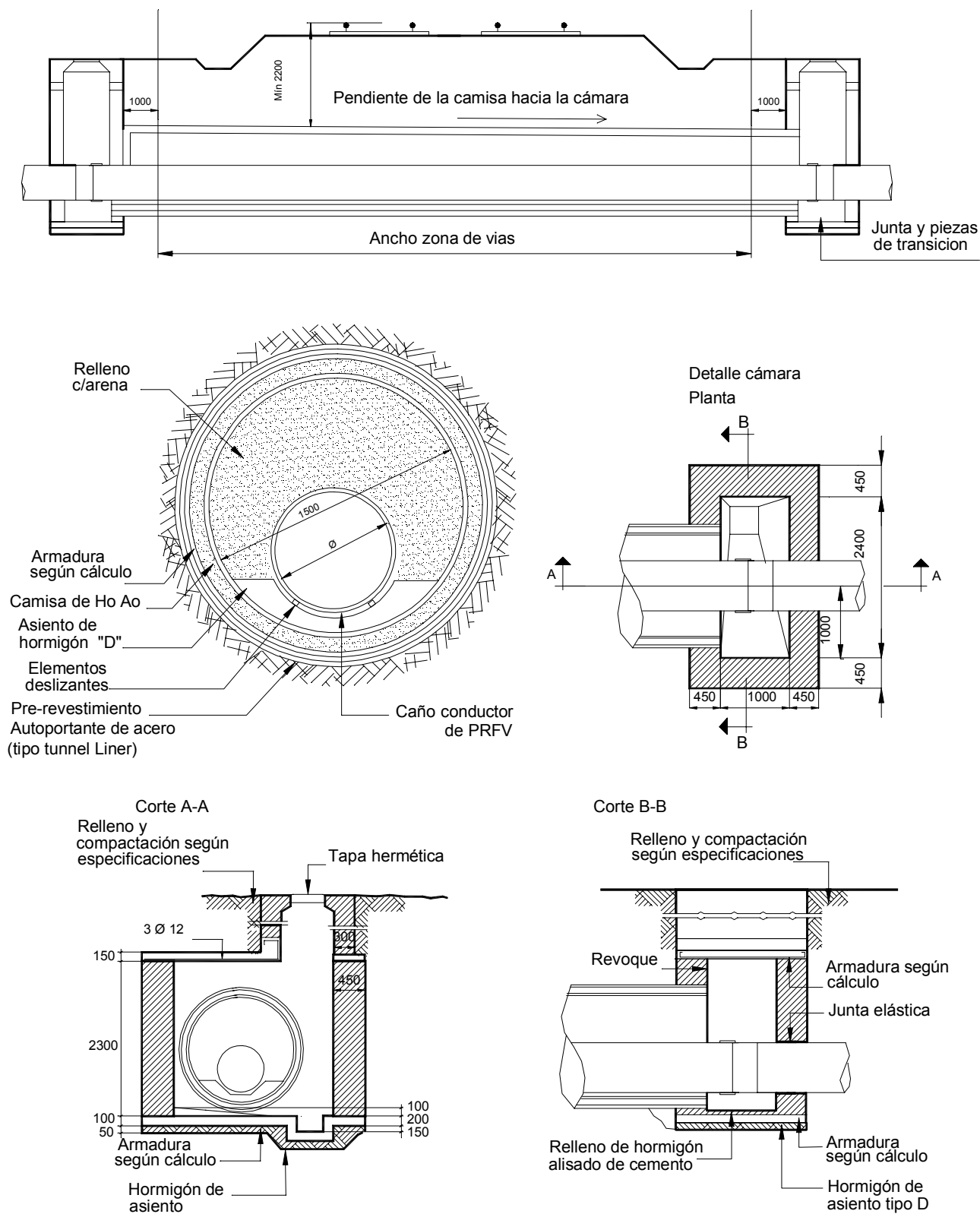


Figura 16. Cruce tipo Grupo II y III

El espacio pre-revestimiento-camisa debe inyectarse con mortero de cemento a presión para evitar la presencia de oquedades.

La cañería conductora debe llevar adheridos elementos que permitan su fácil deslizamiento dentro de la camisa.

El espacio libre entre la cañería conductora y la camisa es conveniente que se rellene con arena. Este relleno tiene como finalidad absorber las cargas dinámicas que por posibles deformaciones o colapso de la protección (pre-revestimiento – caño camisa) y es de vital importancia cuando la cañería conductora pueda sufrir esfuerzos por efectos de vacío interior.

Cruces del tipo II

Ver **Figura 16**.

La excavación se debe realizar avanzando en túnel por módulos, de forma tal que la longitud excavada y sin pre-revestimiento no exceda en ningún momento los 0,50 m. La colocación del pre-revestimiento autoportante de acero se debe realizar por anillos inmediatamente después de excavado cada módulo.

El pre-revestimiento de acero debe ser calculado para soportar durante la construcción tanto la carga de suelo como la del equipo ferroviario.

La cañería conductora se debe ejecutar con caños de PRFV, de clase 10 bar.

Previo a la colocación de la cañería conductora, se debe ejecutar un asiento de hormigón.

La cañería conductora debe llevar adheridos elementos que permitan su fácil deslizamiento sobre el asiento.

Cruces del tipo III

Corresponden a los cruces de cañerías de diámetro superior a los 1200 mm.

Se realizan de acuerdo a las dimensiones y materiales indicados en la **Figura 16**, adaptando las dimensiones a cada caso particular.

3.9.2.2. Cruces de Rutas Nacionales o Provinciales

Los cruces se debe efectuar en línea recta y siempre que sea posible en forma perpendicular al eje del camino. La cañería se debe colocar a una profundidad mínima igual a 1 m por debajo del fondo de cuneta o conductos pluviales o 2 m por debajo de la superficie del pavimento, la que resulte mayor.

Las cañerías de los cruces se debe proteger bajo el pavimento y taludes más 1 m a cada lado, mediante un caño camisa de acero (para cañerías de 400 mm de diámetro y menores) o revestimiento autoportante de acero tipo “tunnel liner” de 1,5 m de diámetro interior (para cañerías de diámetro superior a 400 mm). En el resto del ancho de la zona de camino, puede reemplazarse el encamisado por una protección de losetas de hormigón señalizada mediante malla de material plástico.

Los caños a instalar en los cruces deben cumplir con lo indicado en la **Tabla 4**.

		Ø Nominal del cruce (en mm)					
		100	150	200	250	300	400
Caños Conductor	Material	P.V.C clase 10					PRFV 10 bar
	Ø Int. mm	---	---	---	---	---	400
	Ø Ext. mm	110	160	225	250	355	---
	Espesor mm	5,5	7,7	10,8	11,9	15,0	5,5
Camisa	Material	Acero					
	Ø Ext mm	304,8	355,6	406,4	457,2	508,0	558,8
	Espesor	4,76	4,76	4,76	5,56	6,35	6,35

Tabla 4. Dimensiones de caños conductores y caños camisa

Para los cruces de diámetro superior a 400 mm, la cañería conductora debe estar constituida por caños de PRFV de clase 10 bar y de largo mínimo igual a 12 m.

3.10. PIEZAS ESPECIALES

Se entiende por piezas especiales todos los elementos constituyentes de la cañería que no son caños rectos o válvulas.

Estos incluyen: juntas, juntas de transición, curvas, tes, reducciones, piezas terminales, uniones, piezas de montaje, etc., sean de fabricación estándar o de diseño y fabricación especial.

Sus dimensiones, clase, protecciones, requisitos de prueba, etc., están especificados en las normas nacionales (IRAM) o internacionales correspondientes, tales como AFNOR, ANSI, ASME, ASTM, AWWA, ISO.

3.10.1. Juntas

Vinculan dos tuberías de igual material.

Sus tipos fundamentales son:

- Junta elástica (**Figura 17**), con un extremo espiga y el otro enchufe. La estanqueidad se logra por compresión radial de un anillo de elastómero. La presión de contacto entre el anillo y el tubo aumenta cuando crece la presión interior, tratando de reducir las pérdidas.

Permite desviaciones angulares y desplazamientos axiales.

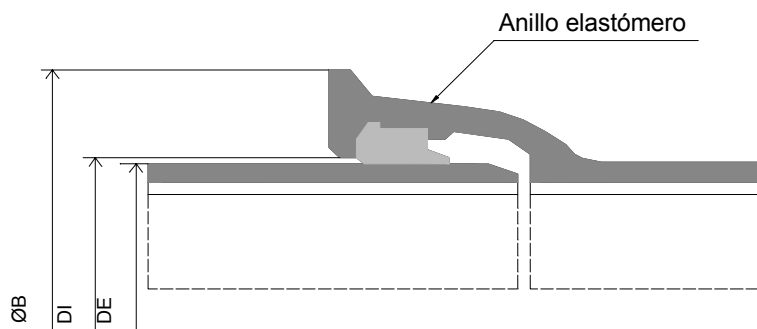


Figura 17. Junta elástica

- Junta acerrojada (**Figura 18**), con un extremo espiga y el otro enchufe. Están dotadas además de un cordón (de soldadura en las tuberías metálicas) en la espiga, de un anillo metálico y una contrabrida apretada sobre el enchufe mediante pernos.

La estanqueidad se logra por compresión radial de un anillo de elastómero en el cual la presión de contacto entre el anillo y el tubo aumenta cuando crece la presión interior para reducir las pérdidas.

Admiten desviaciones angulares pero no desplazamientos axiales.

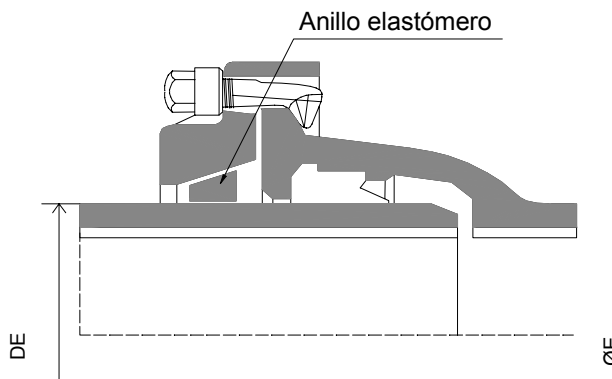


Figura 18. Junta acerrojada

- Junta mecánica (**Figura 19**), con un extremo espiga y el otro enchufe. La estanqueidad se logra por un anillo de elastómero que se comprime radialmente a través de una contrabrida y pernos.

Indicadas para presiones de trabajo elevadas.

Admiten desviaciones angulares y desplazamientos axiales.

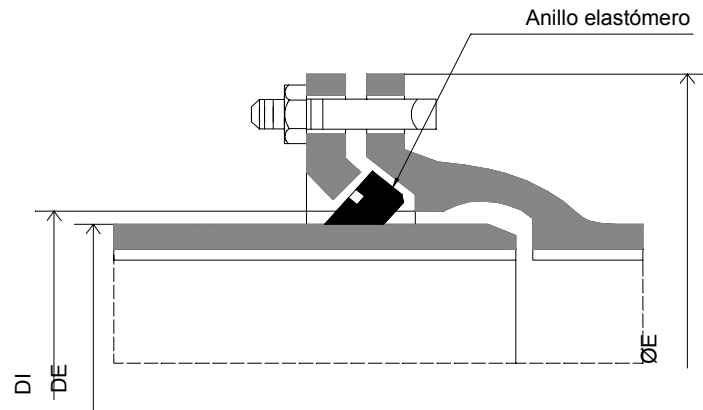


Figura 19. Junta mecánica

- Junta bridada (**Figura 20**), la estanqueidad se logra por la compresión axial de una arandela plana cuando se aprietan las dos bridas con pernos.

Permiten el montaje y desmontaje en línea.

No admiten desviaciones angulares ni axiales.

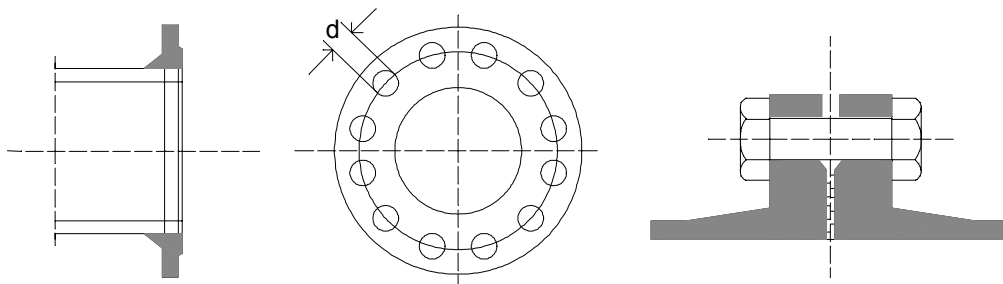


Figura 20. Junta bridada

- Junta roscada (**Figura 21**), un extremo con rosca macho, el otro con rosca hembra. La estanqueidad se logra por un mastic, filástica (cáñamo peinado) o cinta de teflón.

No admiten desviaciones angulares ni axiales.

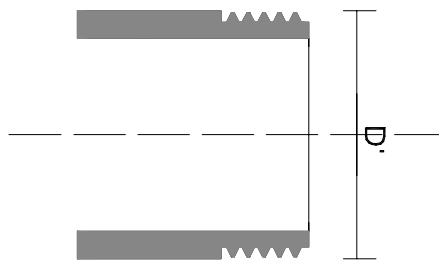


Figura 21. Junta roscada macho

- Junta soldada (**Figura 22**), la unión de ambos extremos se realiza por soldadura con aporte o no de material.

Para determinados materiales tal como el polietileno (PE) puede optarse por la termofusión o la electrofusión. Esta última implica un sistema calefactor (resistencia eléctrica) a uso perdido.

No admiten desviaciones angulares ni axiales.

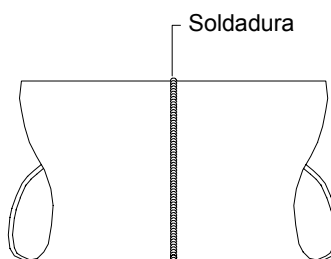


Figura 22. Junta soldada

3.10.2. Juntas de Transición

Comprenden las piezas especiales que se utilizan para vincular dos tuberías de distinto material. Ver **Figura 23**.

Las juntas se materializan por alguna de las indicadas en el numeral anterior.

Las combinaciones más usuales incluyen A con F.D., H° A°, P.E.A.D., P.R.F.V. y P.V.C.; A C con F.D.

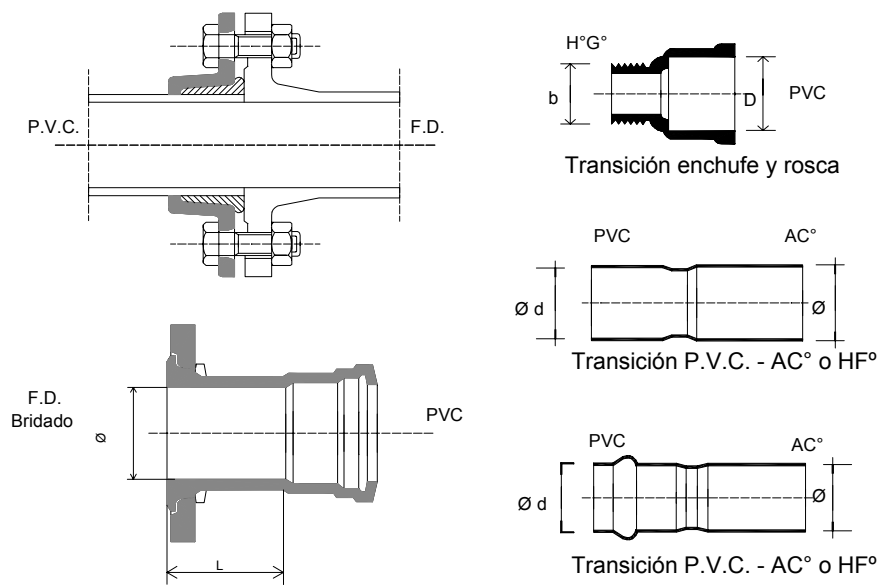


Figura 23. Juntas de transición

3.10.3. Curvas y Codos

Figura 24. Se utilizan para lograr el giro de un tramo de tuberías respecto de otro.

Las desviaciones angulares estándar son 90°, 45°, 22° 30' y 11° 15'.

En acero y P.E.A.D., por diseño y fabricación especial se logran valores fuera de estándar.

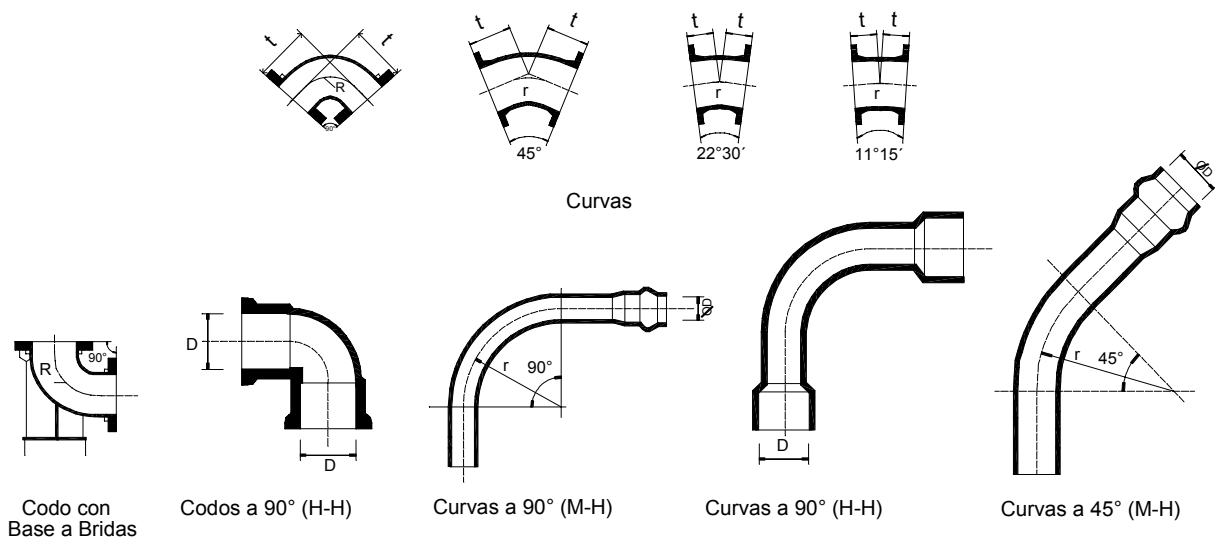


Figura 24. Curvas y codos

3.10.4. Tes

Materializan un desvío de la tubería principal. (**Figura 25**).

Se denominan normales cuando la derivación es de igual diámetro que la tubería principal, caso contrario de reducción.

Los ángulos de desvíos normales son 90° y 45°.

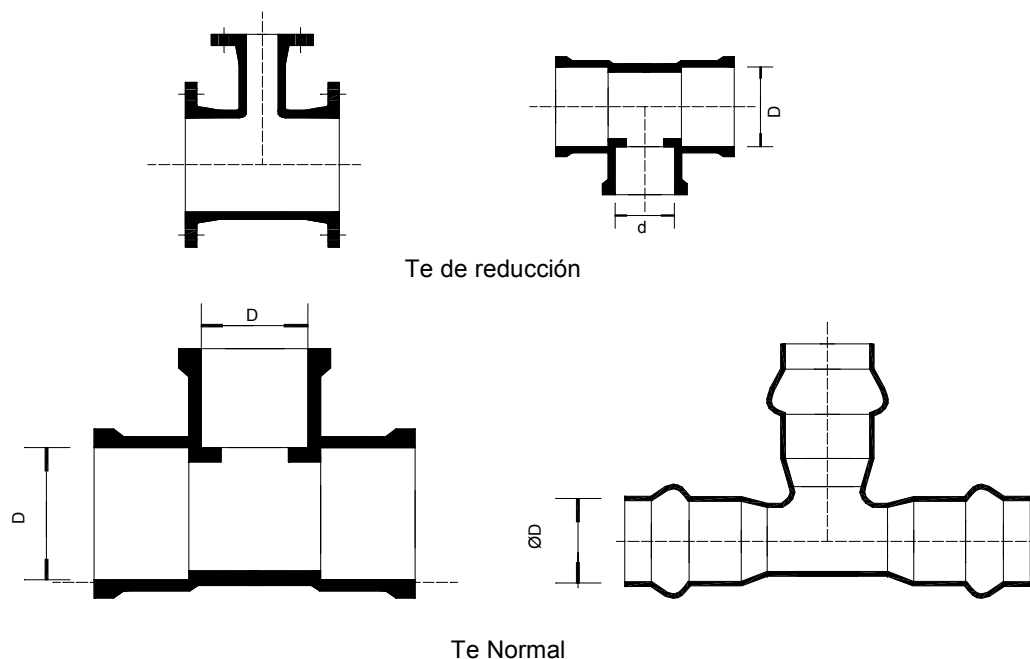


Figura 25. Tes

3.10.5. Reducciones

Figura 26. Se utilizan para vincular dos diámetros diferentes en las tuberías.

Pueden ser de eje céntrico o excéntrico.

Esta última permite mantener un mismo valor de la cota de intradós, evitando la acumulación de burbujas de aire.

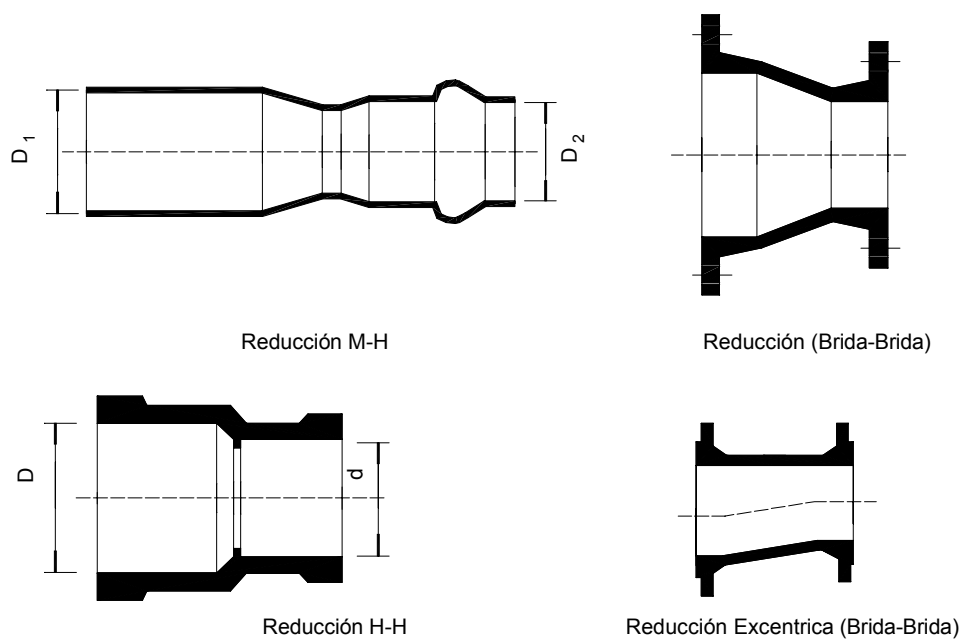


Figura 26. Reducciones

3.10.6. Piezas Terminales

Permiten cerrar temporalmente un extremo de la tubería para posteriormente continuar con su prolongación. **Figura 27.**

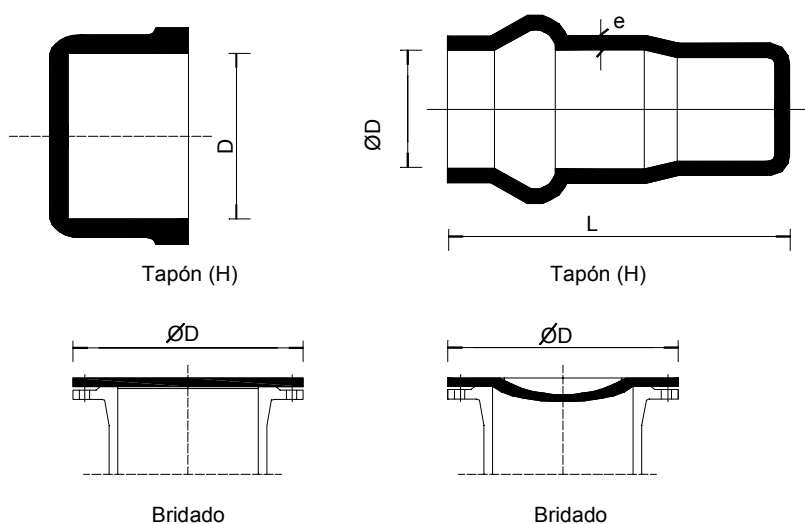


Figura 27. Piezas terminales (tapones)

3.10.7. Uniones

Comprenden las piezas especiales que mediante un tipo de junta (soldada-soldada, enchufe-enchufe, espiga-espiga, etc.) o dos tipos de juntas (espiga-enchufe, soldada-enchufe, soldada-espiga, etc.) vinculan un mismo material de la tubería. Ver **Figura 28**.

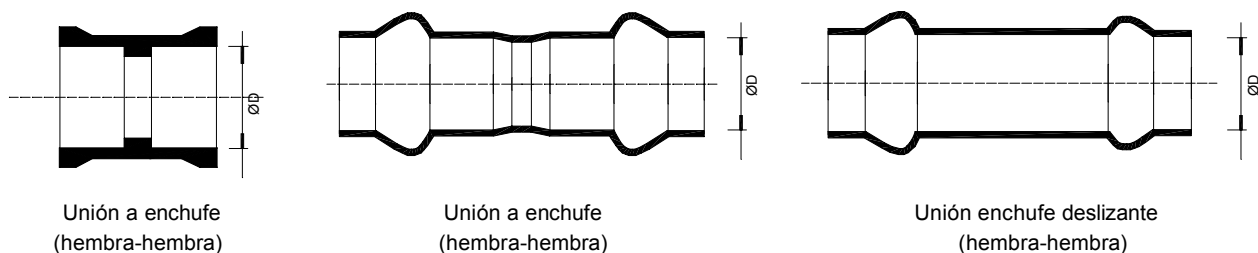


Figura 28. Uniones

3.10.8. Piezas de Montaje e Intervención

Figura 29. Su objetivo es permitir el montaje de un circuito cerrado, su posterior desmontaje para mantenimiento o efectuar alguna intervención en instalaciones.

Comprenden el tipo “Gibault” clásico (igual diámetro exterior en ambas tuberías) o el tipo de gran tolerancia (distintos diámetros exteriores) para unión espiga – espiga; los adaptadores a brida (hierro dúctil, acero, etc.) a espiga (P.V.C., acero o hierro dúctil) y las a brida – espiga con autoanclaje.

Permiten desviaciones angulares y desplazamientos axiales.

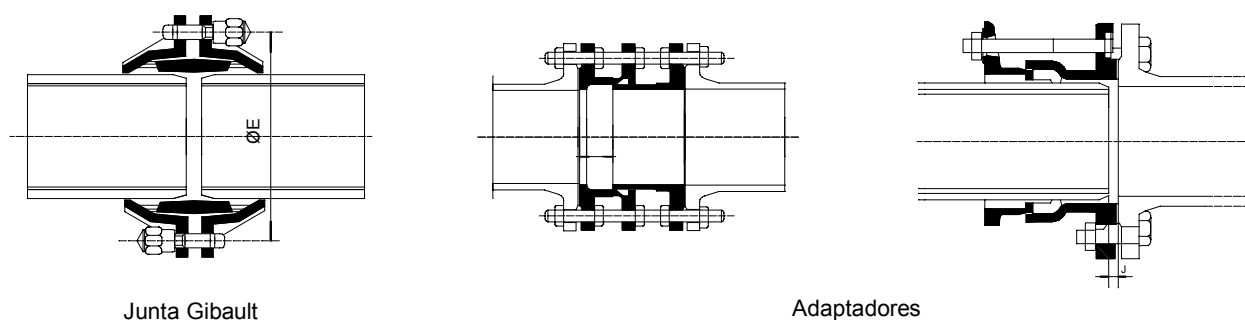


Figura 29. Piezas de montaje e intervención

Las piezas de montaje e intervención mencionadas corresponden a los tipos usuales que se utilizan en la República Argentina. En Europa, los Estados Unidos y Japón los fabricantes proveen otros tipos que si bien sus diseños pueden ofrecer un gran grado de flexibilidad para efectuar montajes o intervención, generalmente y por razones del tamaño

del mercado argentino y/o importación, no están disponibles corrientemente en la plaza local, lo que dificulta su empleo y la reposición de las mismas en depósito por lo que no es recomendable su selección.

3.11. VÁLVULAS DE CIERRE

Son elementos que se colocan en una instalación y cuya función es abrir u obturar alternativamente el pase de fluido.

Entre los variados tipos de válvulas de cierre existentes, para las conducciones de agua los principales tipos utilizados son:

- Esclusas de flujo libre.
- Mariposas de eje céntrico o excéntrico.

3.11.1. Válvulas Esclusas

Funcionan mediante un diafragma que al bajar interrumpe la circulación de líquido. Constan de un cuerpo exterior que generalmente se une a las cañerías con bridas, aunque también existen otros tipos de uniones. Ver **Figura 30**.

Dentro de este cuerpo puede moverse el obturador, de tipo deslizante, direccionado por guías. En un extremo del cuerpo una pieza llamada tapa o sombrero permite cuando se desmonta, cambiar el obturador.

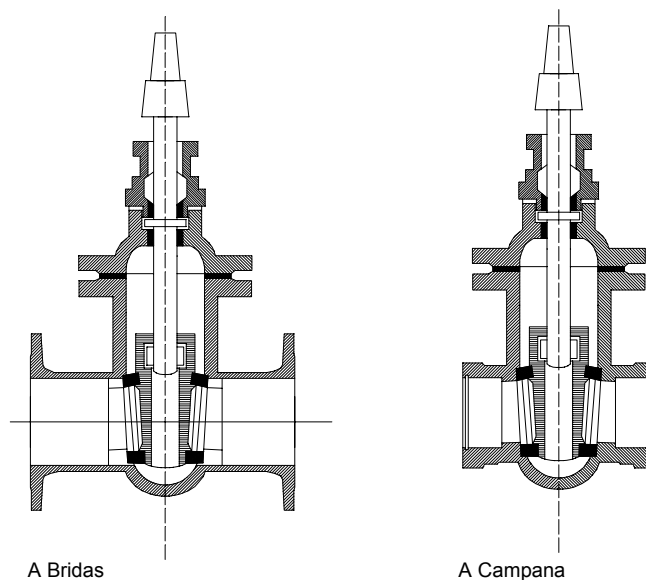


Figura 30. Válvulas esclusas

El movimiento del diafragma obturador, necesario para las maniobras se consigue porque atornillado a él existe un vástago roscado que se gira desde el exterior con un volante o

tuerca donde se introduce una pieza que permite su manipulación para girarlo desde la superficie del terreno. El vástago puede girar, pero está impedido de deslizarse pues hay una fijación sobre la tapa que no lo permite.

Para aumentar la condición estanca de la válvula en el diafragma existe un anillo impermeabilizante de material elastómero.

Puede existir también otra pieza atornillada fijada a la parte superior del cuerpo, llamada prensaestopa.

Los materiales con los cuales se hacen las distintas partes móviles y fijas de las válvulas deben ser de los tipos y características que fijen las normas vigentes. Los elementos fijos y no sometidos a fricción son generalmente de hierro fundido dúctil. Los tornillos de unión deben ser galvanizados, cadmiados o de acero inoxidable. Las piezas móviles o sometidas a fricción son de distintos materiales tales como el bronce, acero inoxidable con cromo, o con cromo y níquel.

Según sea el sentido del fileteado del vástago, el cierre se consigue girando a la derecha o a la izquierda.

La distancia entre bridas o uniones debe ser tal que permita intercambiar válvulas averiadas.

La protección del cuerpo contra la corrosión se consigue pintándolo con pinturas de tipo epoxi o de poliuretano.

Se instalan directamente en el terreno. Ver **Figura 31**. Deben realizarse en fábrica tanto pruebas hidráulicas de estanqueidad como de esfuerzos mecánicos de acuerdo a las respectivas normas.

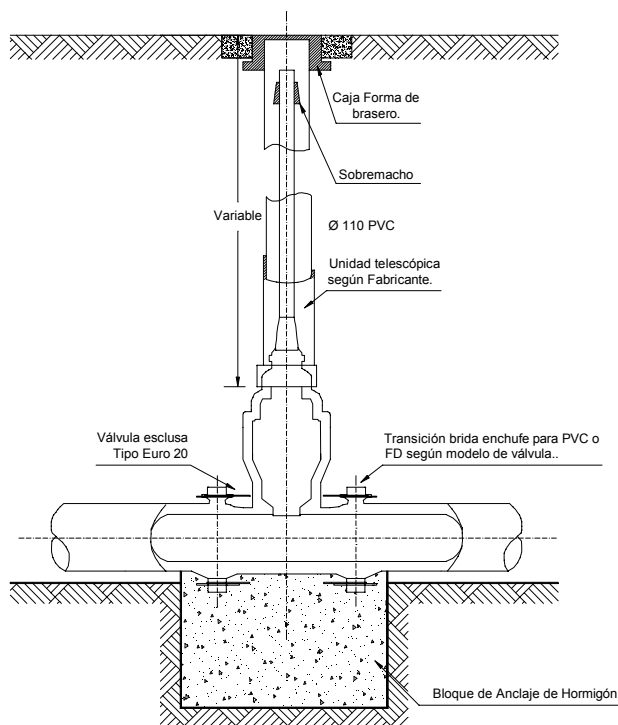


Figura 31. Instalaciones de válvulas esclusas

3.11.2. *Válvula Mariposa*

Funciona mediante un diafragma que gira alrededor de un eje y permite o detiene la circulación de agua. (**Figura 32**).

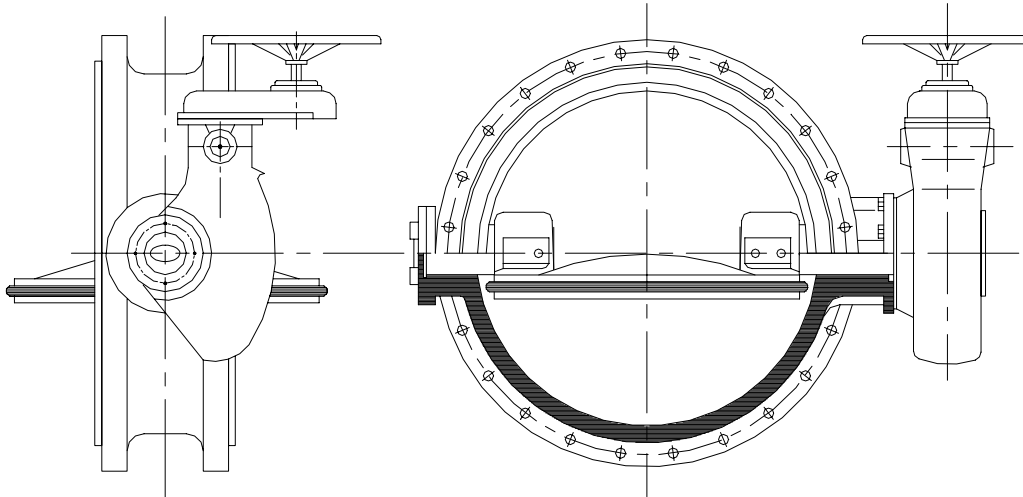


Figura 32. Válvula mariposa

Se colocan entre bridas y tienen un aro de elastómero que asegura la estanqueidad.

El accionamiento puede ser manual, neumático o eléctrico. Las válvulas deben ubicarse en cámaras. Ver **Figura 33**.

Las válvulas mariposas son menos voluminosas y de menor peso, lo que permite alojarlas en cámaras de menores dimensiones a las de las válvulas esclusas. Se aconseja su uso para diámetros superiores a los 300 mm, en razón de su costo en relación a las de tipo esclusa.

En posiciones intermedias de apertura, el diafragma está sometido a una presión hidráulica en toda su superficie, que genera momentos respecto del eje de movimientos, los que se contrarrestan en una buena proporción. El par de giro es relativamente moderado, motivo adicional para recomendarlas en grandes diámetros, ya que facilitan la regulación de caudales.

En las válvulas importantes puede acoplarse un motor eléctrico para su accionamiento. Deben cuidarse los golpes de ariete, por lo cual se recomienda un tiempo mínimo de maniobra no menor a 60 segundos.

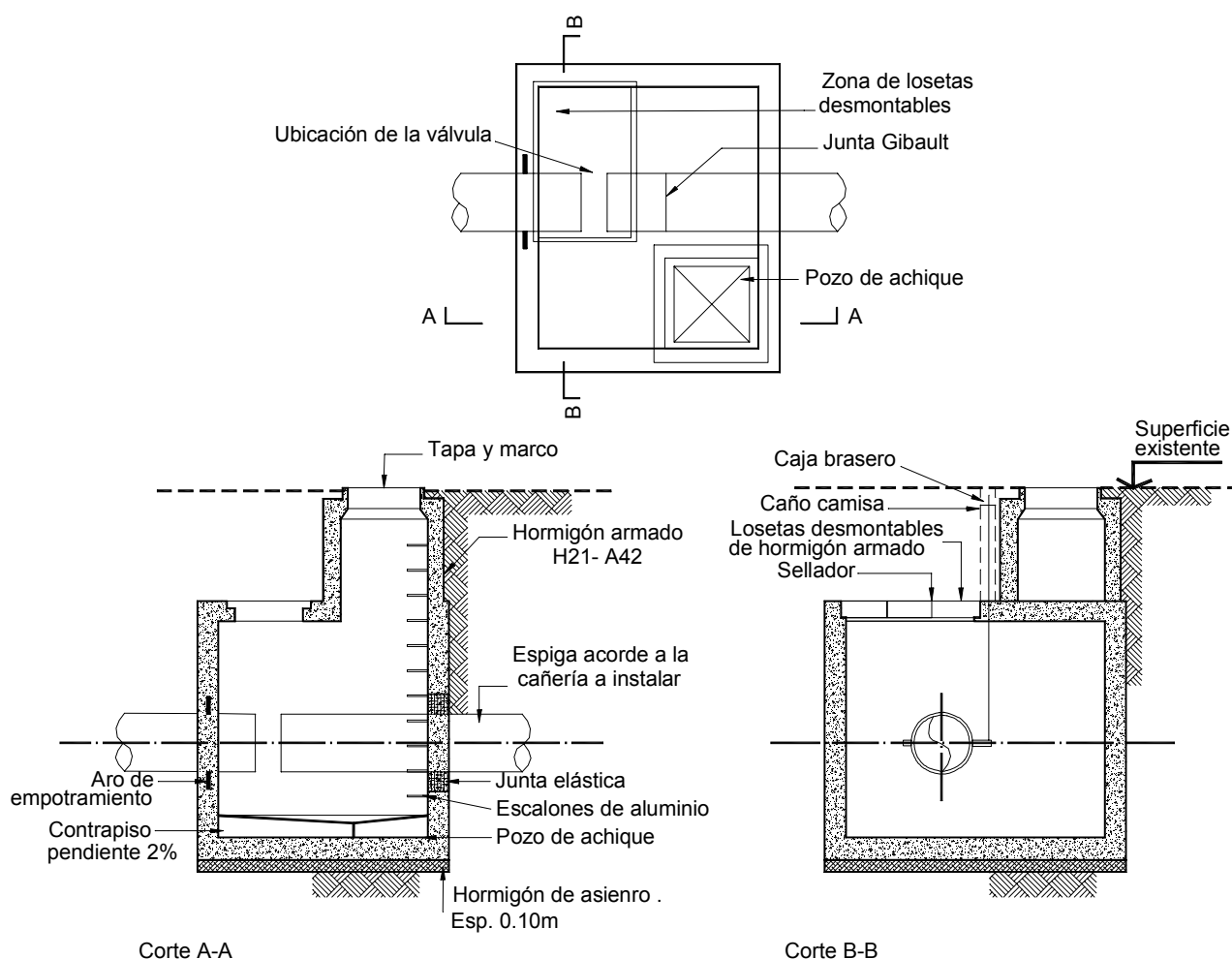


Figura 33. Cámara para válvula mariposa

3.12. VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN

Su misión es reducir la presión aguas abajo de las mismas a un valor determinado aceptable para la línea de conducción. Se puede con ellas entonces mantener regulada la presión en sitios en que en otros casos, podrían existir valores de sobrepresiones inaceptables.

En el Capítulo XII – Almacenamiento y Regulación de Presión se desarrolla el tema con más detalles.

3.13. VÁLVULA ANTIRRETORNO O DE RETENCIÓN

La finalidad es permitir la circulación en una única dirección. Se cierran automáticamente cuando el sentido es contrario al permitido. (Ver **Figura 34**).

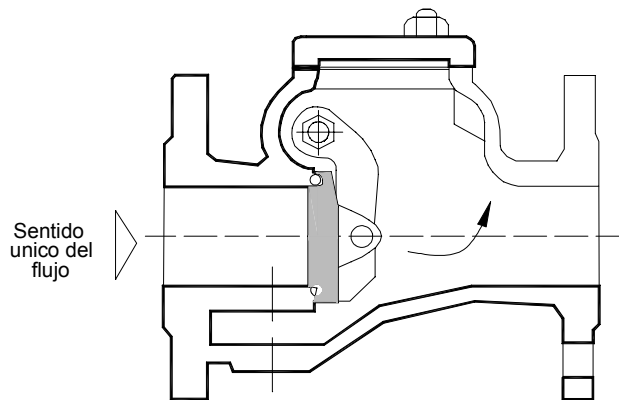


Figura 34. Válvula de retención

3.14. VENTILACIÓN DE LAS CONDUCCIONES A PRESIÓN

El agua lleva aire disuelto y burbujas. Tiende a concentrarse en puntos altos de la conducción formando bolsones que disminuyen la sección útil de la cañería, pudiendo generar pérdidas de carga adicionales y originar oscilaciones de caudal y de presión.

El procedimiento adecuado para la eliminación del aire es la colocación en puntos altos de válvulas de aire, columnas de ventilación o torres de ventilación. Éstos son elementos que permiten el escape del aire. También permiten el ingreso del mismo antes situaciones especiales, como son el vaciado de una cañería, o una rotura súbita.

Otros puntos donde se deben colocar válvulas de aire es junto a válvulas importantes. Con ello, se evita que cuando se produce el cierre de la válvula, si la cañería está en pendiente, se acumule el aire del lado de la misma que quedó relativamente en alto topográficamente.

En la **Figura 35** se describe una instalación donde:

- En el nudo 1 para permitir el escape de aire se ha optado por una válvula de aire dado que el análisis económico realizado, función de la cota de terreno natural y posición de la línea piezométrica, indica que es la mejor solución desde el punto de vista de los costos.
- En el nudo 2 en cambio el análisis económico indica que la solución de una columna de ventilación conduce a un menor costo. Se hace notar que la columna de ventilación debe superar a la cota piezométrica de proyecto tanto en funcionamiento como a caudal nulo.

Los problemas que se tratan de evitar son:

- **Cavitación:** acumulación de burbujas que implotan produciendo serios daños en las cañerías.

- **Taponamientos:** u obstrucciones por formación de burbujas de aire que reducen la sección útil.
- **Golpes de presión:** generados por la salida brusca del aire y la sobrepresión que se genera en el conducto.

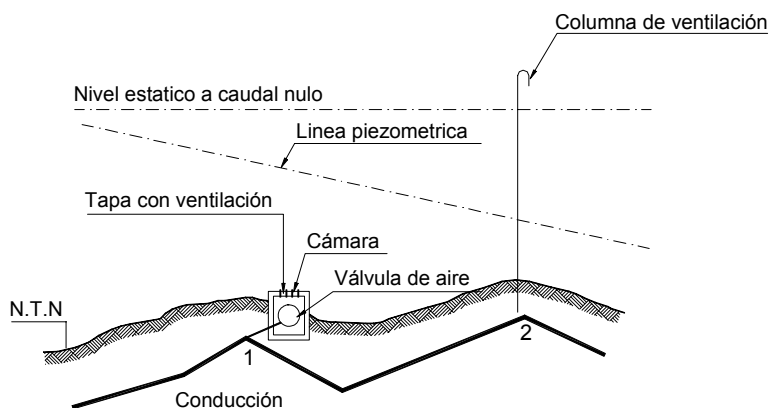


Figura 35. Esquema de ubicación de válvulas de aire y cámaras de desagüe en una conducción

Las columnas de ventilación se ejecutan en los lugares donde sea posible por la altura piezométrica. Donde la altura sea mayor o esté limitada por alguna condición y no se puedan hacer, se colocan Válvulas de Aire.

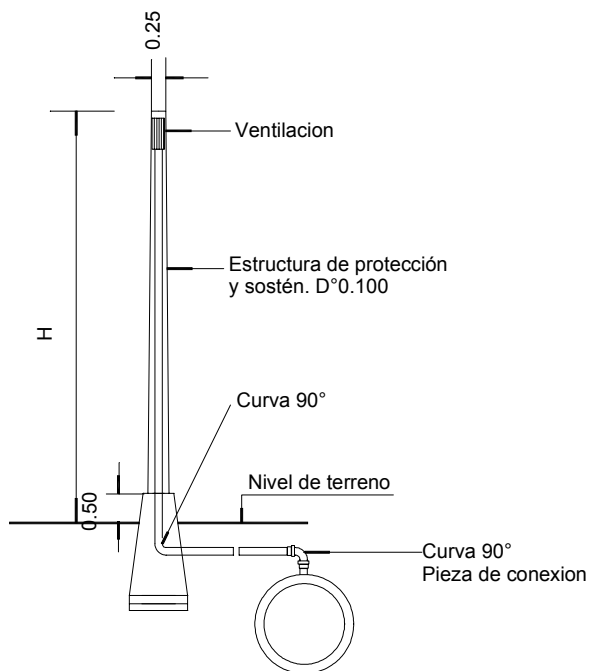


Figura 36. Columna de ventilación

En la **Figura 36** se describe una columna de ventilación y en la **Figura 37** una torre de ventilación.

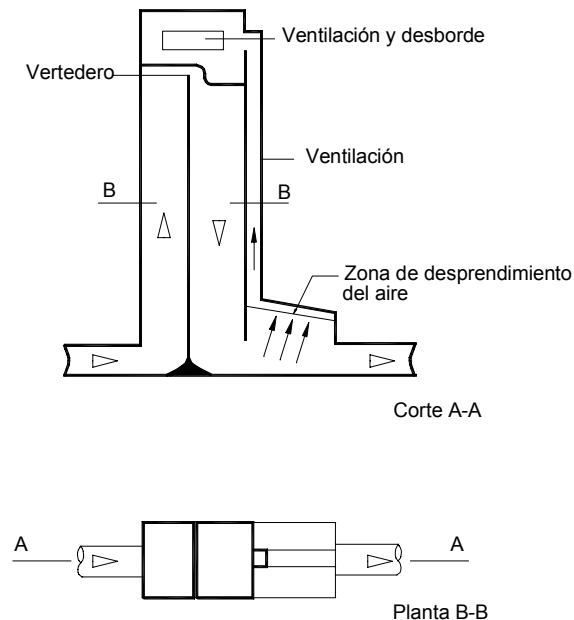


Figura 37. Torre de ventilación

Las válvulas de aire deben permitir lo siguiente:

- Salida de gran caudal de aire durante el llenado
- Salida de un caudal pequeño de aire cuando la instalación está bajo presión
- Entrada de un gran caudal de aire durante el vaciado

Las que lo satisfacen son las denominadas de “tres funciones” o “tres posiciones”. Ver **Figura 38**.

Debe intercalarse una válvula de cierre entre la tubería y la válvula, que permita desmontarla para su mantenimiento, reparación o cambio.

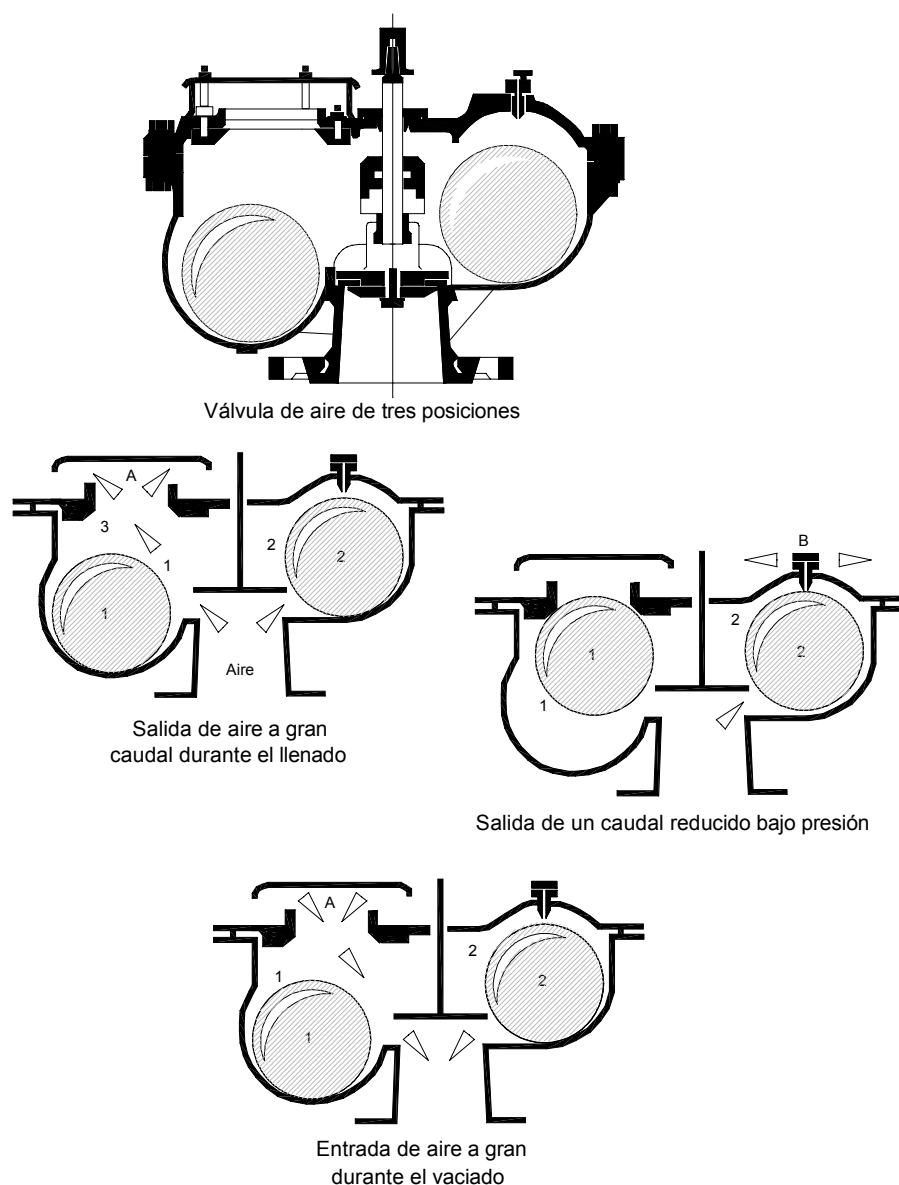


Figura 38. Válvulas de aire de tres posiciones

Emplazamiento de las Válvulas de Aire

En el diseño altimétrico de una conducción se deberá adoptar un perfil tal que facilite la acumulación del aire en los puntos altos, donde se instalarán las correspondientes válvulas de aire.

Las consignas de diseño a respetar son:

- Dar a la tubería una pendiente tal que facilite el ascenso del aire.

El caso ideal sería adoptar una pendiente constante, cuyo valor mínimo recomendable es el 3^0_{00} , es decir 3 m por kilómetro.

- Para el caso de tubería con varios puntos altos (“serrucho”) se deberá prever una pendiente mínima del 3 por mil en los tramos ascendentes y del 6 por mil para los tramos descendentes.

Una altimetría con ascensos lentos (poca pendiente) y descensos rápidos (mayor pendiente) favorece la acumulación del aire en los puntos altos, ver **Figura 39**, oponiéndose al arrastre de bolsones o burbujas de aire. Un perfil inverso con, ascensos rápidos y descensos lentos, no debe adoptarse.

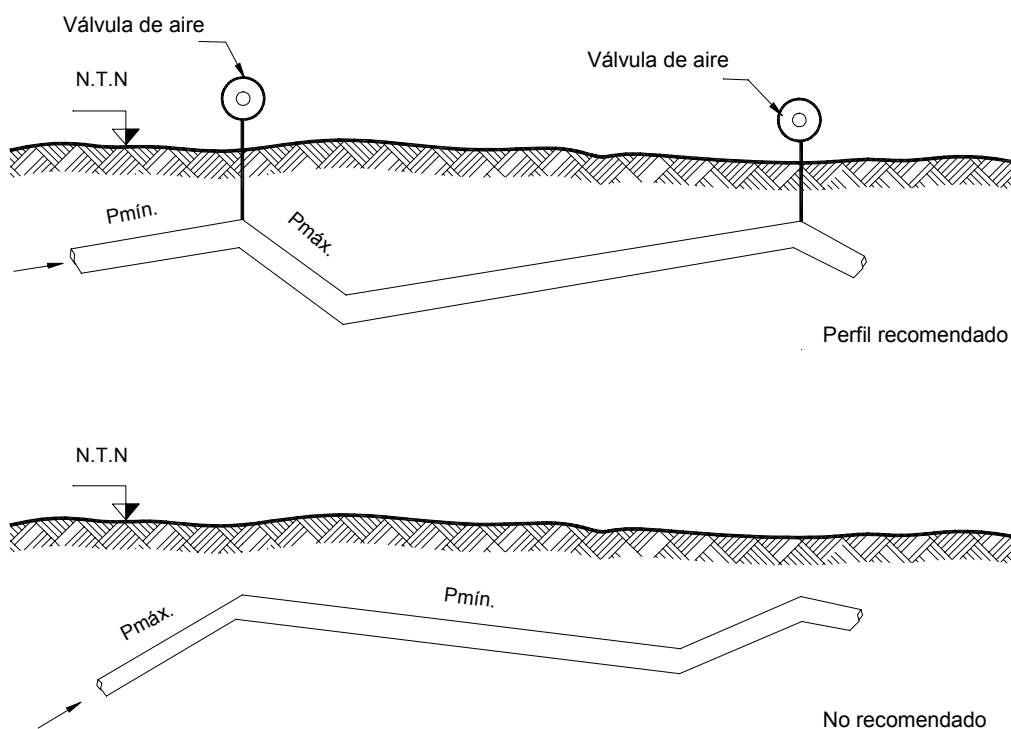


Figura 39. Perfiles de conducciones

- Para el caso de terrenos horizontales una pendiente nula o casi nula puede ocasionar, de producirse asentamientos, puntos altos no previstos.

Se deberá adoptar, en lo posible, un perfil “diente de sierra” a fin de ubicar los puntos altos de manera controlada. (Ver **Figura 40**).

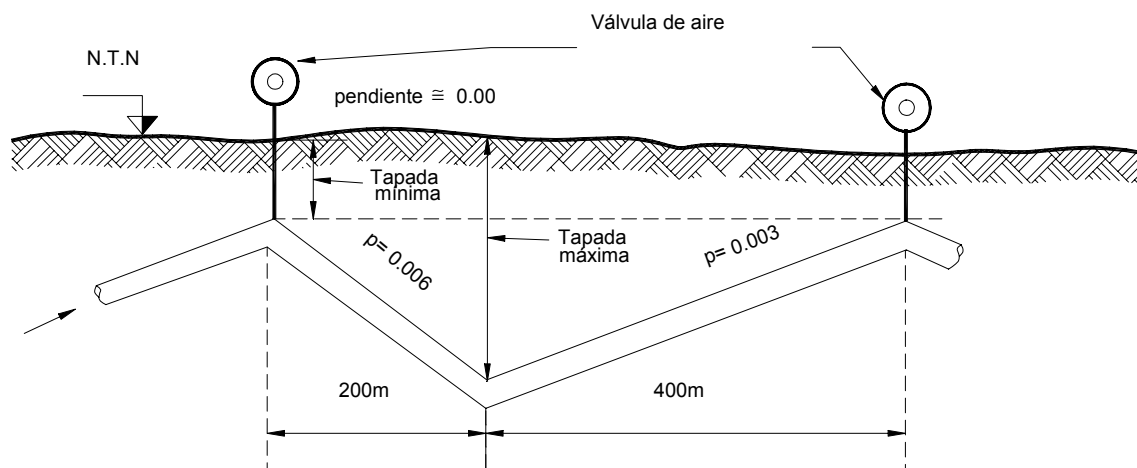


Figura 40. Perfil en terreno horizontal tipo "dientes de sierra" (se ha acentuado la escala vertical)

- Con el trazado correcto el aire si bien se desplaza lentamente se acumula en los puntos altos, donde estarán ubicadas las válvulas de aire.

Se instalan en cámaras como se observa en la **Figura 41**.

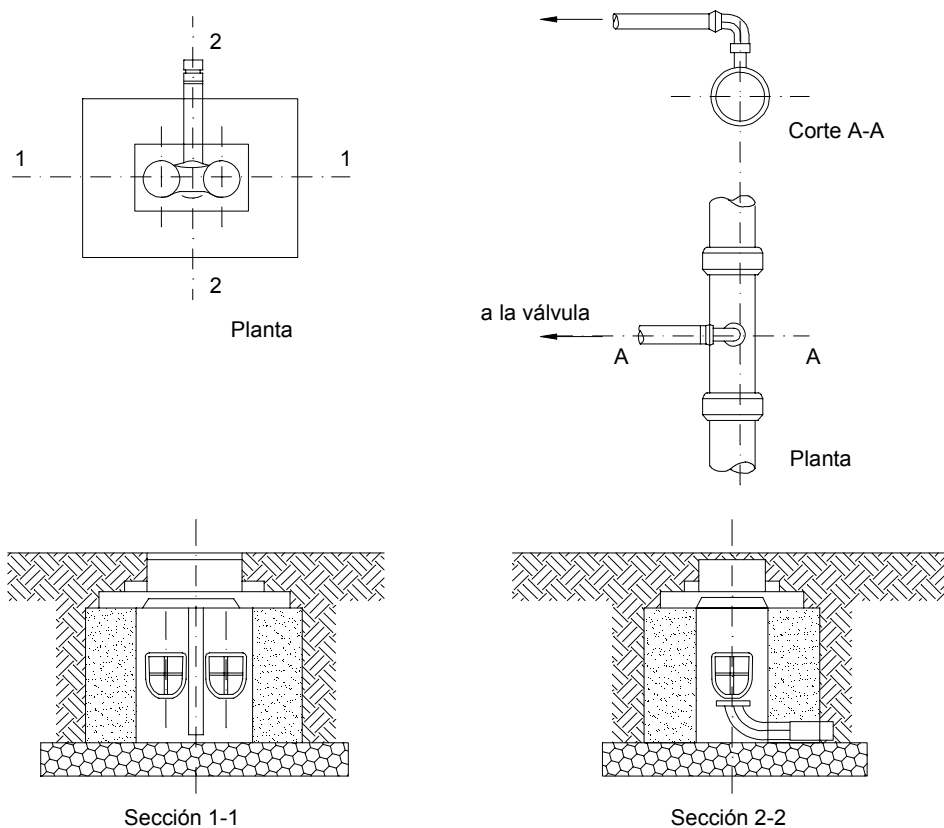


Figura 41. Cámara y conexión para válvula de aire

En la **Tabla 5** se especifican las relaciones diámetro de la tubería al diámetro de la válvula de aire habitualmente recomendada en la bibliografía.

Diámetro de la tubería mm	Diámetro de la válvula de aire mm
100 a 250	80
300 a 500	100
600 a 800	150
900 a 1200	200

Tabla 5. Válvulas de aire

Válvulas de Aire y Vacío

Los gases son solubles en los líquidos de acuerdo con la ley de Henry que puede enunciarse:

El peso de un gas disuelto en un líquido para una determinada temperatura es directamente proporcional a la presión.

$$G = f(p, T)$$

donde:

G = peso del gas disuelto (kg.) en un determinado volumen líquido.

p = presión en (kg/m²)

T = temperatura en °C

Se observa que una disminución de la presión tiene como consecuencia que la masa G de gas disuelto sea menor, saliendo la diferencia de la solución formando burbujas.

Por diferencia de densidad gas-líquido las burbujas ascienden hasta el intradós y se desplazan acumulándose en los puntos más elevados de la tubería.

Si en dichos puntos continúa la acumulación de gas trae aparejado una disminución de la sección que se traduce en una pérdida de energía localizada en la instalación, pudiendo llegar, en casos extremos a interrumpir el escurrimiento.

Asimismo, y durante las maniobras de llenado o vaciado de la conducción por razones de operación y/o mantenimiento, se debe permitir la salida o el ingreso de aire en dichos puntos altos, evitando sobrepresiones en el primer caso y posibles colapsos por inestabilidad elástica (pandeo), originado en depresiones para el segundo caso, de importancia en aquellas tuberías con esbelteces (relación diámetro-espesor) grandes.

Derrame de Aire por Orificios

Si se considera, (ver **Figura 42**), dos recintos que se encuentran a distinta presión y separados por un orificio, la condición necesaria para el derrame es que la presión p_1 sea

mayor que p_2 , por lo que al fluido pasa de I a II disminuyendo su presión y aumentando el volumen específico.

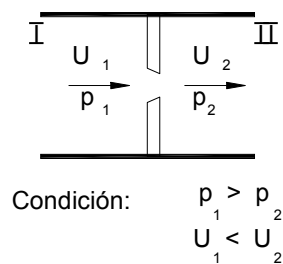


Figura 42. Derrame por orificios

Por aplicación del Primer Principio de la termodinámica se tiene:

$$\alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} + z_1 = \alpha_2 \frac{U_2^2}{2g} + z_2 + \int_{p_1}^{p_2} v dp + J_{1-2} \quad (28)$$

donde:

v = volumen específico

dp = diferencial de presión

α = coeficiente de Coriolis

U = velocidad media

g = aceleración de la gravedad

z = cota

p = presión

J = pérdida de energía

Si:

$$\alpha_1 = \alpha_2 \quad J_1 = 0 \text{ (trabajo de frotamiento)}$$

$$z_1 = z_2 \quad U_1 \sim 0,00$$

$$\frac{U_2^2}{2g} + \int_{p_1}^{p_2} v dp = 0 \quad (29)$$

Considerando que:

$$\int_{p_1}^{p_2} v \, dp = -L_c \quad \therefore \quad \int_{p_2}^{p_1} v \, dp = L_c \quad (30)$$

donde:

L_c = trabajo de circulación

$$\frac{U_2^2}{2g} = \int_{p_2}^{p_1} v \cdot dp = L_c \quad (31)$$

Expresión que dice que la energía cinética del derrame por un orificio es igual al trabajo de circulación del fluido entre p_1 y p_2 .

Ciclo Adiabático

De los ciclos posibles, suponerlo adiabático es el que mejor se ajusta al caso

$$dQ = 0 \quad \therefore \quad Q = 0$$

$$L_c = \frac{i_1 - i_2}{A} \quad (32)$$

donde:

dQ = diferencial de calor
 i entalpía

A = equivalente calórico del trabajo $0,00234 \frac{\text{cal}}{\text{kg m}}$

Y para un gas perfecto:

$$i_1 - i_2 = c_p (T_1 - T_2) \quad \therefore \quad L_c = \frac{c_p}{A} (T_1 - T_2) \quad (33)$$

Como:

$$x = \frac{c_p}{c_v}$$

donde:

c_p = calor específico a presión constante

c_v = calor específico a volumen contante

T = temperatura absoluta

Se tiene para la transformación adiabática:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (34)$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (35)$$

$$L_c = \frac{c_p}{A} \left[T_1 - T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = \frac{c_p}{A} T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad (36)$$

dado que:

$$p_1 v_1 = R T_1, \quad \frac{c_p}{c_p - c_v} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}$$

donde:

$$R = \text{constante universal de los gases} \quad 29,27 \frac{\text{kg } m}{\text{kg } ^\circ K}$$

$$\frac{c_p T_1}{A} = \frac{c_p p_1 v_1}{A R} = \frac{c_p}{c_p - c_v} p_1 v_1 = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_1 v_1 \quad (37)$$

Luego:

$$\frac{c_p T_1}{A} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{p_1}{\gamma_1} \quad (38)$$

donde:

γ = peso específico

Finalmente:

$$\frac{U^2}{2g} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_1}{\gamma_1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = L_c \quad (39)$$

En la realidad el derrame se produce con una contracción de la vena fluida (ver **Figura 43**), y el área de la sección 2-2 resulta menor que la correspondiente al

orificio. De acuerdo con el análisis teórico y como se ha comprobado experimentalmente, la velocidad de salida varía según que la presión exterior sea mayor o menor que la presión crítica, que es la presión interior de la vena líquida en la sección contraída 2-2.

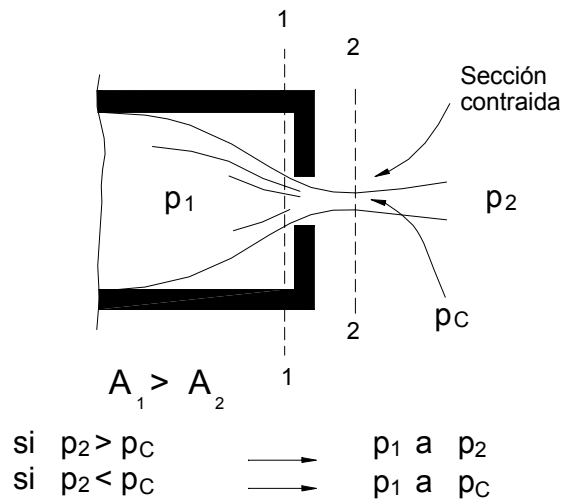


Figura 43. Sección contraída

Si la presión exterior es mayor que la crítica:

$$p_2 > p_c$$

el valor de la velocidad y en consecuencia el gasto se refiere al valor de p_2 mediante aplicación de la fórmula (39).

Si la presión exterior es menor que la crítica:

$$p_2 < p_c$$

en este caso la velocidad de escurrimiento no puede sobrepasar el valor determinado por la caída de presión p_1 a p_c y la energía cinética estará expresada por el área ACB'A' en lugar de ABB'A'. (Ver **Figura 44**)

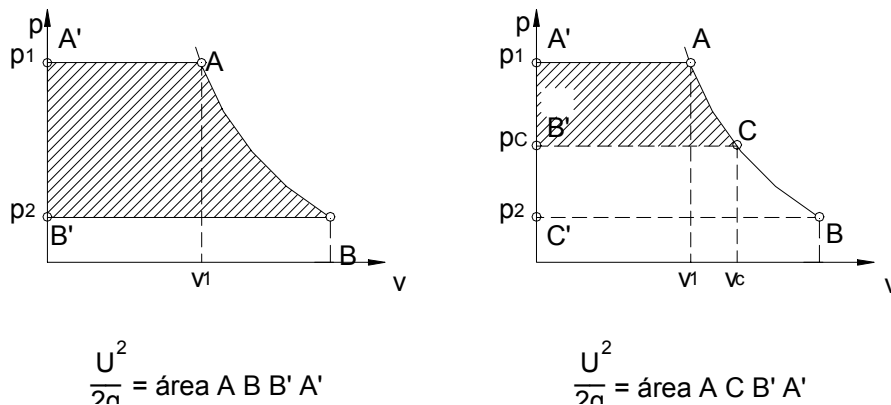


Figura 44. Expansión adiabática

El valor de la presión p_2 a emplear en la fórmula (39) será p_c .

La presión crítica se expresa por:

$$p_c = p_1 \left(\frac{2}{x+1} \right)^{\frac{x}{x-1}} \quad (40)$$

Para el aire con $x = 1,41$

$$p_c = 0,527 P_1 \quad (41)$$

Expresando la presión atmosférica a la cota z por:

$$p_1 = p_o \left(\frac{T_o - 0,0065z}{T_o} \right)^{5,257} \quad (42)$$

$$T_o = 15^\circ\text{C} = 288^\circ\text{K} \quad p_o = 10.332 \text{ kg/m}^2$$

$$p_c = 0,527 \cdot 10.332 \left(\frac{288 - 0,0065z}{288} \right)^{5,257} \quad (43)$$

$$p_c = 5.445 \left(\frac{288 - 0,0065z}{288} \right)^{5,257} \quad (43')$$

Despejando U a partir de la (39):

$$U = \left\{ 2g \frac{x}{x-1} \frac{p_1}{\gamma} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{x}{x-1}} \right] \right\}^{1/2} \quad (44)$$

Dado que el caudal del aire está expresado por:

$$Q_{AIRE} = \Psi \frac{\pi}{4} \Phi^2 U \quad (45)$$

donde:

Ψ = coeficiente de gasto

Φ = diámetro de la válvula de aire

Este caudal podrá ser igualado al del agua que reemplaza al aire en la tubería expresado en función de la fórmula de Williams - Hazen por:

$$Q_{AGUA} = C \left(\frac{j}{10,666} D^{4,87} \right)^{1/1,852} \quad (46)$$

donde:

C = coeficiente de Williams - Hazen

Operando sobre las igualdades (44), (45) y (46) pueden definirse los siguientes valores:

$$CTE 1 = \left[\left(\frac{2\sqrt{2}}{\Psi \pi \sqrt{g}} \right)^{1/2} \left(\frac{x}{x-1} \cdot R \right)^{-1/4} \right] \quad (47)$$

$$CTE 2 = \left[\left(\frac{j}{10,666} \right)^{0,270} D^{1,315} C^{0,5} \right] \quad (48)$$

$$CTE 3 = \left\{ T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{x-1}{x}} \right] \right\}^{-0,25} \quad (49)$$

Nota: la CTE 2 elevada al cuadrado es el caudal de agua en la tubería.

$$\Phi = CTE 1 \cdot CTE 2 \cdot CTE 3 \quad (50)$$

Para el Aire: $x = 1,41$ $\Psi = 0,31$

$$G = 9,80665 \text{ m/s}^2 \quad R = 29,27 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg}^\circ \text{K}} \quad \pi = 3,14159$$

La CTE 1 resulta:

$$CTE 1 = 0,304$$

por lo que finalmente se tiene:

$$\Phi = 0,304 \cdot CTE 2 \cdot CTE 3 \quad (51)$$

Determinación del diámetro de la válvula de admisión de aire

- Dado que se pretende evitar el colapso de la tubería por inestabilidad elástica se limita el valor interno en la misma a la presión crítica de pandeo que se expresa por:

$$p_{Pc} = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{D} \right)^3 \quad (52)$$

donde:

E = módulo de Young

ν = coeficiente de Poisson

t = espesor del tubo

D = diámetro de la tubería

A la cual como margen de diseño se la afecta de un coeficiente de seguridad igual a 2.

$$P_{Pc} \text{ admisible} = p_{Pc} / 2 \quad (53)$$

- Se calcula la presión atmosférica p_1 a la cota z y temperatura T_o mediante la ecuación (42)
- Se determina la diferencia de presión

$$\Delta p = P_1 - p_{Pc} \text{ admisible} \quad (54)$$

- Se determina la presión crítica mediante la ecuación (43').
- Si p_c es mayor o igual que Δp

$$p_2 = p_c$$

- Caso contrario

$$p_2 = \Delta p$$

- Se determinan las constantes CT_2 y CT_3 mediante las expresiones (48) y (49).
- Se calcula el diámetro Φ de la válvula de aire por aplicación de la expresión (51).

Fórmula expeditiva

A los fines de facilitar un diagnóstico expeditivo del diámetro de la válvula de admisión de aire se hace el siguiente supuesto:

$$z = 1000 \text{ m}$$

$$T_o = 288 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C} = 303 \text{ }^\circ\text{K}$$

de la expresión (42):

$$p_1 = 0,916 \text{ kg /cm}^2$$

de la expresión (43):

$$p_c = 0,483 \text{ kg /cm}^2$$

de la expresión (49):

$$CTE\ 3 = 0,37$$

De la expresión (51):

$$\Phi [mm] = 1000 \frac{mm}{m} \cdot 0,30 \cdot \sqrt{Q} \cdot 0,37$$

$$\Phi [mm] = 111 \sqrt{Q \left(m^3/s \right)} \quad (55)$$

Ejemplo

Material	Acero
Modulo de Young	2.100.000 kg/cm ²
Coeficiente de Poisson	0,3
Espesor	9,52 mm
Diámetro	500 mm
Temperatura	30°C=303°K
Altura	1.000 m
Caudal	500 l/s

Según (52):

$$P_{pc} = \frac{2 \cdot 2.100.000}{1 - 0,30^2} \left(\frac{9,52}{500} \right)^3$$

$$p_{pc} = 31,86 \text{ kg / cm}^2$$

De acuerdo a (53):

$$p_{pc} \text{ admisible} = 15,93 \text{ kg /cm}^2$$

con (42)

$$p_1 = 1,0332 \left(\frac{288 - 0,0065 \cdot 1.000}{288} \right)^{5,257}$$

con (54)

$$p_1 = 0,916 \text{ kg. /cm}^2$$

$$\Delta p = 0,916 - 15,93$$

$$\Delta p = -15,014 \text{ kg. /cm}^2$$

con (43')

$$p_c = 0,5445 \left(\frac{288 - 0,0065 \cdot 1.000}{288} \right)^{5,257}$$

$$p_c = 0,483 \text{ kg. / cm}^2$$

dado que $p_c > \Delta p$

$$p_2 = 0,483 \text{ kg. /cm}^2$$

con (48)

$$CT\ 2 = \sqrt{0,5}$$

$$CT\ 2 = 0,707$$

con (49):

$$CT\ 3 = \left\{ 303 \left[1 - \left(\frac{0,483}{0,916} \right)^{0,291} \right] \right\}^{-0,25}$$

$$CTE\ 3 = 0,373$$

según (51):

$$\Phi = 0,304 \cdot 0,707 \cdot 0,373$$

$$\Phi = 0,080 \text{ m} = 80 \text{ mm}$$

según (55):

$$\Phi = 111 \sqrt{0,5}$$

$$\Phi = 78 \text{ mm (verifica)}$$

3.15. CÁMARAS DE DESAGÜE

Las cámaras de desagüe compuestas fundamentalmente por una válvula de cierre, tienen como función permitir vaciar la conducción ya sea por motivos de limpieza de la tubería o por mantenimiento preventivo o correctivo de la misma (ver **Figura 45**).

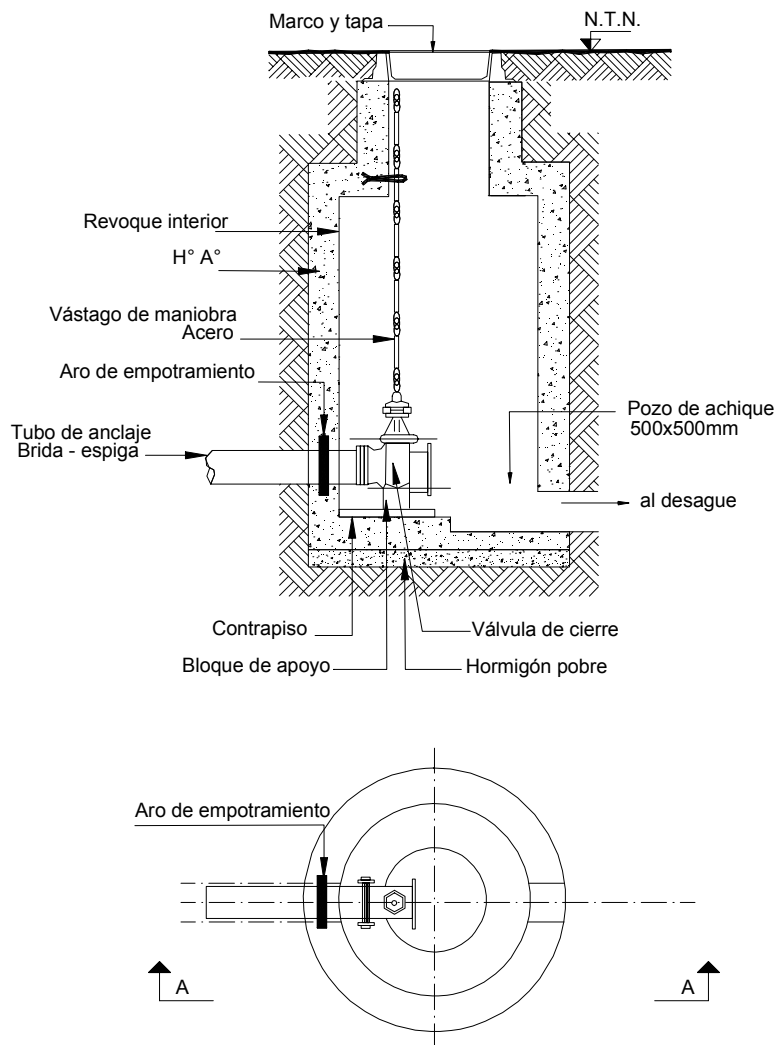


Figura 45. Cámara de desagüe

A los efectos de evitar la posibilidad de la existencia de una “conexión cruzada”, la cota de invertido de la válvula de cierre debe estar ubicada un diámetro por arriba de la cota de intradós de la tubería u orificio de desagüe.

Emplazamiento de las válvulas de desagüe

Para permitir el vaciado de la tubería se deberán ubicar las válvulas de desagüe en los puntos bajos del perfil “diente de sierra”.

Tiempo de desagüe

- Tramo inicial o final

Desde el punto de vista teórico para el tramo inicial como para el final de una línea de conducción se aplica el mismo razonamiento hidráulico. (Ver **Figura 46**).

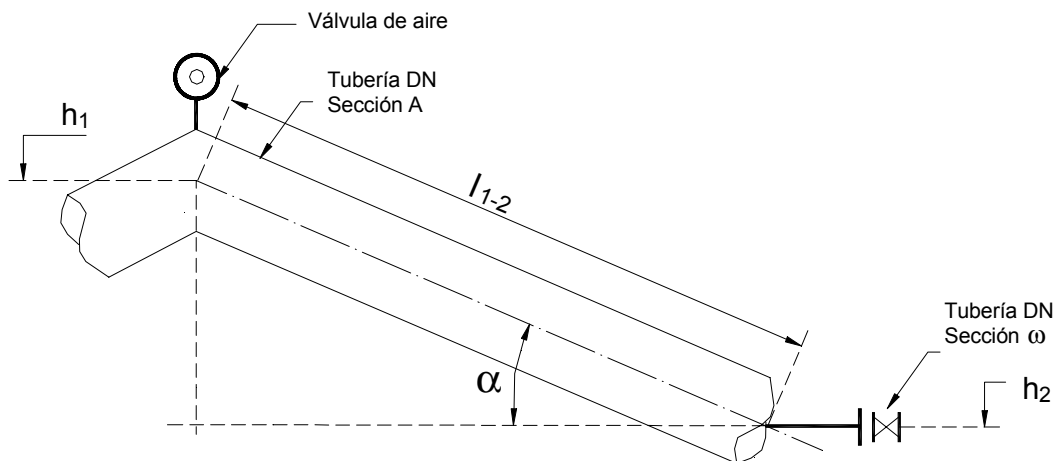


Figura 46. Tramo final de una conducción

$$d(\text{volumen}) = d(\text{volumen saliente}) - d(\text{volumen entrante}) \quad (56)$$

donde:

$d(\text{volumen})$ = diferencial de volumen

$d(\text{volumen saliente})$ = diferencial de volumen saliente

$d(\text{volumen entrante})$ = diferencial de volumen entrante

Si $d(\text{volumen entrante}) = 0$

$$d(\text{volumen}) = \mu \omega \sqrt{2gh} d(\text{tiempo}) \quad (57)$$

$$d(\text{volumen}) = A d l = A \frac{dh}{\text{sen} \alpha} \quad (58)$$

$$\mu \omega \sqrt{2gh} d(\text{tiempo}) = A \frac{dh}{\text{sen} \alpha} \quad (59)$$

$$d(\text{tiempo}) = \frac{1}{\mu \sqrt{2g} \sqrt{h} \text{sen} \alpha} \frac{A}{\omega} dh \quad (60)$$

$$\omega = \frac{\pi}{4} (\text{diámetro válvula})^2; \quad A = \frac{\pi}{4} (\text{diámetro tubo})^2 \quad (61)$$

$$\frac{A}{\omega} = \left(\frac{\text{diámetro tubo}}{\text{diámetro válvula}} \right)^2 \quad (62)$$

$$d(\text{tiempo}) = \frac{1}{\mu \sqrt{2g} \operatorname{sen} \alpha} \left(\frac{\text{diámetro tubo}}{\text{diámetro válvula}} \right)^2 \frac{dh}{\sqrt{h}} \quad (63)$$

Integrando entre h_1 y h_2

$$\text{Tiempo} = \int_{h_2}^{h_1} \frac{1}{\mu \sqrt{2g} \operatorname{sen} \alpha} \left(\frac{\text{diámetro tubo}}{\text{diámetro válvula}} \right)^2 h^{-1/2} dh \quad (64)$$

$$\text{Tiempo} = \frac{2l_{1-2}}{\mu \sqrt{2g}} \left(\frac{\text{diámetro tubo}}{\text{diámetro válvula}} \right)^2 \frac{\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}}{h_1 - h_2} \quad (65)$$

donde:

μ = coeficiente de gasto

ω = área de la sección de la válvula de desagüe

g = aceleración de la gravedad

h = altura

A = área de la tubería

dl = diferencial de longitud

dh = diferencial de altura

$d(\text{tiempo})$ = diferencial de tiempo

• Tramos intermedios. (Ver **Figura 47**).

Tramo superior del tubo de mayor cota inicial, con longitud L_A .

$$\text{Tiempo 1} = \frac{2L_A}{\mu \sqrt{2g}} \left(\frac{\text{diámetro tubo 1}}{\text{diámetro válvula}} \right)^2 \frac{\sqrt{h_1} - \sqrt{h_3}}{h_1 - h_3} \quad (66)$$

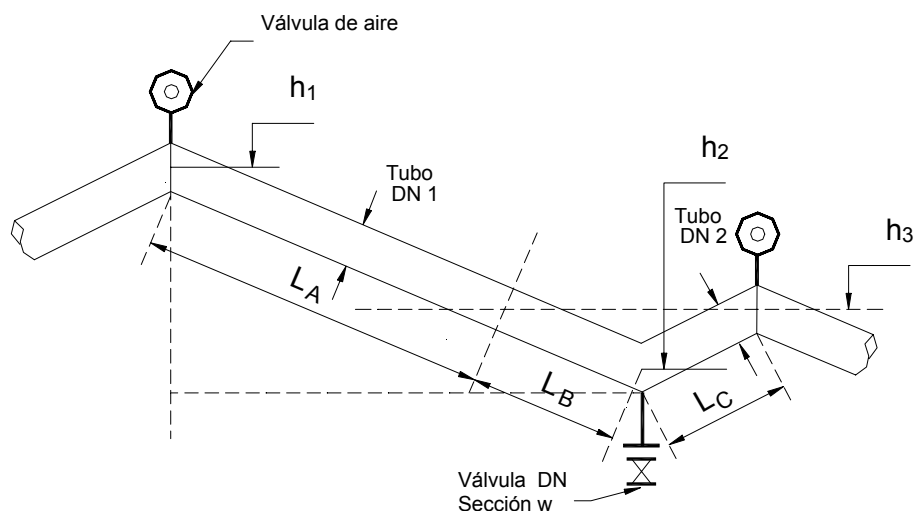


Figura 47. Tramos intermedios de una conducción

Tramo inferior del tubo de mayor cota inicial con longitud L_B .

$$Tiempo\ 2 = \frac{2 L_B}{\mu \sqrt{2g}} \left(\frac{\text{diámetro tubo 1}}{\text{diámetro válvula}} \right)^2 \frac{\sqrt{h_3} - \sqrt{h_2}}{h_3 - h_2} \quad (67)$$

Tubo de menor cota inicial, con longitud L_C .

$$Tiempo\ 3 = \frac{2 L_C}{\mu \sqrt{2g}} \left(\frac{\text{diámetro tubo 2}}{\text{diámetro válvula}} \right)^2 \frac{\sqrt{h_3} - \sqrt{h_2}}{h_3 - h_2} \quad (68)$$

$$Tiempo\ Total = tiempo\ 1 + tiempo\ 2 + tiempo\ 3 \quad (69)$$

3.16. GOLPE DE ARIETE

Es un fenómeno que provoca súbitos cambios en la presión de régimen de una conducción, originado por variaciones en la velocidad.

Desde el punto de vista de la Mecánica de los Fluidos se interpreta como un movimiento impermanente bruscamente variado, en cuyo análisis no se puede considerar a la masa específica como constante.

Sus relaciones fundamentales son:

$$\text{Impermanencia en el tiempo } \frac{\partial U}{\partial t} \neq 0 \quad (70)$$

$$\text{Impermanencia en el recorrido } \frac{\partial U}{\partial \ell} \neq 0 \quad (71)$$

$$\text{Ecuación de continuidad } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho U = 0 \quad (72)$$

$$\text{Celeridad } C = \frac{\sqrt{\varepsilon / \rho}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon}{E} \frac{D}{e}}} \quad (73)$$

$$\text{Tiempo de Fase } T_f = \frac{2L}{c} \quad (74)$$

donde:

U = velocidad

t = tiempo

ℓ = recorrido

ρ = masa específica

ε = módulo de compresibilidad volumétrica

E = módulo de Young

D = diámetro

e = espesor

L = longitud

c = celeridad

T_f = tiempo de fase

T_c = tiempo de maniobra

Δh = sobrepresión o depresión

ΔU = diferencia entre la velocidad inicial y final

g = aceleración de la gravedad

Cierre

• Lento $T_c > T_f$

• Límite $T_c = T_f$

- Rápido $T_c < T_f$

Sobrepresión para cierre lento según Jules Michaud (circa 1878)

$$\Delta h = \frac{2L\Delta U}{gT_c} \quad (75)$$

Sobrepresión para cierre rápido según Lorenzo Allievi (circa 1913)

$$\Delta h = \frac{c}{g} \Delta U \quad (76)$$

En la **Figura 48** se observa su representación.

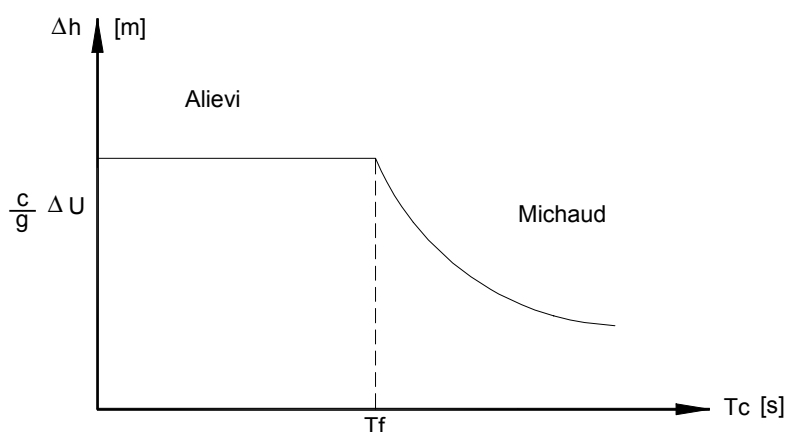


Figura 48. Sobrepresión en función del tiempo de maniobra

En relación a la celeridad (velocidad de propagación de la onda) el numerador de la expresión (73) manifiesta la velocidad teórica de propagación de la onda elástica, que para el agua y en las aplicaciones técnicas usuales se estima en 1450 m/s, para un módulo de compresibilidad volumétrica de 21400 kg/cm² y una masa específica de 102 kg s²/m⁴.

El denominador es un factor de corrección que tiene en cuenta el material (módulo de Young) y la esbeltez del tubo (relación diámetro-espesor).

En consecuencia los materiales más rígidos (acero, hierro dúctil, etc.), mayor módulo de elasticidad, a igualdad de esbeltez acusan celeridades mayores que los más elásticos, caso de los plásticos.

3.16.1. Causas

Las causas fundamentales que pueden originar el fenómeno en conducciones a presión son:

- Movimientos de válvulas
- Cierre de válvulas de retención
- Llenado de conductos vacíos

Tal como se indica en “Modern Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines”, (G. Watters), durante el llenado de conducciones vacías, particularmente en impulsiones de bombeo, se pueden producir velocidades en exceso en relación a la de régimen permanente.

Están originadas porque durante el llenado, la o las bombas, operan (debido a la poca pérdida de energía en el tramo brida de salida de la bomba – válvula de aire, (Ver **Figura 49**) a un caudal relativamente grande. Si la impulsión a posteriori de la Válvula de aire se continúa con un elemento de cierre parcialmente abierto, esta restricción originará luego de la evacuación final del aire una severa disminución de la velocidad del agua y el consiguiente golpe de ariete.

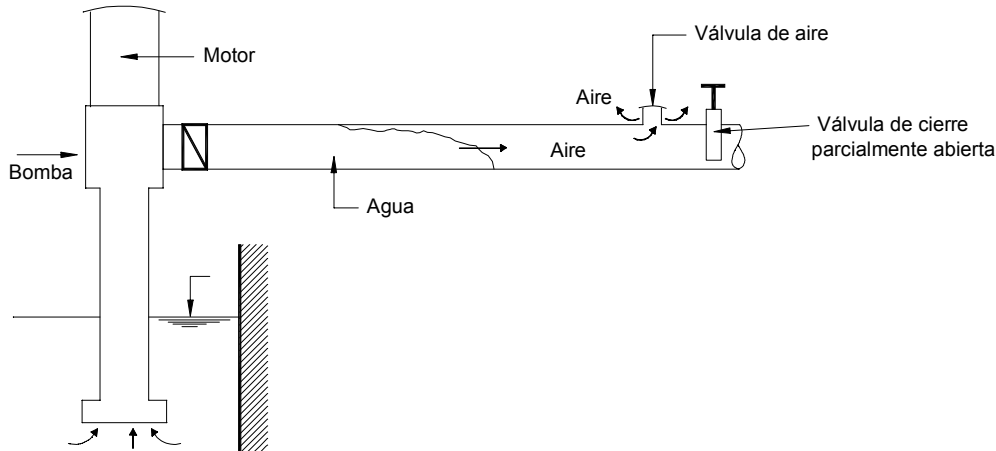


Figura 49. Llenado de una impulsión inicialmente vacía

- Remoción de aire

Asimismo, también, para el caso de conducciones a gravedad o líneas de impulsión (ver **Figura 50**) en las que luego de un período sin operación, al reiniciarse el ciclo el repentino aumento de la presión originará su eliminación por la válvula de venteo. Finalizado este período el agua, al encontrar la válvula de retención cerrada, producirá una onda de rebote que será el origen de un golpe de ariete.

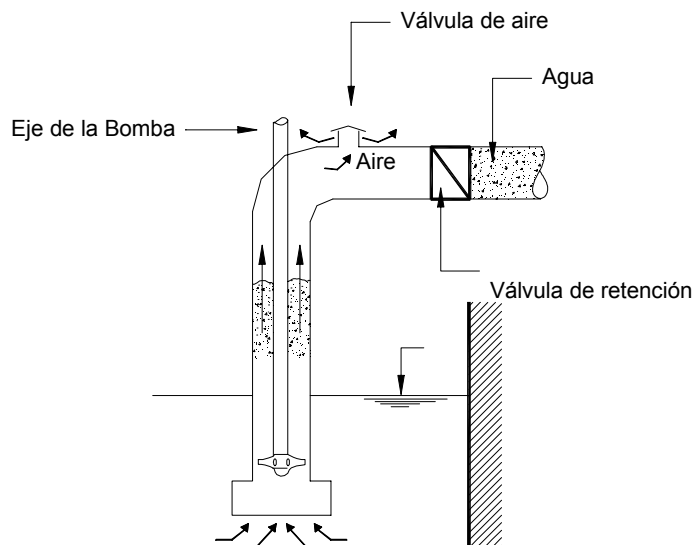


Figura 50. Llenado de una columna de descarga antes de una válvula de retención cerrada

- Arranque de bombas
- Fallas de la potencia suministrada a equipos de bombeo

Estas causas se comprenden observando las expresiones (75) y (76), funciones ambas de ΔU (diferencia entre la velocidad inicial y la final), es decir cualquier diferencia de velocidad originará un valor de Δh .

El proyectista deberá analizar la posibilidad de ocurrencia por las causas indicadas y determinar aquella que origine los valores máximos *maximorum*, los que deberán considerarse para el dimensionamiento y selección de la tubería.

Debe ponerse de manifiesto la complejidad hidráulica-matemática de este tema, que se halla tratada en numerosos manuales. Las referencias a Jaeger, Watters y Wylie son libros específicos de los autores más prestigiosos en los que se detalla un análisis profundo tanto teórico como práctico.

Se indica, asimismo, que la publicación de Jaeger "Fluid Transients" remite para consulta a aproximadamente quinientas (500) referencias específicas en relación al golpe de ariete.

3.16.2. Consecuencias

Las causas enumeradas ocasionan:

- | | | |
|------------------|---|--|
| • Sobrepresiones | → | posibles roturas |
| • Depresiones | → | vaporización, colapso de burbujas, desprendimiento de recubrimiento interior, aplastamiento por inestabilidad elástica o pandeo. |

- Vibraciones → colapso por resonancia

3.16.3. Técnicas y Mecanismos de Control

Diseño

De la observación de las expresiones (73), (75) y (76) se deduce que:

- A mayor módulo de elasticidad, mayor celeridad → mayor sobrepresión.
- A mayor esbeltez del tubo, mayor celeridad → mayor sobrepresión.
- A mayor velocidad → mayor sobrepresión.

Recomendación:

Diseñar con materiales de bajo módulo de elasticidad, esbeltez y velocidades pequeñas.

Mecanismos de Control

1). Movimiento controlado en válvulas

En la mayoría de las conducciones la presión en la válvula representa su valor máximo en una situación de golpe de ariete.

Adoptar por lo tanto un cierre controlado, ya sea manual o automático, que produzca el cierre en un tiempo tal que origine tanto sobrepresiones como depresiones dentro de los valores admisibles por la tubería, es un efectivo mecanismo de control.

2). Aumento de la inercia de las masas rotantes.

Es una solución en general sólo viable en pequeños equipos de bombeo por razones constructivas, ingenieriles y de costo.

3). Tanques de equilibrio

Pueden ser utilizados para prevenir tanto las sobrepresiones como las depresiones.

Actúan como un almacenamiento temporal del líquido desviado de la conducción principal para disminuir las sobrepresiones y como suministro a la tubería que necesita más fluido para prevenir excesivas desaceleraciones.

También pueden emplearse los denominados de flujo direccional “one way surge tank” con capacidad de prevenir la separación de la columna líquida en la tubería pero sin acción ante sobrepresiones. Al estar el sistema aislado por una válvula de retención, la superficie del líquido está a una cota inferior a la piezométrica y en consecuencia su ubicación no tiene restricciones en toda la traza de la conducción.

4). Cámaras presurizadas

Si bien se puede ubicar un tanque de equilibrio a continuación de la descarga de los equipos de bombeo razones estéticas y económicas hacen muy poco común su selección.

Las cámaras de aire presurizadas evitan lo antes mencionado y actúan tanto ante sobrepresiones como depresiones.

5). Válvulas de sobrepresión

Son colocadas en las cercanías de un mecanismo que se espera que origine sobrepresiones.

Su propósito es proveer un escape de líquido, evitando la disminución súbita de la velocidad y el consecuente aumento de la presión.

6). Válvulas anticipadoras de onda

En ciertos casos tal como conducciones con una pendiente positiva y uniforme, sin mayormente puntos intermedios altos, caso opuesto al perfil “diente de sierra”, se pueden sustituir las cámaras de aire presurizadas por este mecanismo.

Las dificultades teóricas de la modelización de los fenómenos, y la posibilidad de la implosión de las cavidades de aire, hace que la experiencia del proyectista y del fabricante sea fundamental para su selección.

3.17. PREVENCIÓN PARA EVITAR ROTURAS SÚBITAS

En la relación a los materiales actualmente empleados en la fabricación de tuberías y las elevadas esbelteces que conllevan, uno de los estados más críticos para su dimensionamiento, por no decir el mandatario, es la depresión (presión exterior mayor que la interior) por la posibilidad de colapso debido a inestabilidad elástica o pandeo.

Es por eso y tal como se expresa en el numeral 3.14, deberá verificarse el diámetro de la válvula de aire considerando la presión crítica admisible de pandeo (expresiones (52) y (53)) para evitar roturas súbitas por aplastamiento.

Esta hipótesis considera el máximo estado posible de cargas en el diseño y toda acción eventual que pueda producirse en el tramo de la tubería la solicitará a menores esfuerzos.

3.18. COLOCACIÓN DE LAS TUBERÍAS

3.18.1. Generalidades

Antes y después de transportar los caños al lugar de su colocación, los caños se deberán examinar prolijamente, vigilando especialmente que la superficie inferior sea lisa, que la superficie exterior no presente grietas, poros o daños en la protección o acabado, fallas o deformaciones.

Todas las cañerías, accesorios, etc. deberán ser transportados, conservados y protegidos con cuidado para que no sufran daños, golpes o caídas.

No se deberán instalar caños con deficiencias.

Luego se deberán ubicar al costado y a lo largo de las zanjas y se deberán excavar los nichos de remache en correspondencia de cada junta.

Antes de bajarse a la zanja, los caños se deberán reconocer de acuerdo a su posición según el diagrama definitivo de colocación. También se deberán limpiar esmeradamente, sacándoles el moho, tierra, pintura, grasa, etc., adheridos en su interior, dedicando especial atención a la limpieza de las espigas, enchufes y bridas. Luego se deberán asentar sobre el lecho de apoyo, cuidando que apoyen en toda la longitud del fuste y se deberán construir las juntas que se hubiesen especificado.

Las cañerías de espiga y enchufe se deberán colocar con el enchufe (hembra) orientado en sentido agua arriba para evitar pérdidas ante posibles fallas en las juntas.

Las cañerías, una vez instaladas, deberán estar alineadas sobre una recta, salvo en los puntos expresamente previstos en los planos de ejecución. Si se tratara de cañerías con pendiente definida, ésta deberá ser rigurosamente uniforme dentro de cada tramo.

No se deberán colocar caños directamente apoyados en un terreno irregular, debiendo sostenerse de manera que se proteja el caño contra eventuales daños que pudieran producirse cuando se coloque en la zanja o cualquier otro lugar.

Los caños se deberán tender directamente sobre el material de relleno que forma el lecho de apoyo. No se permitirá el uso de bloques, y el lecho de apoyo deberá colocarse de manera que forme un elemento de sostén continuo y sólido a lo largo de toda la cañería. Se deberán realizar las excavaciones necesarias para facilitar el retiro de los elementos de transporte y conservación una vez tendido el caño. Se deberán excavar huecos en las juntas de espiga y enchufe en los extremos del caño, para evitar cargas puntuales en dichas uniones de enchufe. La zanja deberá sobre-excavarse para permitir el acceso adecuado a las juntas en el sitio de trabajo, para permitir la ejecución de dichas juntas y para permitir la aplicación del revestimiento de ser necesario.

Cuando sea necesario levantar o bajar el caño por encontrarse obstrucciones imprevistas u otras causas, podrá cambiar la alineación y/o las inclinaciones. Dichos cambios se deberán efectuar mediante deflexión de las juntas, o el uso de piezas de ajuste. En ningún caso la deflexión de la junta deberá exceder la máxima deflexión recomendada por el fabricante del caño. Ninguna junta deberá colocarse de tal forma que su falta de

encaje adecuado reduzca en cualquier medida la resistencia y estanqueidad de la junta terminada.

A medida que avance el tendido de los caños, se deberá mantener el interior de la cañería libre de cualquier desecho. Al terminar de instalar los caños, señalizar los empalmes y efectuar las reparaciones internas necesarias antes de probar y desinfectar la cañería terminada, se deberá limpiar completamente el interior de la cañería, para eliminar toda la arena, suciedad, salpicadura de montero y cualquier otro desecho.

3.18.2. Requisitos Específicos

Apartes de los requisitos indicados en el numeral 3.18.1, cada material en particular debe cumplimentar las siguientes condiciones particulares:

- Tuberías de acero

La instalación se deberá ajustar a los requisitos del manual AWWA M11.

- Tuberías de asbesto cemento

Se deberá cumplir lo especificado en la norma IRAM 11538.

- Tuberías de hierro dúctil

Se deberá cumplir lo especificado en la norma ANSI/AWWA C600.

- Tuberías de hormigón armado con alma de acero

La instalación se deberá ajustar a los requisitos del manual AWWA M9.

- Tuberías de polietileno de alta densidad

Se deberá cumplimentar lo especificado en las normas AWWA C906 – 1990 y ASTM D2321.

- Tuberías de plástico reforzado con fibra de vidrio

Se deberá cumplimentar lo especificado en la norma ASTM D3839.

- Tuberías de policloruro de vinilo

Se deberá cumplimentar lo especificado en el manual AWWA M23.

3.18.3. Instalaciones Submarinas o Subfluviales

Normalmente se utilizan tres métodos de colocación para efectuar cruces submarinos o subfluviales (cursos de agua, lagos, lagunas, etc.), saber:

- Método del remolque
- Método de tirar desde el fondo

- Instalación con draga

En el método del remolque la tubería se prepara en tierra, luego se lanza al agua empujándola pero a una cierta altura del fondo, donde se mantiene y finalmente se remolca al lugar de instalación.

Es común utilizar boyas y tensores para limitar los efectos del oleaje superficial y evitar el rozamiento con el fondo del lecho.

En el método de tirar desde el fondo las tuberías se montan en tierra formando líneas de una cierta longitud cada una las que se ubican paralelas unas de otras y en dirección perpendicular a la orilla. Se tira de la primera de ellas previamente ubicada en la zona de lanzamiento mediante un sistema de cables operados desde una embarcación. Las líneas son lanzadas secuencialmente, transfiriendo cada línea sucesiva a la zona de lanzamiento.

Es decir una vez que una línea de tubos se ha lanzado la siguiente se transfiere a la línea de remolque, previamente se vincula conectándola a la anterior y así continúa el proceso de instalación. Las operaciones de unión entre la línea sucesiva a agregar y las ya lanzadas se realiza en tierra firme.

Este método tiene la ventaja de permitir lanzar más de una línea en paralelo para efectuar cruces múltiples.

Las tuberías durante la operación de colocación deben estar vacías y son soportadas por flotadores, y finalmente se colocan sobre el fondo o en una zanja previamente preparada.

Finalmente, en el método de instalación con draga, la misma o el remolque auxiliar han de tener las dimensiones adecuadas para contener los equipos necesarios y las tuberías.

Cada tubo se iza con una grúa y luego se baja al fondo donde se deposita en una zona preparada, cercana a la zona de la tubería montada. Finalmente buzos mediante elementos de tracción hidráulicos, realizan la unión.

El diseño debe considerar los siguientes estados de cargas:

- Presión neta interior (presión de trabajo interior menos el mínimo minimorum del nivel de agua externa).
- Presión crítica de colapso (pandeo) para el caso de tubería vacía.
- Peso de los anclajes, generalmente en hormigón.
- Espaciamiento de los anclajes.

Para el caso de tuberías colocadas en zanja y por razones de seguridad, no se considera la acción favorable del relleno en la misma.

Dada la poca incidencia de la carga de tierra tanto en la colocación en zanja como con terraplén de protección y la ausencia de carga de tránsito, habitualmente no se verifica la deflexión.

Para el dimensionamiento de los anclajes se emplea la siguiente expresión:

$$G_{anclaje} = \frac{L(G_{tubo} + G_{producto}) - (K \cdot \gamma_{agua} \cdot V_{ext} \cdot L)}{\left(\frac{K \cdot \gamma_{agua}}{\gamma_{HA}} \right) - 1} \quad (77)$$

donde:

$G_{anclaje}$ = peso del anclaje, [kg]

L = longitud entre anclajes, [m]

G_{tubo} = peso del tubo, [kg/m]

$G_{producto}$ = peso del líquido a transportar, [kg/m]

γ_{agua} = peso específico del agua del cruce, [kg/m³]

V_{ext} = volumen externo del tubo, [m³/m]

γ_{HA} = peso específico del hormigón, [kg/m³]

K = constante de anclaje, (1,3 a 1,5)

En cuanto al valor de la constante de anclaje para $K = 1,0$ se logra una flotación neutra; $K = 1,3$ es el valor habitualmente utilizado en cruces de lagunas y lagos y para $K = 1,5$ toma en cuenta la existencia de mareas o corrientes en arroyos, ríos, etc.

En cuanto a los materiales a utilizar se recomienda el empleo de plásticos (PEAD, PRFV, P.V.C) por su comportamiento frente a la acción del agua común o salada.

En el caso de líneas de longitud importante, la posibilidad de montar la extrusora de tubos de P.V.C en el obrador o la soldadura por termofusión para el PEAD son ventajas que deben ser convenientemente evaluadas.

3.19. PRUEBAS HIDRÁULICAS Y RELLENO

Una vez colocada la cañería en la zanja y unidos los tubos se los cubre con tierra en su parte media (dejando las juntas libres) y a continuación se hace la prueba hidráulica de la tubería instalada con el objeto de poner de manifiesto los defectos, (roturas y pérdidas) de la cañería y la estanqueidad de las juntas. Esta prueba generalmente se realiza a una presión de 1.5 veces la presión nominal de la cañería, en el punto más bajo del tramo en ensayo aunque el Pliego de Especificaciones Técnicas Particulares puede fijar valores menores en consideración a la presión con que efectivamente trabajará la tubería. Las pruebas deben realizarse a medida que la colocación va avanzando y por tramos no mayores de 400 m.

Una vez corregidas las deficiencias aparecidas durante la prueba hidráulica, se repite ésta y si no se producen nuevos defectos (se mantiene la presión en la cañería durante un tiempo prudencial) se procede al relleno de la zanja con material seleccionado hasta

cubrir el caño, apisonando cuidadosamente y cuidando que el caño asiente en toda su longitud.

Luego se continuará el relleno con la misma tierra extraída de la zanja apisonando por capas de 0,30m de espesor. Terminado el relleno debe efectuarse una nueva prueba hidráulica, denominada a zanja tapada a fin de verificar si se produjeron roturas durante el mismo, que serán acusadas por pérdidas.

El equipo necesario para realizar la prueba consiste corrientemente en una bomba de presión (generalmente manual), un manómetro, cañería de acoplamiento de la bomba a la tubería a probar, con válvulas de retención y la cantidad de agua suficiente para proporcionar la presión necesaria durante la prueba.

Para proceder a efectuar la prueba se debe llenar la cañería con agua. En caso de ensayarse cañerías de asbesto-cemento u hormigón convendrá llenar la cañería con 24 hs de anticipación para evitar resultados falsos, pues durante varias horas estos caños absorben pequeñas cantidades de agua, por lo que si no se toma esta precaución puede atribuirse erróneamente las disminuciones de presión acusadas por el manómetro a pérdidas en la cañería.

El llenado de la cañería debe hacerse lentamente y por el punto más bajo del tramo a probar, colocando en los puntos altos válvulas o dispositivos para purgar el aire, los cuales deben permanecer abiertos durante el llenado.

La presencia de aire puede ser causa de roturas durante la realización de las pruebas hidráulicas.

Normalmente la presión de prueba deberá mantenerse durante 30 a 60 minutos, tiempo suficiente para observar y verificar la corrección de la instalación del tramo que se prueba.

Las pruebas hidráulicas se deben repetir, tantas veces como sea necesario, reparando en cada oportunidad las juntas, piezas o tuberías defectuosas, hasta alcanzar resultados satisfactorios.

Se puede, como verificación previa, y sin que sea sustituto de las pruebas hidráulicas realizar un ensayo con aire, luego de compactado el terreno.

En casos especiales y si el Pliego de Especificaciones Técnicas Particulares así lo autoriza, puede realizarse la prueba de presión para cada junta en forma sucesiva en aquellos sistemas de juntas dotados de doble aro de goma y conexión al efecto.

Históricamente las normas establecían las pérdidas admisibles mediante el empleo de fórmulas con una estructura tipo:

$$Q = n \cdot d \cdot \sqrt{p}$$

donde:

Q : caudal

n : cantidad de juntas en el tramo a ensayar

d : diámetro

p : presión

tal es el caso de lo expresado por la norma AWWA 0600 (1954) que la fijaba, con las unidades habitualmente empleadas en la República Argentina, en:

$$Q [l/h] = \frac{n \cdot d [mm] \sqrt{p [kg/cm^2]}}{3292}$$

Con la evolución en el diseño y materiales en los aros de goma (elastómero SBR poli isopropileno, NBR (butadieno acrílico nitrilo o EPDM polímero de etileno propileno) que han sustituido a los anteriormente empleados (caucho natural, filástica, plomo, mastic, concreto, etc.) se ha pasado a no permitir, para las presiones de prueba especificadas por los fabricantes, pérdida alguna.

El ejemplo siguiente aclara este concepto:

Ejemplo

Longitud de cada tubo	6 m
Tramo a verificar	300 m
Calidad de juntas	50
Presión de prueba	4 kg/cm ²
Diámetro del tubo	100 mm
Caudal según AWWA 0600:	

$$Q = \frac{50 \cdot 100 \cdot \sqrt{4}}{3292} = 3 \text{ l/h}$$

Del mismo se deduce que se ha pasado un valor reducido (3 l/h) a tolerancia cero, habitualmente cumplido, como se ha expresado anteriormente, por los diversos tipos de juntas actualmente utilizados.

3.20. PREVENCIÓNES FRENTE A PROBLEMAS SÍSMICOS

Los terremotos actúan en las tres direcciones del espacio, pero solo dos de ellas (la dirección vertical y la horizontal paralela al eje de la tubería) tienen efectos que deben considerarse.

La acción vertical del sismo se traduce en un aumento de la aceleración de la gravedad, lo que significa un aumento de la carga del terreno, la de tránsito, el peso de la tubería y el del agua contenida.

El movimiento del terreno en la alineación del eje de la tubería determina, por rozamiento entre el tubo y el suelo, un corrimiento en las juntas si son del tipo espiga y enchufe o un esfuerzo axial si son acorrojadas o bridadas.

La acción del sismo en dirección horizontal y normal al eje de la tubería es despreciable.

Cálculo de la aceleración sísmica

Las aceleraciones vertical y horizontal, debidas al sismo, se calculan de acuerdo a:

$$a_v = cte\ 1 \cdot cte\ 2 \cdot cte\ 3 \cdot g \quad (78)$$

$$a_h = R \cdot cte\ 2 \cdot cte\ 3 \cdot g \quad (79)$$

donde:

a_v = aceleración vertical [m/s^2]

a_h = aceleración horizontal [m/s^2]

$cte\ 1$ = coeficiente, generalmente se emplea 2

$cte\ 2$ = coeficiente de intensidad sísmica = $(s-2) / 100$

$cte\ 3$ = coeficiente de seguridad, generalmente 1,0 ; 1,2 o 1,5

R = coeficiente de respuesta estructural

g = aceleración de la gravedad, $9,81\ m/s^2$

s = grado sísmico ($s \geq 2$), según escala Mercalli (MSK)

R (coeficiente de respuesta estructural) se supone función del período fundamental T de la estructura, que para oscilaciones a lo largo de la dirección considerada es:

$$T > 0,8\ s \quad R = 0,826 / T^{0,667} \quad (80)$$

$$T \leq 0,8\ s \quad R = 1$$

Para el caso de T indeterminado se asume $R = 1$, es decir el valor máximo.

Adoptando un sismo de grado 9 se tiene,

de la expresión (78):

$$a_v = 2 \cdot [(9 - 2) / 100] \cdot 1,2 \cdot g = 0,17\ g$$

$$a_v = 1,65 \text{ m/s}^2$$

de la expresión (79):

$$a_h = 1 \cdot [(9 - 2)/100] \cdot 1,2 \cdot g = 0,084 \text{ g}$$

$$a_h = 0,82 \text{ m/s}^2$$

Las aceleraciones durante el sismo serán:

$$a_a = (1,65 + 9,81) \text{ m/s}^2 = 11,46 \text{ m/s}^2$$

$$a_H = 0,82 \text{ m/s}^2$$

Verificaciones estructurales de la cañería

Las cargas verticales empleadas para determinar los momentos, tensiones tangenciales y el posible efecto de pandeo o inestabilidad elástica y deflexiones se deberán incrementar en la relación que lo ha hecho la aceleración de la gravedad, es decir que los pesos específicos deben multiplicarse por $(a_v + g) / g$.

En cuanto a los efectos horizontales en la dirección longitudinal se deberá determinar la deformación específica del terreno mediante:

$$\varepsilon = T_g a_h / 2\pi v_s \quad (81)$$

donde:

ε = deformación específica

T_g = período de la onda sísmica [s]

a_h = aceleración horizontal, $0,82 \text{ m/s}^2$

$\pi = 3,1416$

V_s = velocidad de propagación de la onda sísmica [m/s]

En el caso de las tuberías con juntas elásticas se deberá verificar que el corrimiento originado por la deformación específica (L) no provoque el deslizamiento del enchufe fuera de la campana:

$$L = l_{\text{tubo}} \cdot \varepsilon \quad (82)$$

Para las juntas rígidas (acerrojadas o bridadas) se deberá agregar al esfuerzo longitudinal (tensión) el originado por la deformación específica aplicando la ley de Hooke:

$$T_{\text{total}} = T_I + E \cdot \varepsilon \quad (83)$$

donde:

T_{total} = tensión longitudinal total [kg/cm^2]

T_l = tensión longitudinal [kg/cm^2]

E = módulo de elasticidad de Young [kg/cm^2]

La tensión longitudinal total deberá ser menor que la tensión admisible longitudinal del trabajo del tubo.

4. INCRUSTACIÓN Y CORROSIÓN DE CAÑERÍAS

4.1. INTRODUCCIÓN

En los servicios de agua potable con frecuencia se presentan problemas de incrustación o corrosión en los sistemas de conducción y especialmente en los sistemas de distribución. Estos problemas están directamente relacionados con las características físico-químicas del agua que entra en contacto con los mismos, y en el caso de la corrosión con las características de las cañerías, tanques, etc. y el medio que las rodea.

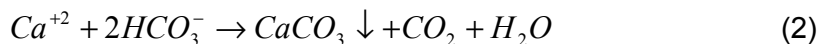
Según sus características físico-químicas un agua puede tener tendencia a formar depósitos o incrustaciones o a favorecer la disolución de los metales. En el primer caso se las denomina aguas incrustantes y en el segundo, corrosivas. En el caso de que no producen ni incrustaciones ni corrosión, se dice que el agua es estable. El rango de estabilidad de un agua es relativamente angosto, por lo que los procesos de tratamiento para el control de la corrosión y la incrustación, es decir aquellos tratamientos que se aplican para estabilizar el agua, requirieren de un cuidadoso control a fin de evitar caer por arriba o debajo de este rango de estabilidad.

La incrustación no es más que el típico depósito blanquecino que con frecuencia se observa en el fondo de las teteras u otros recipientes. Estos depósitos se generan a partir de los componentes de la dureza carbonatada y no-carbonatada del agua (principalmente sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, cloruros, calcio, y magnesio).

La combinación exacta de pH y alcalinidad del agua que resulta en la formación de incrustación (o corrosión), es función de las características químicas generales de la misma. En un rango de pH de 7,0-9,5 y alcalinidades del orden de 150 mg/l o mayores, el carbonato de calcio CO_3Ca precipita y forma un depósito o incrustación en las superficies interiores de las cañerías y tanques. Las reacciones que se producen son una de las dos siguientes:



o



Si bien la incrustación progresiva de las cañerías puede reducir, con el tiempo, la capacidad de conducción de las mismas, en cantidades controladas puede ser beneficiosa, ya que forma una capa protectora en el interior de las cañerías y los tanques.

En general, la corrosión se define como el deterioro de una “sustancia” o de sus propiedades producida por la reacción de ésta con el ambiente que la rodea. En el caso que nos ocupa, la “sustancia” que sufre corrosión puede ser una cañería o accesorio metálico, la capa protectora de cemento que reviste el interior de una cañería, o una cañería de asbesto-cemento. En el caso de la corrosión interna de estas sustancias el ambiente es el agua y en el de la corrosión externa, el ambiente es el suelo en el cual se encuentran enterradas.

La mayoría de las aguas tienen cierta tendencia corrosiva la cual, como ya se mencionara, no sólo depende de sus características físico-químicas sino también de la naturaleza de la “sustancia” que entra en contacto con ella. Así, en un mismo sistema de conducción y distribución, un agua corrosiva para un material, por ejemplo una cañería de hierro galvanizado, puede no serlo para una de cobre.

La corrosión de un material puede deberse tanto a acciones físicas como a acciones químicas que se produzcan entre el mismo y el agua. Una acción física puede ser, por ejemplo, la erosión o desgaste que genera el exceso de velocidad de flujo del agua en un codo de una cañería. Una acción química, es, por ejemplo, la oxidación de una cañería de hierro.

La corrosión puede también ser causada o favorecida por la presencia y desarrollo de organismos dentro del sistema de distribución, ya que estos crean condiciones favorables para que se produzcan tanto acciones químicas como físicas. Por lo tanto, los mecanismos de corrosión en un sistema de distribución son una combinación compleja de estos sistemas o acciones físicas, químicas y biológicas.

La corrosión es, sin duda, uno de los problemas más importantes que se presenta en los servicios de agua potable, ya que no sólo puede afectar los materiales que componen el sistema, sino que además puede ocasionar cambios significativos en la calidad del agua, pudiendo, en algunos casos, afectar la salud pública, la aceptabilidad del agua por parte de los consumidores, y, en general, incrementar el costo del agua producida.

Si bien, como ya se mencionó, los materiales que pueden sufrir corrosión son varios, los que más preocupan a los servicios de agua potable, son los de naturaleza metálica, y en especial los de hierro y sus aleaciones. La corrosión del hierro y el acero se identifica fácilmente por el depósito color rojizo a “herrumbre” o a “aguas rojas” que se produce.

La corrosión de un metal es un fenómeno natural que implica la reversión del mismo a su estado estable original en forma de óxido. Por ejemplo, el hierro refinado tiende a volver a sus formas más estables de óxidos de hierro, que es como se encuentra en la naturaleza.

Las características físico-químicas de algunas aguas y las condiciones que se encuentran en algunos suelos pueden fomentar la corrosión u oxidación y disolución del metal con mayor rapidez que otros. Otras aguas pueden, además, contribuir al desarrollo de un depósito mineral o de óxido protector que evita la corrosión ulterior del metal. Como ya se indicó, las aguas que favorecen la corrosión se denominan aguas corrosivas, mientras que aquellas que no lo hacen (aún sin llegar a ser incrustantes) se denominan aguas no-corrosivas.

Debe recordarse, sin embargo, que no todos los metales tienen la misma tendencia a corroerse al entrar en contacto con una misma agua, es decir que no resulta fácil generalizar en el caso de la corrosión. Sin embargo se ha podido establecer que los factores físicos que influyen sobre la corrosión son la temperatura, la velocidad con que el agua se mueve a lo largo del metal, los cambios de dirección y velocidad del flujo y el contacto con otro metal o no-metal.

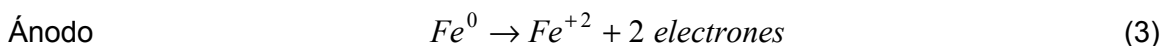
Si bien se ha observado que a mayor temperatura y velocidad del agua, mayor velocidad de corrosión, y que el contacto con otro metal en presencia de humedad intensifica la corrosión de uno o del otro de éstos, existen excepciones y contradicciones a estas generalizaciones que están determinadas, fundamentalmente, por la composición

química del agua, es decir por el tipo y cantidad de sales y gases disueltos en la misma. Entre los factores químicos más importantes se destacan el pH, la alcalinidad, el contenido de oxígeno y anhídrido carbónico disueltos y la conductividad del agua.

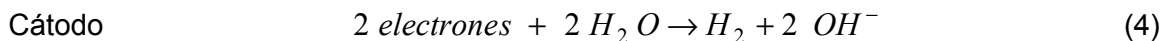
En general, actualmente se considera que la corrosión resulta del flujo de una corriente eléctrica entre dos electrodos – ánodo y cátodo - situados en la superficie metálica. Estos electrodos o zonas electródicas – anódica y catódica – se establecen, como ya se dijo, a causa de factores o características propias del metal y del agua en la superficie de contacto con el metal.

El tamaño de las zonas anódica y catódica y la distancia entre ambas produce distintos tipos de corrosión: si estas son muy pequeñas y se encuentran muy cerca unas de otras, se observa una corrosión generalizada y uniforme sobre toda la superficie metálica y, con frecuencia, la formación de “agua roja”. Por el contrario, si las zonas son grandes y se encuentran distantes unas de otras, la corrosión se produce en forma de “picaduras” con o sin tuberculación.

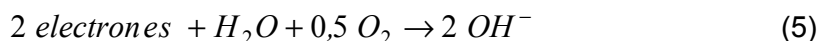
Cuando el metal se corroe, por ejemplo el hierro, pasa, en la zona anódica, de hierro elemental (Fe^0) a ion ferroso (Fe^{++}), disolviéndose, poniendo en movimiento electrones y estableciendo en el metal un potencial eléctrico:



Estos electrones liberados en el ánodo se desplazan o fluyen por el metal hacia la zona catódica, donde participan en la siguiente reacción, generando también otro potencial eléctrico:

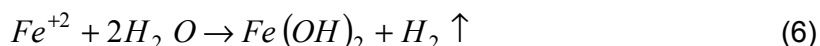


Si el agua contiene oxígeno disuelto la reacción en el cátodo puede representarse como:



Es decir que, independientemente que el agua contenga oxígeno disuelto o no, en el cátodo se genera la misma cantidad de iones hidróxido, por lo que, en el mismo, se mantienen o prevalecen condiciones alcalinas.

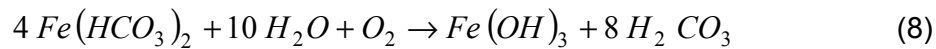
Como se indicó anteriormente, la composición química del agua es fundamental para determinar las reacciones que se pueden producir en una segunda etapa del proceso de corrosión. Así, por ejemplo, si el agua tiene pH y alcalinidad baja, y contiene oxígeno disuelto, el hierro ferroso de la reacción (3) reacciona con el agua para formar hidróxido ferroso.



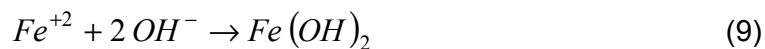
A su vez, el hidróxido ferroso insoluble reacciona de inmediato con el anhídrido carbónico presente en las aguas de baja alcalinidad formando bicarbonato ferroso soluble:



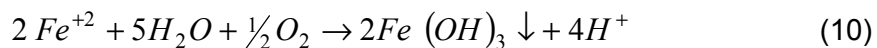
Como el bicarbonato ferroso es soluble, se desprende de la superficie del metal pasando al agua, donde reacciona con el oxígeno disuelto de la misma para formar hidróxido férrico insoluble:



Como esta reacción se produce en el seno del agua, el hidróxido férrico no se deposita sobre la superficie del metal formando una capa protectora, sino que permanece en suspensión como partículas, confiriéndole al agua un color rojizo característico. Por el contrario, si el agua tiene originalmente un pH y alcalinidad más elevados, es decir que no contiene anhídrido carbónico, el ion ferroso de la reacción (3) se combina con los iones hidróxido de la alcalinidad, naturalmente presentes en el agua o que han sido inducidos por el agregado de cal, formando una película insoluble de hidróxido ferroso sobre la superficie del metal, la cual permite controlar la reacción de corrosión.



Si el agua contiene oxígeno disuelto, el ion ferroso se oxida hasta el estado férrico y precipita en forma de hidróxido férrico o herrumbre:



La acidez que se registra en esta zona aumenta la velocidad de disolución del hierro y mantiene una diferencia de potencial elevada entre las zonas anódica y catódica.

La velocidad de corrosión es controlada por la concentración y velocidad de difusión del oxígeno disuelto a la superficie del hierro. Cuanto más elevada sea la concentración de oxígeno disuelto, mayor será la velocidad de difusión, y, de igual forma, cuanto más elevada sea la velocidad del flujo a lo largo de la zona anódica, mayor será la velocidad a la que se aporta oxígeno disuelto a la misma y por lo tanto mayor será la velocidad de corrosión. Es decir que el resultado neto del mayor aporte de oxígeno a la zona anódica es el de incrementar las velocidades de corrosión.

Sin embargo, la difusión del oxígeno al ánodo está limitada en cierta forma por la barrera física que constituye tanto la capa de hidróxido férrico como ferroso que se va formando sobre la superficie, pero, si bien éstas retardan la corrosión, ambas son relativamente porosas y no protegen totalmente las cañerías, aunque estos recubrimientos pueden proteger las cañerías de corrosión ulterior.

El resultado de la corrosión de una cañería, es, entonces la picadura e incrustación sobre la superficie formando lo que se conoce como tuberculación, o la coloración del agua, y, en casos severos, una eventual falla o rotura de la cañería.

En la zona catódica la presencia de oxígeno disuelto altera la condición alcalina de la misma, ya que los iones hidróxido se forman más fácilmente en presencia de oxígeno, por lo que cuanto mayor es la concentración de oxígeno más rápidamente aumenta la concentración de iones hidróxido. También en este caso la velocidad de difusión del oxígeno hacia la zona catódica es función de la concentración del mismo y de la velocidad de flujo del agua a lo largo de la misma.

Sin embargo, según sean las características químicas del agua, la velocidad de difusión del oxígeno disuelto, y en consecuencia la de la corrosión, puede ser reducida. Por ejemplo, si el agua contiene, además de oxígeno, cantidades importantes de calcio y bicarbonato, así como también de carbonato, la velocidad a la que estos iones se transportan hacia la zona catódica y, por lo tanto, hacia el producto de la corrosión, es decir hacia los iones hidróxido, será también mayor. La reacción secundaria neta que se produce entre todos estos componentes del agua es la siguiente:



Este precipitado de carbonato de calcio forma una capa protectora densa que reduce la velocidad de difusión del oxígeno disuelto hasta el cátodo, y por lo tanto, la velocidad de corrosión.

Si bien las reacciones primarias y secundarias que se han discutidos, y que se esquematizan en la **Figura 51**, resumen algunos de los mecanismos que intervienen en el proceso de corrosión de los metales, no contemplan el efecto de muchos otros factores como por ejemplo la conductividad relativa de los iones, el potencial relativo de los distintos metales, la influencia de los iones hidrógeno o hidróxido sobre estos potenciales, la polarización y la difusión de los aniones y cationes presentes en el agua, etc.

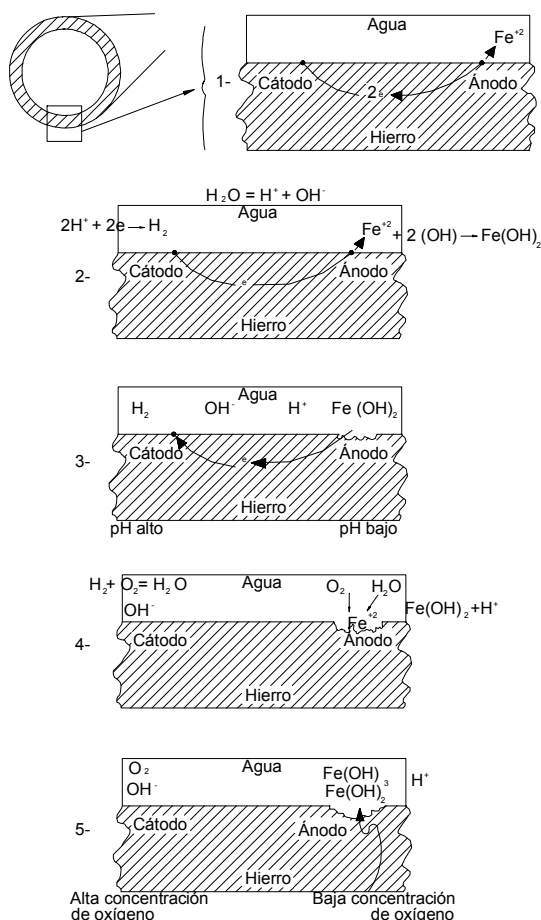


Figura 51. Reacciones eléctricas y químicas que se producen en una celda de corrosión

Por otra parte aún cuando el hierro se considera como el metal típicamente afectado por la corrosión, todos los otros metales, si bien con variaciones significativas, también están involucrados en mecanismos y reacciones similares.

Sin embargo, debido a estas variaciones, la corrosión de los distintos metales en contacto con el agua es distinta para cada uno de ellos.

4.2. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS

Como ya se mencionara, las aguas se pueden clasificar en base al criterio de estabilidad de las mismas. El índice de saturación de Langelier es una de las técnicas más utilizadas para determinar la tendencia de un agua a producir incrustación o corrosión y por lo tanto para clasificarlas.

Este método se basa en el efecto que el pH tiene sobre el equilibrio de solubilidad del carbonato de calcio. El pH al cual el agua está saturada con carbonato de calcio se denomina pH de saturación o pH_s . A este pH_s no se producirá una incrustación de carbonato de calcio ni se disolverá. Esta condición estable se denomina, como se acaba de mencionar, saturación. Este índice, que se puede aplicar dentro de un rango de pH de 6,5 a 9,5, se define como:

$$IS = pH - pH_s$$

donde

IS = índice de saturación de Langelier

pH = pH medido en el agua

pH_s = pH en el punto de equilibrio (saturación de carbonato de calcio)

El pH_s relaciona el pH, el contenido de calcio, la alcalinidad, y la fuerza iónica del agua mediante la siguiente ecuación:

$$pH_s = pH - [(pK'_2 - pK'_s) + pCa^{++} + pAlc]$$

donde:

$(pK'_2 - pK'_s)$ = constantes basadas en la fuerza iónica y temperatura

pCa^{++} = logaritmo negativo de la concentración de ion calcio, en moles por litro

$pAlc$ = logaritmo negativo de la alcalinidad total en equivalentes por litro

El valor del pH_s se puede calcular matemáticamente, o se puede encontrar utilizando un gráfico en el cual se relacionan las concentraciones de dureza cálcica y alcalinidad (expresadas como $CaCO_3$), el pH y la temperatura del agua. Por lo tanto, para calcular o encontrar el valor del pH_s se deben determinar, como mínimo, todos estos factores. Conocido el pH_s , se calcula el Índice de Langelier:

Si el pH del agua es menor que el pH_s , entonces el agua tiene un Índice de Langelier negativo y puede ser corrosiva. Si el pH del agua es mayor que el pH_s , el Índice de Langelier será positivo, es decir que el agua está sobresaturada y que puede precipitar carbonato de calcio, y puede ser incrustante. En cualquiera de los dos casos el agua es inestable.

Cuanto mayor sea la diferencia entre el pH y el pH_s , mayor será la tendencia del agua a formar incrustaciones o causar corrosión. Por lo tanto, un agua con un Índice de Langelier de +0,4 tienen una tendencia a incrustar más fuerte que una con un índice de +0,1. Similarmente, un agua con un Índice de Langelier de -0,4 tiene una tendencia a la corrosión mayor que la que tiene una con un índice de -0,2. Si el pH y el pH_s son iguales, entonces el Índice de Langelier es cero y el agua es estable. No se producirá ni incrustación ni corrosión.

Se estima que un índice de saturación menor de -2,0 indica que el agua es muy corrosiva, y un índice entre -2,0 y -0,1 que el agua moderadamente corrosiva

El valor de $pK'_2 - pK'_s$ está basado en la temperatura y la fuerza iónica, la cual se puede determinar a partir de tablas que se encuentran en la literatura, y en donde se dan los valores de esta diferencia para distintas concentraciones de Sólidos disueltos totales (mg/l) y para distintas temperaturas. La fuerza iónica de una agua se calcula como:

$$\text{Fuerza iónica} = 0,5 (C_1 Z_1^2 + C_2 Z_2^2 + \dots + C_n Z_n^2)$$

donde:

C = concentración de una especie iónica, en moles por litro

Z = valencia del ion en particular de esa especie

Si bien el índice de saturación de Langelier es uno de los más utilizados en la industria del agua potable, presenta una serie de limitaciones que impiden, en varios casos, predecir correctamente la tendencia corrosiva o incrustante de un agua. Por ejemplo, en el cálculo de este índice no se tiene en cuenta que el calcio se acompleja con el bicarbonato; se asume que la forma cristalina del carbonato de calcio es fundamentalmente calcita, aún cuando se ha observado la formación de aragonita, que es mucho más soluble que la calcita y otras formas que explicarían la significativa sobresaturación con respecto a la calcita, etc. Varios autores han intentado introducir modificaciones en ecuación que define el índice, con mayor o menor éxito.

Como se mencionó, existen otros índices para determinar la corrosividad o tendencia incrustante de un agua, como por ejemplo el índice de saturación de Ryznar y un índice de saturación general que usualmente se conoce como índice de desequilibrio. Sin embargo, tanto estos índices como el de Langelier solo deben utilizarse como uno más de varios datos para determinar las características corrosivas o incrustantes de un agua.

Este dato debe complementarse con observaciones de las cañerías que se reemplazan luego de haber estado en uso, con información analítica sobre los productos de la corrosión disueltos y en suspensión, consideraciones sobre factores químicos específicos del material que podrá entrar en contacto con el agua, y siempre que sea posible, con información obtenida en ensayos de laboratorio, como por ejemplo con circuitos cerrados de cañerías.

4.3. TIPOS DE CORROSIÓN

En los sistemas de distribución de agua, se pueden producir varios tipos de corrosión. Que se produzca una u otra dependerá del tipo de material, el diseño y construcción del sistema, de que se formen o no incrustaciones o películas de óxidos sobre la superficie afectada y de las condiciones hidráulicas del sistema.

En una primera clasificación los tipos de corrosión se pueden agrupar, según afecten las paredes interiores o exteriores de las cañerías y accesorios, en:

- *Corrosión interna* – causado por las características agresivas del agua que fluye a través de las cañerías y la hidráulica del sistema; y
- *Corrosión externa* – causada por las condiciones químicas y eléctricas del suelo en el cual se instala la cañería.

4.3.1. Corrosión Interna

La corrosión interna, generalmente de tipo electroquímica, de los sistemas de distribución involucra, como ya se indicó, una serie de mecanismos complejos. Ha sido y es uno de los problemas más importantes que enfrentan los servicios de agua con cañerías de hierro fundido, tanques de almacenamiento metálicos y otros tipos de superficies metálicas sin revestir. Si bien ya prácticamente no se utiliza este tipo de cañerías, aún siguen siendo un problema a la hora de reemplazar parte de las existentes.

Los principales factores que afectan la velocidad y severidad del proceso de corrosión interna se pueden dividir en factores físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, todos estos factores interactúan de forma compleja para inducir la corrosión o incrementar su velocidad.

Factores físicos

Los más importantes son:

- Velocidad del flujo del agua, y
- la temperatura.

Entre estos tipos de factores también se incluyen las características que presentan ciertos materiales, producto de los procesos de fabricación de los mismos.

El efecto de la velocidad del agua sobre la corrosión es bastante contradictorio, y está condicionado por las características del agua. Por ejemplo, cuando las aguas poseen características agresivas, a mayor la velocidad del agua, más rápido se corroe el material. Por el contrario, a igual velocidad, cuando la agresividad del agua es menor, reduciéndose la velocidad de corrosión, o un agua que no produce corrosión significativa a velocidades moderadas o altas, puede producirla a una velocidad moderada o lenta.

En el caso de la temperatura aunque tampoco se puede generalizar, se observa que a mayor temperatura las reacciones proceden más rápidamente, y disminuye la velocidad de solubilización de los minerales. También debe considerarse el efecto de la

temperatura sobre el pH. Estos efectos también están muy relacionados con las características químicas del agua, especialmente con la alcalinidad.

La temperatura puede también afectar la naturaleza de la corrosión, así, mientras un agua produce corrosión en forma de picaduras a bajas temperaturas, puede generar corrosión uniforme a temperaturas elevadas. Dado que la temperatura influye sobre las constantes de solubilidad de los minerales, así como también sobre el pH, los cambios de temperatura pueden favorecer la precipitación de diferentes fases sólidas o cambiar la naturaleza de los productos de corrosión, lo que puede, a su vez, resultar en una mayor o menor acción protectora sobre las cañerías.

El grado de protección depende del tipo de material del que está hecha la cañería y de las características del agua que entra en contacto con la misma.

Muchos de los materiales que se utilizan en los sistemas de distribución de agua poseen características que han sido inducidas durante el proceso de fabricación de las piezas. Estas características determinan, a su vez, el tipo de corrosión que se producirá y la vida útil de las piezas. Por ejemplo, la distribución de los componentes en las fundiciones de hierro; las impurezas que pudieran estar presentes en las soluciones de inmersión de los procesos de galvanizado; las características de la capa protectora o revestimiento galvánico (espesor, discontinuidades, etc.), favorecerán uno u otro tipo de corrosión.

Factores químicos

Como ya se mencionó, la cantidad y tipo de compuestos disueltos en el agua afectan significativamente la velocidad y grado de corrosión de los materiales que entran en contacto con la misma. Entre los más importantes se pueden mencionar a:

- pH
- Alcalinidad y el carbono inorgánico disuelto
- Oxígeno
- Cloro residual
- Conductividad o sólidos disueltos totales
- Dureza
- Cloruros y sulfatos
- Ácido sulfhídrico
- Amoníaco
- Sílice
- Compuestos orgánicos naturales, incluyendo aquellos que confieren color al agua
- Hierro, cinc y manganeso
- Magnesio, y otros metales que se encuentran presentes en agua en trazas

Las aguas ácidas (bajo pH) pueden aumentar la velocidad de corrosión, mientras que las aguas muy alcalinas pueden proteger las cañerías, y en consecuencia, disminuir la

velocidad de corrosión, pero podrían también, causar la descincificación (pérdida de cinc) en los latones.

La alcalinidad y el carbono inorgánico disuelto, contribuyen a la formación de películas protectoras y otorgan capacidad buffer al agua, controlando los cambios de pH. Las aguas con alcalinidad baja a moderadas no son corrosivas para la mayoría de los materiales, mientras que si la alcalinidad es elevada, son especialmente agresivas hacia el plomo y el cobre.

El contenido de oxígeno disuelto influye sobre muchas de las reacciones de corrosión, observándose que, en general, a mayor concentración de oxígeno, mayor velocidad de corrosión.

El cloro residual presente en las aguas, especialmente en el caso de las aguas de baja alcalinidad, es específicamente agresivo para el cobre, el hierro y el acero. Esto se debe a que al pasar en solución, el cloro gaseoso, genera ácido hipocloroso, ion cloruro e hidrogeniones, disminuyendo el pH y, en consecuencia, volviendo al agua, potencialmente más corrosiva. Este efecto es menor cuando el agua tiene una capacidad buffer capaz de controlar los cambios de pH.

Cuanto más mineralizadas son las aguas, es decir, cuanto mayor es la conductividad de las mismas, más rápidamente se desarrollan los procesos de corrosión.

La dureza del agua contribuye a la formación de una capa protectora de carbonato de calcio, reduciendo la velocidad de muchos de los procesos de corrosión. También puede incentivar la capacidad buffer del agua, conjuntamente con la alcalinidad y el pH.

La presencia de cantidades importantes de iones sulfato y cloruro en el agua, la vuelven particularmente agresiva hacia el hierro, cobre, y hierro galvanizado.

El ácido sulfhídrico aumenta la velocidad de corrosión ya que reacciona con los iones metálicos, formando sulfuros insolubles que no tienen propiedades protectoras. Es especialmente agresivo hacia las cañerías de hierro, acero, cobre y hierro galvanizado, las que deteriora produciendo "agua negra", aún en ausencia de oxígeno. Con determinados tipos de agua, el SH_2 ha demostrado ser, también, agresivo hacia las cañerías de asbesto-cemento, pero, probablemente a través de mecanismos en los que participan microorganismos.

Como el amoníaco se acompleja con muchos metales en solución, especialmente con el cobre y, posiblemente, el plomo, podría, en principio, interferir en la formación de las películas protectoras, aumentando la velocidad de corrosión.

Si el agua contiene, naturalmente, cantidad de sílice suficiente como para que al reaccionar con los subproductos de la corrosión pueda formar silicatos insolubles que precipiten sobre la superficie metálica, podrá formar una capa protectora más densa y por lo tanto, reducir la corrosión.

El contenido de materia orgánica natural del agua puede afectar la corrosión de distintas formas. Así, algunos compuestos reaccionan con la superficie metálica formando una película que la protege de la corrosión. Otros, en cambio, pueden reaccionar con los productos de la corrosión o formar complejos con el calcio impidiendo que forme la capa protectora de carbonato de calcio. Por otra parte, la presencia de materia orgánica contribuye al desarrollo de organismos en los sistemas de distribución los que, a su vez,

se ha observado favorecen o intervienen en varios procesos de corrosión, como se discutirá más adelante, aumentando, por lo tanto, la corrosión. Si bien los efectos mencionados se han observado en la práctica, no se ha podido determinar bajo que condiciones se producirá uno u otro.

El hierro, cinc y manganeso presentes en el agua que fluye por cañerías de asbesto-cemento contribuyen, en cierta medida, a reducir la corrosión. Aparentemente, estos metales en solución reaccionarían con la matriz de cemento de la cañería formando una capa protectora que impide su deterioro posterior. Sin embargo, aún no se conocen bien los mecanismos de interacción de estos metales. Si el agua contiene, naturalmente, cierta cantidad de hierro disuelto, no solo se reduce la velocidad de corrosión de las cañerías de asbesto-cemento, sino que, además, fija las fibras de asbesto a la superficie de las mismas.

Tanto el magnesio como algunos otros metales presentes en las aguas en cantidades muy bajas (trazas), tales como el cinc, interfieren con la formación del precipitado de carbonato de calcio en forma de calcita, formándose en su lugar, aragonita o algunas calcitas de magnesio, depósitos éstos que son, como ya se indicó, más densos y solubles que la calcita. A pesar de estas propiedades, no se conoce si estas formas del carbonato de calcio y/o magnesio, protegen mejor las cañerías que la calcita.

Factores biológicos

Las bacterias sulfato-reductoras juegan una función muy importante en los procesos de corrosión que se desarrollan tanto dentro como fuera de las cañerías, siendo más evidente la corrosión exterior de las mismas. Sin embargo con las nuevas técnicas de ensayo desarrolladas para determinar la presencia de estos microorganismos, se ha podido demostrar que, frecuentemente, se encuentran dentro de los sistemas de distribución, aún en presencia de oxígeno o cloro.

Esto se debe, posiblemente a que, en general se encuentran albergadas dentro de los tubérculos, donde se desarrollan condiciones de anaerobiosis que favorecen el desarrollo de las mismas, protegiéndolas de la acción del oxígeno o el cloro. Estas bacterias, aparentemente, actúan como catalizadores de la reacción de reducción del sulfato que se produce en el cátodo. Se ha observado además, que las bacterias sulfato-reductoras solo se desarrollan en presencia de hidrógeno si existe, también, materia orgánica presente, pero que el hidrógeno favorece el desarrollo de las mismas.

Por otra parte se está investigando si el ion ferroso puede contribuir a este desarrollo. La oxidación del ion ferroso y su precipitación como magnetita (Fe_3O_4), y la generación de sulfuro ferroso, aumentarían la concentración de hidrogeniones, aumentando la acidez y, en consecuencia, incrementarían la velocidad de corrosión del hierro. Algo similar ocurre con las bacterias nitrificantes, que al transformar el amoníaco en nitrito, el cual, posteriormente, reacciona con el oxígeno, para dar nitrato, generándose también en el proceso hidrogeniones, que aumentarían la acidez de la zona favoreciendo los procesos corrosivos. Sin embargo, aún no se ha podido establecer cuanto influyen estos procesos biológicos en la corrosión, como tampoco existen evidencias sobre el rol que efectivamente cumplen estas bacterias en la misma.

4.3.2. Corrosión Externa

A la hora de seleccionar el tipo de cañerías y accesorios a emplear, se debe tener siempre en cuenta las características del suelo en la cual se instalarán. Las características químicas y físicas del suelo varían no sólo de una región a otra, sino que también lo pueden hacer y significativamente dentro de una misma zona. La frecuencia y severidad del proceso de corrosión externa depende del tipo de suelo, de la ubicación de la cañería y del tipo de cañería, es decir de la naturaleza del material con el cual están fabricadas.

Si bien, en general, las cañerías de asbesto-cemento y de distintos tipos de plásticos son menos susceptibles a la corrosión externa, las primeras de éstas pueden sufrir corrosión bajo determinadas condiciones del suelo. Las cañerías de acero y de hierro fundido requieren de algún tipo de revestimiento que las proteja de la mayoría de los suelos.

La corrosión externa de las cañerías y accesorios metálicos también puede ser de tipo electroquímica y los mecanismos que la producen son similares a los que causan la corrosión interna, algunos de los cuales ya se discutieron anteriormente. Estos implican reacciones químicas y un flujo simultáneo de corriente eléctrica entre las zonas anódica y catódica.

Como ya se indicó, estas dos zonas, que constituyen una pila o celda de corrosión, resultan de la diferencia de potencial que se establece en la superficie del metal enterrado, debido a diferencias entre ésta y el suelo. La corriente eléctrica continua va desde la zona anódica a la catódica a través del suelo, retornando al ánodo a través del metal.

Las cañerías metálicas presentan, usualmente, impurezas, imperfecciones y granos en la superficie que favorecen la formación de las celdas de corrosión. Estas celdas también se forman debido a diferencias en la concentración de oxígeno en el suelo.

La corrosión externa, por lo general, se produce en forma de picado, es decir de agujeros microscópicos, o zonas muy pequeñas localizadas en la superficie. Estos picados se forman, como ya se mencionó, en la zona anódica, donde se pierde el metal.

Si bien las zonas afectadas pueden ser pequeñas, cuando el proceso de corrosión es severo se perfora la pared de la cañería, produciéndose pérdidas de agua y roturas que requieren el reemplazo total del caño afectado.

También en el caso de la corrosión externa, la severidad de la misma y el tamaño de las áreas afectadas, son función de la cantidad, relación de superficie entre las zonas anódica y catódica e intensidad de la/s celda/s de corrosión, las que, a su vez, dependen de la agresividad o corrosividad del suelo. Entre las principales características del suelo que influyen sobre la velocidad y severidad del proceso de corrosión se pueden destacar las siguientes:

- Contenido de humedad
- Aireación (concentración de oxígeno)
- Textura del suelo
- Resistividad eléctrica

- Contenido de materia orgánica
- Concentración de cloruros y sulfatos (componentes que afectan la conductividad eléctrica del suelo)
- pH
- Presencia de sulfuro
- Presencia de bacterias anaeróbicas

Si bien tampoco en este caso es posible generalizar con precisión con respecto a como estos factores afectan el proceso de corrosión, si se ha observado que muy posiblemente el grado y velocidad del corrosión aumentan cuanto mayor sea el contenido de humedad, de materia orgánica, de cloruros y/o sulfatos, menor la concentración de oxígeno (aireación escasa), más fina la textura y más baja la resistividad del suelo. Tanto la presencia de sulfuros y de bacterias anaeróbicas (bacterias del hierro y sulfato-reductoras) como los suelos muy ácidos o muy alcalinos favorecen la corrosión. La mayoría de estos factores, los que están muy relacionados entre sí, determinan la resistividad eléctrica del suelo, la cual sirve para comparar la agresividad o corrosividad de un suelo con respecto a otros.

La cantidad de metal que se disuelve en el ánodo es proporcional a la intensidad de la corriente que circula en la celda de corrosión, la cual es, a su vez, inversamente proporcional a la resistividad del suelo y directamente proporcional a la conductividad del mismo. Es decir que un suelo de baja resistividad o de alta conductividad favorecerá el flujo de corriente eléctrica aumentando la cantidad de metal que se pierde.

Ambos parámetros – resistividad y conductividad – se pueden determinar in-situ, lo que permite determinar, a priori, que tipo de cañería se puede instalar en el suelo y si es necesario aplicar algún tipo de protección a la misma.

4.3.3. Tipos de Corrosión

Tanto la corrosión interna como la externa se pueden, a su vez, clasificar en función de la forma en que se presentan las mismas y en función del mecanismo o causa que las origina, a saber:

- Corrosión uniforme.
- Picado o corrosión crateriforme.
- Corrosión galvánica.
- Pila de concentración.
- Corrosión con tubérculos.
- Corrosión en fisuras o grietas.
- Corrosión por erosión.
- Corrosión por cavitación.

- Desaleación o lixiviación selectiva.
- Grafitación.
- Tensocorrosión.
- Corrosión inducida por microorganismos.
- Corrosión por corrientes parásitas (vagabundas).

Corrosión uniforme

Este tipo se produce, generalmente, a la misma velocidad en toda la superficie. Para explicar este tipo de corrosión en el caso de un solo tipo de metal, se utiliza un modelo según el cual cualquier punto sobre la superficie metálica se puede comportar como ánodo o como cátodo alternativamente. Las zonas anódicas van pasando de un lugar a otro en la superficie metálica, haciendo que la velocidad a la cual se pierde el metal sea relativamente uniforme sobre toda ella.

La aparición de estas celdas de corrosión, cuyos ánodos y cátodos son, como ya se mencionó, de pequeño tamaño y muy próximas unos de otros, se debe a la heterogeneidad propia del metal en el cual existen diferencias de potencial producto de diferencias en la estructura cristalina o imperfecciones del mismo, como así también, a diferencias de concentración de los compuestos oxidantes y reductores en la solución acuosa, las que inducen diferencias de potencial momentáneas.

Existe otro modelo que también se ha empleado para explicar la corrosión uniforme de metales, el cual supone que la oxidación de la superficie del metal se produce simultáneamente con un transporte de electrones (o pasaje de corriente) a través de una película adherida a dicha superficie. En este caso, la existencia y características de la película de óxidos o el transporte de los productos de la reacción, en particular del ion hidróxido, desde la interfase solución-película, determinan la velocidad global del proceso corrosivo.

Picado o corrosión crateriforme

Este tipo de corrosión, que es más común que la anterior, no se produce uniformemente sobre toda la superficie de la cañería, sino que, tal como se mencionó, se localiza en puntos determinados formando picaduras más o menos profundas y anchas según el tamaño relativo de la zona anódica y catódica. La picadura se produce en una zona anódica pequeña, casi un punto, localizada y rodeada por una extensa zona catódica.

Si bien la pérdida de metal en estos casos no es significativa, rápidamente se puede perforar la pared de la cañería resultado en pérdidas y roturas.

El picado se desarrolla en aquellos puntos de la superficie de las cañerías o accesorios que presentan marcas, imperfecciones, depósitos no adheridos, o en donde el revestimiento protector que pudieran tener ha desaparecido.

Este tipo de corrosión se puede relacionar con las corrosiones de tipo galvánicas, de pilas de concentración y de fisuras o grietas, que se discutirán a continuación. Por ejemplo, el acero y el acero galvanizado se corroen debido a la presencia de muy bajas concentraciones de metales solubles, como el cobre, que se depositan sobre la cañería e

inducen una corrosión tipo galvánica. Altas concentraciones de ion cloruro producen picaduras aún en los aceros inoxidable.

Corrosión galvánica

Este tipo de corrosión se produce al conectar componentes hechos de dos metales electroquímicamente diferentes, como, por ejemplo, cuando se conectan caños de hierro galvanizado a una cañería de cobre sin la correspondiente unión aislante. Los dos metales, que tienen potenciales de disolución distintos se encuentren o no en un mismo ambiente, forman una celda de corrosión, o más exactamente, una celda o pila galvánica al volverse uno anódico con respecto al otro que pasa a ser el cátodo. Como ya se ha visto, el material anódico se corroe, perdiéndose, mientras que el catódico prácticamente no lo hace, quedando en cierta forma protegido por el anódico. En la **Tabla 6**, siguiente se muestra una serie electroquímica que incluye los materiales más frecuentemente utilizados en la fabricación de cañerías y accesorios.

Cada metal es anódico a, y puede ser corroído por, cualquier metal que se encuentre por debajo de él en la lista. En iguales condiciones, cuanto más distantes estén dos metales en la serie, mayor será el potencial de corrosión y mayor la velocidad de corrosión.

Material	Potencial de corrosión
Extremo anódico (extremo que se corroe)	Más activo
Magnesio	
Aleaciones de Magnesio	
Cinc	
Aluminio	
Aleaciones de Aluminio	
Cadmio	
Acero al carbono	
Hierro fundido	
Acero inoxidable (activo)	
Soldadura blanda	
Plomo	
Estaño	
Latones	
Cobre	
Aleaciones de Níquel-Cobre	
Acero inoxidable (pasivado)	
Titanio	
Grafito	
Extremo catódico (extremo protegido)	Menos Activo

Tabla 6. Serie galvánica para materiales utilizados en los sistemas de agua

Este tipo de corrosión forma, generalmente, picaduras en el metal anódico. El tamaño de las picaduras disminuye al aumentar la distancia desde la unión de los dos metales. La severidad de la corrosión galvánica depende de las cantidades relativas de área superficial de cada metal involucrado y de la resistividad del suelo que rodea la zona afectada o de la conductividad del agua en contacto con los mismos. Una superficie grande de metal catódico conectado a una superficie pequeña de metal anódico, como se muestra en el esquema de la **Figura 52**, puede resultar en la corrosión rápida del metal

anódico. Por el contrario, un cátodo pequeño conectado a un ánodo grande, como se esquematiza en la **Figura 53** reduce, en cierta forma la severidad de la corrosión. Sin embargo, aún así, se puede producir una rápida corrosión en el punto donde el metal anódico se une al material catódico. En general, a igualdad de condiciones, la velocidad de corrosión resultante de una conexión bimetalica será mayor en suelos de baja resistividad que en suelos de alta resistividad.

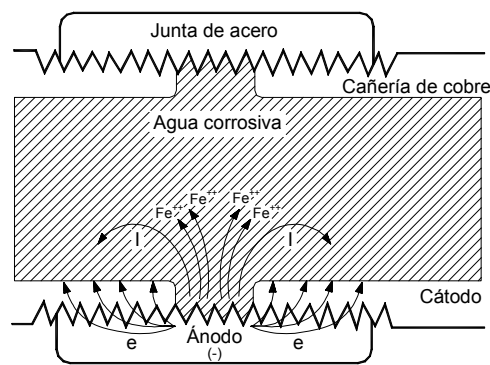


Figura 52. Anodo pequeño - Cátodo grande

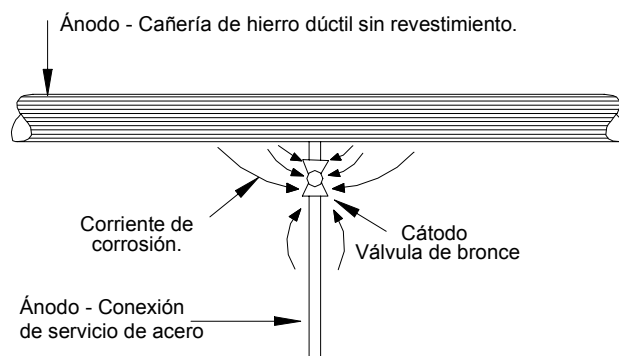


Figura 53. Relación superficial ánodo - Cátodo favorable

Pilas de concentración

La corrosión por pilas de concentración es, posiblemente, el tipo de corrosión que más frecuentemente se produce, pero como es muy difícil de determinar in-situ, normalmente se la determina por medios indirectos. Este tipo de corrosión se inicia cuando se producen diferencias en la concentración total o en el tipo de minerales presentes en el medio ambiente.

Por ejemplo, diferencias de pH, de contenido de iones metálicos, de aniones y oxígeno disueltos, como así también las diferencias de temperatura causan diferencias en el

potencial de la solución del mismo metal. Los mecanismos de corrosión tienden a equilibrar la concentración de las especies que generan la pila.

Como ya se mencionó anteriormente, cuando las aguas contienen oxígeno disuelto, los productos de corrosión se depositan en la zona anódica y, por ejemplo, en la etapa de oxidación secundaria del catión ferroso a férrico y posterior hidrólisis se generan hidrogeniones, disminuyendo el pH en dicha zona, induciendo una pila de concentración de estos iones y, en consecuencia, aumentando la velocidad de corrosión. Además, el oxígeno disuelto al reaccionar con el ion ferroso no se puede difundir hasta o penetrar en la superficie anódica, por lo cual, en esta zona no existe oxígeno.

En cambio éste sí se puede difundir hasta la zona catódica originando así una pila de concentración de oxígeno, lo que aumenta la velocidad de corrosión en la zona que carece de oxígeno, es decir en la anódica. También se mencionó anteriormente que, en la zona catódica se producen iones hidróxido, resultando en una disminución significativa de la concentración de hidrogeniones y, en consecuencia, intensificando la pila de concentración debida a los hidrogeniones presentes en la zona anódica.

Si bien el oxígeno disuelto suele incentivar la corrosión, se debe recordar que la disolución o pérdida de metal se produce en la zona anódica, es decir, donde no se registra oxígeno disuelto.

Cuando se acumulan depósitos, suciedad, etc. sobre la superficie metálica, se impide o dificulta la difusión del oxígeno, por lo que se produce corrosión debajo de los mismos. Es decir que, todo depósito no adherido al metal puede generar una serie de eventos que resultan en la aparición de una pila de concentración de oxígeno, y consecuentemente, en la corrosión del metal.

Corrosión con tubérculos

Este tipo de corrosión se presenta cuando los productos de la corrosión por picado se depositan y acumulan en la zona anódica. La composición química de estos depósitos depende del metal que se corroe, por ejemplo en las cañerías de hierro o acero, como ya se viera, aparecen depósitos de varios tipos de óxidos e hidróxidos de hierro. Los tubérculos de este tipo presentan una coloración típica a herrumbre (rojiza) y una consistencia más blanda en el exterior, volviéndose cada vez más duros y oscuros en su interior. En las cañerías de cobre, en cambio, presentan una coloración verdosa a azul-verdosa.

Estos tubérculos, si bien no afectan la calidad del agua, pueden desprenderse de las cañerías debido a cambios en la dirección del flujo o al ser golpeadas, ocasionando obstrucciones en el sistema de distribución, e inclusive, en las instalaciones domiciliarias. Debido a esta particularidad, este tipo de corrosión solo se puede determinar por observación directa de trozos de cañería extraídos del sistema o sospecharse su presencia debido a la progresiva pérdida de la capacidad de conducción de las cañerías. Si la formación de tubérculos es significativa, puede llegar a obstruir totalmente el sistema de distribución.

Corrosión en fisuras o grietas

Este tipo de corrosión es, en realidad, una forma de corrosión por pila de concentración de oxígeno, ya que se produce en el fondo de fisuras o grietas o en la zona de contacto de dos superficies metálicas del mismo tipo que presentan irregularidades, donde el

oxígeno no alcanza a penetrar o cuando es consumido antes por el proceso de corrosión. Una vez inducida la pila de concentración se comienza a corroer la fisura.

Corrosión por erosión

Este tipo de corrosión se produce cuando se dan simultáneamente una combinación específica de materiales y de características del agua, con determinadas condiciones hidráulicas en el sistema. Elevadas velocidades de flujo o cambios bruscos de dirección del mismo, o la presencia de sólidos en suspensión que se comportan como abrasivos, pueden desprender o erosionar los revestimientos protectores de las cañerías o la capa protectora formada por los productos de la corrosión, dejando la superficie metálica o de otro material, expuesto a los ataques corrosivos. La erosión puede, también, ser producto de la fricción externa o interna entre dos superficies metálicas.

Corrosión por cavitación

Si bien la corrosión por cavitación se produce bajo condiciones similares a la de erosión, ésta se presenta, típicamente, en aquellas zonas internas a las cañerías de los sistemas de distribución donde las elevadas velocidades de flujo y reversión drástica del mismo, inciden con mayor intensidad, por ejemplo, aguas abajo de restricciones en las cañerías provocadas por la presencia de una válvula o protusión de una junta.

Las condiciones hidráulicas mencionadas, producen burbujas de gas y redisolución de los gases. Así, por ejemplo, cuando las burbujas contienen oxígeno y/o anhídrido carbónico forman una película sobre la superficie del agua en la cual la concentración de estos gases es superior a la del agua, induciendo, en consecuencia, pilas de concentración que resultan en aumento de la velocidad de corrosión.

Desaleación o lixiviación selectiva

La desaleación consiste en la remoción selectiva de uno o más metales que constituyen una aleación o que están presentes en la misma como impurezas, en presencia de condiciones corrosivas. La lixiviación de cinc de los latones, o descincificación, y la del plomo diseminado en el bronce, son ejemplos típicos de este tipo de corrosión.

Las aguas con bajo contenido de dureza, inestables y con elevada concentración de anhídrido carbónico son especialmente corrosivas para las aleaciones de cobre-cinc: metal de Muntz y bronce amarillo.

El proceso de lixiviación selectiva de metales de las juntas soldadas se produciría de acuerdo a mecanismos similares a los de las aleaciones.

La disolución de las cañerías de asbesto-cemento o del revestimiento de cemento de las de hierro causada por aguas agresivas se consideran, también, como procesos de lixiviación selectivo en los cuales los componentes solubles de los mismos como, por ejemplo, la cal libre, carbonatos de calcio y varios tipos de silicatos y alumino-silicatos, pasan al agua.

Si este tipo de corrosión es muy severa, puede afectar la calidad del agua potable al incorporar, por ejemplo, metales en concentraciones superiores a los valores límites permitidos por las normas. También debilitan las paredes de las cañerías provocando la rotura de las mismas.

Grafitación

Este tipo de corrosión se produce internamente cuando se combina la presencia de un agua de elevada conductividad o de muy bajo pH con cañerías de hierro fundido. Durante este proceso se remueve la aleación hierro-sílice que conforma una de las fases de la microestructura del hierro fundido, quedando una masa negra, esponjosa y dura de grafito.

El grafito al encontrarse disperso en la fundición, forma varios cátodos o zonas catódicas pequeñas, mientras que la aleación hierro-sílice se comporta como ánodo, formándose varias celdas de corrosión pequeñas. Debido a como se fabrica la fundición de hierro, la microestructura del mismo no es uniforme, y es muy posible que en la superficie de las piezas la cantidad de grafito presente sea menor que en el centro de las mismas, por lo cual, en las zonas mecanizadas de las piezas, se observa una menor resistencia a la corrosión.

Las cañerías y accesorios de hierro fundido presentan una gran resistencia a la corrosión externa debida probablemente a que, conjuntamente con los productos iniciales de la corrosión, precipitan silicatos formando una película protectora.

Tensocorrosión

Al ser sometido los metales o aleaciones a esfuerzos de tracción, los revestimientos que los protegen se rompen, y la zona expuesta se comporta como ánodo, dando lugar a la corrosión de los mismos. La corrosión suele ser más rápida cuando los esfuerzos se producen en forma alternada que cuando el material está sometido a un esfuerzo continuo. Este efecto de las tensiones, generalmente externas, se ejerce también sobre los depósitos protectores que se forman sobre la zona anódica de las celdas de corrosión acelerando el proceso de corrosión.

Corrosión Biológica

Como ya se mencionó, la actividad metabólica de algunos microorganismos afectan el proceso de corrosión de los metales en varios ambientes (agua, interior tubérculos, suelo) habiéndose observado que la velocidad de corrosión aumenta en presencia de los mismos. Los mecanismos por los cuales se produce la corrosión son varios, especialmente en el caso de las bacterias.

Por ejemplo, durante el crecimiento de las bacterias nitrificantes se consume oxígeno, por lo que se generan pilas de concentración de oxígeno que dan lugar a una corrosión en forma de picado. Durante este proceso se generan, además, iones hidrogeniones que elevan la acidez, favoreciendo la corrosión de la zona anódica. Las bacterias del hierro y las sulfato-reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*, *Desulfovibrio orientis*, *Clostridium nigrificans*, etc.) también inducen corrosión, siendo estas últimas responsables de la corrosión que se sigue produciendo dentro de los tubérculos. Esta actividad microbiana es responsable por muchos de los reclamos de los consumidores ya que no solo afectan el sabor y olor del agua, sino que también imparten color a la misma (aguas rojas).

El control del desarrollo de estos organismos dentro de los sistemas de distribución no es una tarea sencilla ya que éstos pueden estar albergados dentro de los tubérculos, en fisuras mecánicas, etc., donde están protegidos contra la acción de los desinfectantes, requiriéndose, con frecuencia, métodos de limpieza mecánicos para removerlos. El desarrollo de estos microorganismos, que se concentran en la superficie de depósitos y

sedimentos presentes en las cañerías es, principalmente y como se discutiera anteriormente, función de la concentración de carbono orgánico total y de oxígeno en el agua.

Corrosión por Corrientes Parásitas (Vagabundas)

Este tipo de corrosión se debe a corrientes eléctricas continuas que dejan su circuito específico, acumulándose en las cañerías para luego descargarse en el suelo. La **Figura 54** esquematiza un ejemplo típico de corrosión por corrientes parásitas. Los sistemas de protección catódica y otros tipos de fuentes de corriente eléctrica continua, también pueden causar interferencia, induciendo este tipo de corrosión.

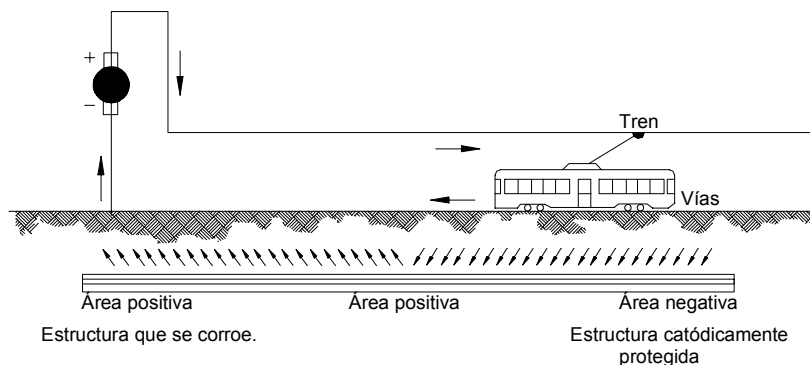


Figura 54. Corrosión por corrientes parásitas

Por lo general la corrosión es externa y toma forma de picaduras o cráteres profundos, localizados en un área anódica relativamente reducida de la cañería. Desde estos ánodos la corriente deja el metal para retornar a la fuente de energía. Este tipo de corrosión aparece, también, en el interior de las canillas o grifos domiciliarios y en las válvulas.

Este tipo de corrosión es muy difícil de determinar ya que la corrosión puede producirse muy lejos de la fuente de energía. En general, la corrosión por corrientes parásitas y su control, son temas técnicos complejos que requieren de la participación y asesoramiento de expertos en el tema, de lo contrario muchas de las medidas de control que se implementen o prevean pueden producir el efecto inverso, es decir, pueden acelerar el proceso de corrosión de los sistemas.

4.4. MÉTODOS PARA EL CONTROL DE LA INCRUSTACIÓN Y LA CORROSIÓN

Las decisiones sobre la necesidad y tipo de métodos para la prevención de la incrustación o corrosión se basan en condiciones únicas para cada caso en particular. Si bien algunas áreas pueden requerir de conocimientos especializados, se pueden establecer algunas generalidades y recomendaciones.

Para los proyectos de sistemas de distribución en áreas de servicio nuevas, además de los estudios sobre las características químicas del agua y los tipos de materiales, en el caso de la corrosión, se deben utilizar además, ensayos de suelo para estimar la corrosividad del mismo. En la etapa del planeamiento se deben revisar todos aquellos factores que puedan resultar en uno u otro tipo de problema –incrustación o corrosión. Algunos de estos factores son, por ejemplo: estabilidad del agua, conexiones bimetálicas, revestimiento de cañerías, existencia de posibles fuentes de corrientes parásitas en la zona, etc.

Para la expansión o reemplazo de cañerías en zonas ya servidas, los registros de pérdidas, roturas, obstrucciones, los de reclamos de clientes y la experiencia de los operarios, son buenos indicadores de los problemas de incrustación o corrosión que se pueden anticipar. Una evaluación detallada de las condiciones exteriores e interiores de los trozos de caños removidos de los sistemas de distribución es muy útil para determinar la severidad de la incrustación o corrosión que se está produciendo. Se pueden utilizar una serie de ensayos para determinar la velocidad de corrosión o de incrustación interna en las cañerías o determinar la pérdida de peso de una sección de la misma.

En general, los métodos para el control de la incrustación y de la corrosión se pueden agrupar en métodos de:

- Control por diseño
- Control por modificación del ambiente
- Control por técnicas electrolíticas

4.4.1. Control por Diseño

Tanto la selección de los materiales que compondrán un sistema como el diseño del mismo, son críticos para evitar o controlar los procesos de corrosión o incrustación. Algunas de los aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de diseñar los sistemas son:

- Selección apropiada de los materiales
 - Materiales resistentes a la corrosión
 - Espesor apropiado de la pared de las cañerías y/o tanques
 - Materiales compatibles (evitando conexiones bimetálicas o colocando entre ambos metales la correspondiente aislación).
- Selección de velocidad de flujo adecuada
- Eliminación de zonas muertas o de estancamiento
- Eliminación de codos y curvas cerradas
- Colocación de drenajes
- Utilización de soldaduras en lugar de remaches
- Reducción de tensiones mecánicas

- Construcción de accesos a las estructuras del sistema para inspecciones periódicas, mantenimiento y reemplazo de las partes deterioradas o dañadas.

4.4.2. Control por Modificación del Ambiente

Dentro de este grupo de técnicas de control se encuentran las siguientes:

- Tratamiento químico del agua, a saber:
 - Ajuste de pH/alcalinidad. Para esto se puede utilizar cal, hidróxido de sodio, carbonato de sodio y/o bicarbonato de sodio.
 - Agregado de compuestos quelantes. Estos son compuestos solubles en agua que reaccionan con los iones causantes de la incrustación, evitando que precipiten y formen incrustaciones: por ejemplo: ácidos húmicos, lignina.
 - Aplicación de inhibidores. Según la concentración de inhibidor que se agregue, se pueden evitar las incrustaciones o permitir la deposición controlada de las mismas. Los inhibidores más empleados son los polifosfatos (lineales o cíclicos), ortofosfatos, polifosfatos bimetálicos, y silicato de sodio. También se pueden usar mezclas de cinc con polifosfatos u ortofosfatos.
 - Ablandamiento. Para eliminar la dureza del agua.
- Tratamiento del agua para eliminar arena y otros componentes abrasivos (para evitar la erosión de los revestimientos protectores).
- Aplicación de revestimientos a las paredes internas y/o externas de las cañerías, accesorios, tanques, etc. Estos revestimientos se pueden aplicar:
 - Durante la fabricación (por ejemplo: cañerías de hierro dúctil con revestimiento interno de cemento, válvulas con revestimiento de resinas/pinturas epoxi, cañerías recubiertas con esmaltes, pinturas epoxi, etc.), o
 - In-situ:
 - ❖ antes de colocarlas (revestimientos de polietileno, bitumínicos, de alquitrán de hullas, esmaltes o, pinturas epoxi, etc.)
 - ❖ una vez instaladas. Luego de la limpieza mecánica de las cañerías se debe volver a colocar el revestimiento protector. Esto generalmente se hace mediante la precipitación controlada de una película de carbonato de calcio o inclusive de cemento.

Si bien el tratamiento químico del agua y el uso de revestimientos está muy difundido, se debe siempre evaluar cuidadosamente no sólo el agregado de productos químicos al agua sino también la colocación de los revestimientos internos, ya que muchos de estos pueden afectar el sabor, color, olor, turbiedad y toxicidad del agua.

4.4.3. Control por Técnicas Electrolíticas – Protección Catódica

Cuando no se utiliza un revestimiento protector, o si se ha seleccionado un recubrimiento de bajo costo y vida útil reducida, se puede utilizar el método conocido como protección

catódica para limitar el proceso corrosivo más importante, es decir el electroquímico. Como se mencionara anteriormente, en este proceso, el agua o el suelo húmedo es el electrolito, dos zonas de un material o dos materiales distintos son el ánodo y el cátodo, y la pared de la cañería entre ellos completa el circuito eléctrico.

Este proceso puede iniciarse de distintas maneras, por ejemplo, al entrar en contacto materiales de distinta composición, por la acción de un solo material debido a variación en la humedad del suelo y de la composición química de este o del agua, heterogeneidad en el material inducida en el proceso de fabricación, marcas en la superficie del material, soldaduras y aún diferencias de temperatura.

La corriente fluye desde el ánodo hacia el cátodo y provoca corrosión a una velocidad mayor que la que se produce por medios químicos normales. La velocidad de la corrosión es significativamente mayor en el extremo anódico que en el catódico. El ánodo es el punto o área en la cual la corriente deja el metal, y el cátodo es el punto en el cual la corriente entra en el metal.

Mediante el método de protección catódica se desvía la corrosión electroquímica desde la cañería hacia ánodos perdidos o de sacrificio, deteniéndose la corrosión al cancelar o revertir la corriente que sale de la zona anódica de la celda de corrosión. Existen dos métodos para aplicar protección catódica. Uno es el método galvánico que se basa en la batería natural que se establece entre metales en distinta posición en la tabla electroquímica (**Tabla 6**), y en el cual se utiliza, intencionalmente, un ánodo de sacrificio o perdido, que se consumirá. Estos ánodos, también denominados galvánicos, son de aleaciones de Magnesio o fundiciones de cinc y se conectan a la cañería a través de cables de plomo aislados, como se observa en la **Figura 55**.

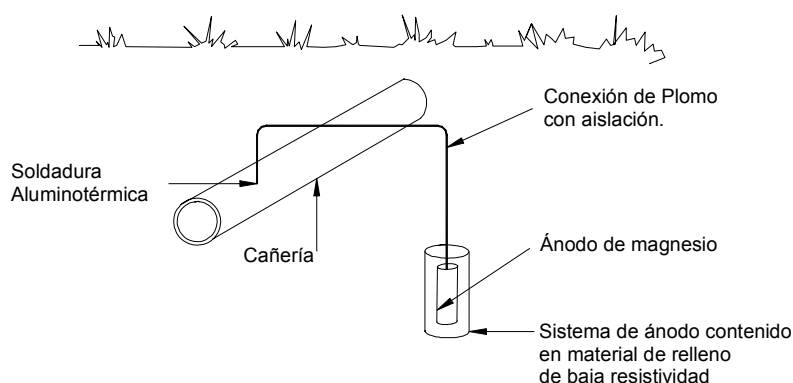


Figura 55. Protección catódica con ánodo perdido o de “sacrificio”

El magnesio y el cinc son anódicos con respecto al acero y el hierro, de modo de que se forma una celda galvánica que funciona en oposición con la corrosión que se intenta prevenir. Como resultado, los electrodos de magnesio o cinc se corroen perdiendo su metal y la cañería, que actúa como cátodo, permanece protegida. Este método requiere de un cuidadoso análisis de todas las condiciones o variables involucradas,

especialmente en lo que hace a la uniformidad de la condición catódica a lo largo de toda la cañería.

El segundo método de protección catódica, generalmente más costoso, consiste en imprimir o forzar una corriente continua en la estructura que se quiere proteger, mediante una fuente de energía externa. La corriente continua externa vuelve a toda la cañería catódica con respecto al suelo que la rodea mediante una diferencia de potencial controlada, quedando, por lo tanto, protegida. Generalmente se emplean rectificadores para transformar la corriente alterna en directa, y un banco de grafito o cilindros de hierro fundido (de formulación especial) que se conectan al circuito de la celda como ánodo, y el/los cual/es se consumirá/n, tal como se muestra en el esquema de la **Figura 56**.

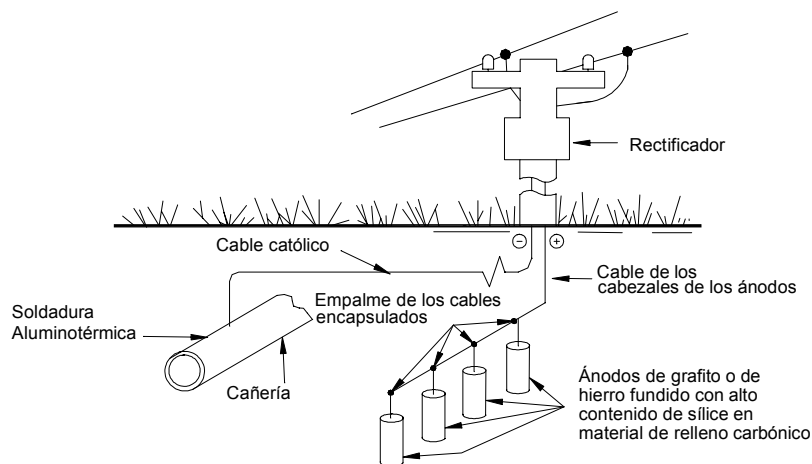


Figura 56. Protección catódica por corriente externa

Uno de los problemas que se observan con mayor frecuencia es la corrosión localizada que resulta de la distribución no uniforme de corriente debida a la combinación de un ánodo puntual y un cátodo finito. La **Figura 57** muestra un esquema de protección catódica con corriente externa probablemente mal diseñado. Esto se puede evitar aumentando la cantidad de ánodos a fin de lograr una distribución de corriente más uniforme. Toda la cañería debe comportarse como cátodo, ya que si existen discontinuidades se producirá corrosión.

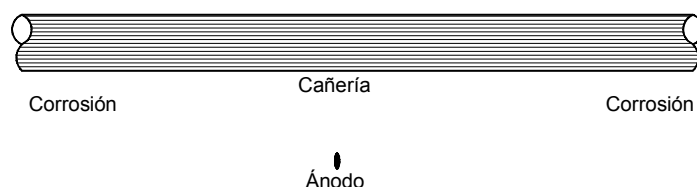


Figura 57. Corrosión localizada

En los lugares donde pueden existir corrientes parásitas, se debería considerar la instalación de cables desmontables en determinados puntos de la cañería, de modo de que la corriente pueda salir de la misma. Es decir que, las corrientes parásitas se pueden utilizar para dar protección catódica a las cañerías. Sin embargo, como ya se indicó, tanto las corrientes parásitas como la protección catódica son temas que deben evaluarse muy cuidadosamente ya que de no controlarse o instalarse correctamente, podrían no sólo no ser efectivos, sino que hasta podrían acelerar el proceso de corrosión, por lo tanto, es aconsejable contar con la asistencia de personal especializado y con suficiente experiencia para evitar estos inconvenientes.

Cabe destacar por último, que los métodos de protección catódica son aplicables al caso de cañerías de hormigón armado y en particular para cañerías de hormigón pretensado que son más susceptibles de ser corroídas. En estos casos para una efectiva protección deben necesariamente conectarse entre sí las armaduras de las cañerías adyacentes.

4.4.4. Selección del Método de Control

Como surge de la discusión anterior existen muchos métodos o técnicas para controlar tanto la incrustación como la corrosión en los sistemas de distribución (cañerías, accesorios, tanques de almacenamiento, etc.). Sin embargo como estos procesos implican varios mecanismos complejos con muchas variables interrelacionadas, es muy difícil generalizar cual/es método/s es/son el/los más apropiado/s, ya que cada caso es único en lo que a la combinación de las características físico-químicas del ambiente (agua o suelo), de la naturaleza de los materiales y de la hidráulica del sistema se refiere. Por lo tanto, en todos los casos es conveniente, como ya se mencionó anteriormente, requerir de la asistencia de un profesional especializado desde el inicio de todo análisis de cualquier problema y/o sistema a proteger, a fin de evaluar los métodos para el control de la incrustación o corrosión más apropiados para cada caso y para el diseño del o de los método/s seleccionado/s.

4.5. DEGRADACIÓN DE HORMIGONES

4.5.1. Principales Factores de la Degradación de Estructuras Cementicias

Independientemente del origen de la causa de la degradación de las estructuras cementicias (físico, químico o biológico, etc.), generalmente, son dos los factores principales que los afecta: los mecanismos de transporte en poros y fisuras y el agua.

Mecanismos de transporte

Los mecanismos básicos de transporte en el hormigón, principal tipo de estructura cementicia que interesa a los servicios de agua potable, son la difusión, absorción, succión capilar y penetración. En estos mecanismos se deben tener en cuenta: las condiciones ambientales; el agente transportado (agua, gases, compuestos disueltos, etc.); y la estructura interna del hormigón (poros y fisuras).

Con respecto a las condiciones ambientales, se deben considerar las condiciones generales de la zona donde se encuentra ubicada la estructura y en especial las zonas superficiales del hormigón.

Entre los agentes o componentes transportados, el agua es el más común, si bien los gases (atmósferas contaminadas) y los compuestos disueltos (lluvias ácidas, etc.) están tomando cada día más relevancia, en determinadas zonas. Es importante destacar que las características físicas (por ejemplo: temperatura) y químicas (por ejemplo: composición) de los agentes transportados pueden variar a medida que avanzan por el hormigón, modificándose por lo tanto su potencial agresividad.

La estructura interna del hormigón, y en especial las fisuras y poros, determinan la permeabilidad del mismo, propiedad ésta que determina, a su vez, la durabilidad del hormigón. Dentro de la estructura interna del hormigón, se deben considerar, además, la composición química del cemento y las características de los áridos ya que ambas son críticas en algunas causas de degradación. Es importante señalar que la permeabilidad del hormigón no es simplemente función de la porosidad del mismo, sino que también depende del tamaño de los poros, de la distribución y de la interconexión entre los mismos.

Los poros en el mortero de cemento de un hormigón se pueden deber a la compactación, la existencia de aire ocluido, capilaridad y estructura del mismo, lo que genera poros de distintos tamaños, los que se clasifican en microporos, poros de capilaridad y macroporos. Estos dos últimos tipos de poros son determinantes para la resistencia o durabilidad del hormigón, habiéndose observado que ésta disminuye a medida que aumenta el número de poros de capilaridad y macroporos. En esto juega un rol significativo la presencia de agua o vapor de agua en los mismos, ya que modifica la estructura de los poros y altera, por lo tanto, la permeabilidad del hormigón.

4.5.2. Factores que Dañan el Hormigón

Los factores o causas últimas que dañan las estructuras cementicias o de hormigón pueden presentarse en cada una de las etapas de la construcción de las mismas: planificación, proyecto-cálculo, materiales, construcción propiamente dicha, y mantenimiento. Varios estudios sobre daños producidos en estos tipos de estructuras han evidenciado que la mayor parte de los problemas o causas de deterioro de las estructuras aparecen en la etapa del proyecto-cálculo (40-50% de los problemas), disminuyendo a medida que se avanza en las etapas del proceso constructivo.

En general, el deterioro de las estructuras de hormigón se debe a distintos tipos de acciones, las que se pueden clasificar en: acciones químicas, acciones físicas y otras acciones.

Acciones químicas

La degradación de tipo químico se debe a la composición de los cementos y a la agresividad del agua que se utiliza para preparar el hormigón y del agua que puede entrar, posteriormente, en contacto con las estructuras.

Este tipo de acciones se pueden agrupar en tres tipos:

- Degradación del mortero o pasta de cemento por ácidos
- Degradación por formación de sales expansivas

- Degradación por reacción con cationes

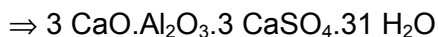
Debido a que los constituyentes principales del cemento son la sílice, cal, alúmina y hierro, magnesio y compuestos alcalinos en cantidades menores, la pasta constituye un medio normalmente muy básico y con muchas sales capaces de solubilizarse. Esta pasta puede ser atacada por los ácidos alterándose su composición, lo que modifica sus características mecánicas y otras. Entre los ácidos que generalmente pueden atacar los hormigones en solución se encuentran el SO_2 , sulfatos $\text{SO}_4^{=}$, amonio NH_4^+ , magnesio Mg^{++} , y en forma gaseosa: anhídrido carbónico CO_2 (carbonatación del hormigón), anhídrido sulfuroso SO_2 , y óxido de nitrógeno.

La degradación del hormigón por efecto de un medio ácido es función de la solubilidad de las sales de calcio que se forman. También el tipo de ácido determina la severidad de la degradación, siendo el ácido clorhídrico el más agresivo de todos. Los ácidos orgánicos también afectan los hormigones.

Cuando la acidez del medio no es excesivamente fuerte ($\text{pH} > 2$) se puede aumentar la resistencia de los hormigones reduciendo la relación agua/cemento y/o empleando cementos de tipo aluminoso.

El anhídrido carbónico ataca los hormigones cuando la concentración del mismo en el agua es superior a 15 mg/l o cuando éstos entran en contacto con aguas de bajo contenido de sales (aguas dulces). Sin embargo como la cantidad de alcalinidad (en forma de cal) en la estructura porosa del hormigón es importante, se forma un depósito de carbonato de calcio y otras sales, que retarda, durante un tiempo, el efecto corrosivo de éstas sobre el hormigón.

En la degradación por formación de sales expansivas, tales como la denominada etringita, el ataque por los sulfatos juega un rol significativo. Los sulfatos pueden provenir del exterior, en cierto tipos de aguas, o bien, del interior, cuando se dan ciertas condiciones de humedad y temperatura en el hormigón. Por lo general, el resultado es una doble reacción que produce sales expansivas. La acción de los sulfatos sobre las estructuras cementicias es un fenómeno complejo que se presenta frecuentemente. Durante esta acción, la cal libre presente en el cemento se sulfata pasando a sulfato cálcico, el cual, a su vez, se transforma, como se mencionara, en una sal expansiva. Los aluminatos presentes en el cemento también se transforman en estas sales:



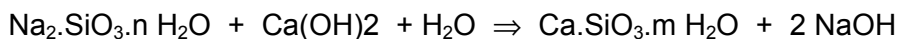
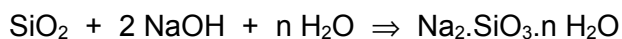
sal expansiva (etringita)

El aumento de volumen debido a la formación de estas sales, produce daños en la estructura del hormigón, por ejemplo: fisuras, descascarado, etc.

Las características de las aguas, especialmente de las salinas, como ser el pH, concentración de CO_2 , amoníaco, magnesio y sulfatos, determina su mayor o menor agresividad hacia los hormigones típicos. Cuando las aguas son extremadamente agresivas se deben utilizar revestimientos protectores, mientras que cuando son muy

agresivas, se pueden utilizar cementos a base de escoria con un índice hidráulico elevado. Por ejemplo: cementos con aproximadamente 80% de escoria o con un 60-75%.

La degradación por reacción con cationes resulta de la reacción entre ciertos componentes reactivos de los áridos con los otros materiales que constituyen el hormigón: agua y cemento. Por ejemplo las reacciones conocidas como álcali-árido y otras de tipo similar. En este primer tipo de reacciones, la misma se produce entre los minerales silíceos del árido y los hidróxidos alcalinos derivados de los álcalis Na_2O y K_2O de los cementos. La reacción se produce en la superficie de los áridos, formándose un gel de silicato alcalino que es capaz de expandirse, especialmente cuando embebe agua. A veces este gel emigra de la superficie de los áridos hacia el exterior del hormigón, a través de las fisuras, depositándose en ellas en forma de gotas. Las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



Los álcalis que intervienen en estas reacciones provienen del cemento ya que los que contiene el agua se pueden considerar insignificantes. Los cambios de temperatura y el aumento de ésta aceleran estas reacciones, agravando la degradación del hormigón.

Acciones físicas

Si bien las acciones físicas que pueden afectar la estructuras cementicias son varias, para las estructuras que normalmente se encuentran en los servicios de agua potable, las que se pueden presentar son las siguientes:

- Degradación por altas velocidades del agua, las que resultan en:
 - Erosión por abrasión
 - Erosión por cavitación
 - Daños por impacto

El efecto abrasivo del agua sobre las estructuras de hormigón es consecuencia de la arena u otro tipo de partículas abrasivas que transporta, y la severidad del daño que se produce depende, fundamentalmente, de: 1) la calidad del hormigón en lo que respecta a su resistividad a la compresión, el contenido de cemento y a la resistencia al desgaste del árido fino y la grava, 2) de la velocidad del flujo de agua, 3) la cantidad de material abrasivo que transporta el agua y las características abrasivas de la misma, y 4) de las características del flujo, es decir, si el flujo es intermitente o continuo, etc.

Cuando un flujo de agua circula a elevada velocidad sobre superficies de hormigón que presentan irregularidades o, como en el caso de las cañerías, cambios bruscos de dirección, se pueden formar burbujas y ampollas de aire y vapor de agua debajo del flujo. Los daños producidos por este fenómeno que se denomina cavitación, aparecen en la zona de impacto del flujo, como consecuencia de la ruptura de las burbujas y ampollas de aire y vapor de agua a causa de las elevadas presiones instantáneas en el momento del impacto. Si bien una mejor calidad del hormigón aumenta la resistencia del mismo frente a la erosión por cavitación, éste no es el único ni probablemente el mejor método para evitar este tipo de acción. Se debe prestar, además, especial cuidado en el diseño de la estructura y en la ejecución de la misma.

Un flujo de agua a alta velocidad, además de producir erosión por cavitación en las estructuras de hormigón, puede producir daños por impacto directo. Para evitar este fenómeno, las estructuras se deben diseñar correctamente.

- Acciones térmicas por efecto del calor de fraguado en las primeras etapas, (durante la construcción), de condiciones climáticas extremas, o bien de condiciones específicas de operación en alguna zona determinada de las estructuras.

Las variaciones térmicas en las estructuras de hormigón son inherentes a la propia naturaleza de este material y a las condiciones climáticas del lugar en que se encuentran las estructuras, estando además asociadas a sus características geométricas y de emplazamiento. El daño que se produce en las estructuras no es fruto de la temperatura en sí, sino de las variaciones de ésta que se puedan producir en las mismas. Estas diferencias de temperatura pueden resultar en fisuras y/o grietas, las que, por lo general, no afectan a todo el espesor sino a una parte del mismo, es decir que, generalmente, no son profundas.

Otras acciones

Dentro de este grupo de acciones se consideran las de origen mecánico y las de origen biológico. Entre las primeras se incluyen todas aquellas cargas (por peso propio, impactos, etc.) y deformaciones impuestas que afectan el comportamiento estructural de la estructura cementicia. El daño que se observa debido a este tipo de acciones son fisuras, descascarado, etc.

Las acciones de origen biológico se pueden deber a la acción de hongos, bacterias, algas, plantas y raíces sobre el hormigón. Todos ellos se sitúan, preferentemente, en las fisuras, huecos y poros que existan en la superficie del hormigón, los que, frecuentemente, contienen agua favoreciendo este tipo de ataque. Generalmente se producen expansiones localizadas que provocan el deterioro superficial del hormigón (descascarado).

4.5.3. Medidas Para Prevenir la Degradación de las Estructuras Cementicias

Como ya se mencionó anteriormente, el deterioro de las estructuras de hormigón depende fundamentalmente de las características químicas de los materiales utilizados en la fabricación del hormigón (cemento, agua, áridos), de la forma de preparación del mismo (fraguado, etc.), y del diseño de las estructuras.

A la hora de seleccionar el tipo de cemento a utilizar se deben tener en cuenta las condiciones de agresividad del entorno: terreno, ambiente exterior, aguas, etc., que rodearán a la estructura cementicia. Así se podrán utilizar cementos tipo Portland, resistentes a los sulfatos, puzolánicos, de escoria, etc.

En cuanto a los áridos a utilizar se debe prestar especial atención a la naturaleza de los mismos, a su granulometría y tamaño máximo. Los áridos deben ser compatibles con el cemento que se vaya a utilizar en función de la agresividad del entorno. La granulometría y tamaño máximo de los áridos son, por lo general, determinantes y se deben seleccionar en base a la máxima facilidad para trabajar el mortero resultante a fin de alcanzar una gran compactación, lo que contribuye a la durabilidad del hormigón.

Con respecto al agua empleada para preparar el mortero esta debe reunir las características físicas y químicas que aseguren la no agresividad de las mismas.

Por otra parte, para mejorar algunas características del hormigón se pueden utilizar aditivos: cenizas, microsilice o humo de sílice, polímeros (epoxi, poliéster insaturado, resinas acrílicas, etc.), materiales fluidificantes, etc.

En lo que hace a la fabricación del hormigón se debe seleccionar cuidadosamente la relación agua/cemento a utilizar, ya que ésta es la característica más importante a la hora de dosificar. Por ejemplo, no se pueden obtener hormigones de alta resistencia con dosificaciones mayores a 0,40, siendo las más apropiadas las que se encuentran próximas a 0,30.

Las estructuras de hormigón se deben diseñar de modo tal que no favorezcan los procesos de erosión, deterioro por sobrepeso, etc. Posteriormente, durante la construcción se debe permitir el correcto fraguado, alcanzar la compactación adecuada y evitar las imperfecciones en la superficie.

Por otra parte, las estructuras de hormigón se pueden proteger de los agentes agresivos utilizando revestimientos, imprimaciones y capas de pintura protectoras.

5. BIBLIOGRAFÍA

- American Concrete Pipe Association. Concrete Pipe Design Handbook. Viena, USA, 1980.
- American Concrete Pipe Association. Concrete Pipe Design Manual. Viena, USA, 1980.
- AWWA. Concrete Pressure Pipe, M9. USA, 1979.
- AWWA. Steel Pipe. Design and Installation, M 11. Denver, USA, 1964.
- Ballofet, Gotelli, Meoli. Hidráulica. Segunda Edición. Editorial Ediar, Bs. As., Argentina, 1952.
- Cohen and Fielding. Journal of the AWWA. Predicting Frost Depth, Protecting Underground Pipelines. Febrero de 1979, pág. 113.
- COFAPyS. Normas de Estudio, Criterios de Diseño y Presentación de Proyectos de Desagües Cloacales. Bs. As. Argentina, 1993.
- Chow Ven Te. Open channel hydraulics. Mc Grow Hill Book Company, USA, 1959.
- Davis, C., Sorensen K. Handbook of Applied Hydraulics, 3rd Edition. Mc Grow – Hill Book Company. USA, 1969.
- De Melo Porto R. Hidráulica Básica. Publicação EESC – USP, San Carlos, Brasil, 1998.
- Dominguez F.J. Hidráulica. Editorial Universitaria, Chile, 1978.
- Fair, Geyer, Okun. Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Editorial Limusa, México, 1976.
- Henderson F.M. Open channel flow. Mc Millan Publishing Co. Inc., USA, 1966.
- Instituto de Ingeniería Sanitaria. Abastecimiento de agua potable a comunidades rurales. Publicación N° 7. UBA. Bs. As., Argentina, 1971.
- Jaeger C. Fluid Transients. Blakie, London, Inglaterra, 1977.
- Mataix C. Mecánica de los fluidos y máquinas hidráulicas. Harper and Row Publisher Inc., España, 1970.
- Mukerji A. How to size relief valves. Chemical Engineering, USA, Junio 2, 1980.
- Pérez Farrás L. Problemática del aire atrapado en conducciones a presión. Universidad Nacional de la Patagonia, Argentina.
- Pujol A., Menéndez A. Análisis unidimensional de escurrimiento en canales. Eudeba, Bs. As., Argentina, 1987.
- Rouse H. Engineering Hydraulics. John Wiley and sons. New York, E.E.U.U., Sixth Printing, 1967.

- Rouse H. Hidraulica. Editorial Dossat S.A., Madrid, España.
- S.N.A.P. Normas de estudios, diseño y presentación de proyectos de provisión de agua potable para poblaciones entre 15.000 y 30.000 habitantes, Bs. As., Argentina, 1984.
- S.N.A.P. Normas de estudios, diseño y presentación de proyectos, tomo II, Bs. As., República Argentina, 1972.
- Shames I. La mecánica de los fluidos. Mc Grow Hill Book Company, España, 1967.
- Sotelo, Ávila G. Hidráulica General. Editorial Limura, México, 1976.
- Stabile A. Válvulas de aire en las cañerías de conducción de líquidos. Ingeniería e Industria, Bs. As., Argentina, 1981.
- Streeter V. Handbook of fluid dynamics. Mc Grow Hill Book Company. Cuarta Edición, España, 1968.
- Streeter V. Mecánica de los fluidos. Mc Grow Hill Book Company. Cuarta Edición, España, 1968.
- Timoshenko S. Theory of elastic stability. Mc Grow Hill Book Company, Inc. New York, Usa, 1936.
- W.G. Wiendl – Tubulações para Agua – CETESB. 1973.
- Watters G. Modern Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipelines. Ann Arbor Science Publishers Inc., Ann Arbor, Usa, 1979.
- Wiendl W.G. Tubulações para água. CETESB, Brasil, 1973.
- Wylie E.B., Streeter V. Fluid transient. Feb. Press, USA, 1982.