Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Conducciones

10



IMTA
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

México
Gobierno de la República

Estados Unidos Mexicanos

SEMARNAT
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

CONAGUA
Comisión Nacional del Agua

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Conducciones

Comisión Nacional del Agua

www.conagua.gob.mx

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
Conducciones

ISBN: 978-607-626-018-0

D.R. © Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña
C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174•4000

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Impreso y hecho en México
Distribución Gratuita. Prohibida su venta.
Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.
Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra,
sin fines de lucro y citando la fuente

Contenido

Contenido III
Presentación VII
Objetivo General IX
Introducción XI

1. Clasificación de líneas de conducción 1
    1.1. Tipo de entrega 1
    1.2. Conducción por bombeo 2
    1.3. Conducción por gravedad 2
    1.4. Conducción por bombeo-gravedad 3
    1.5. Red de conducción 3
    1.6. Líneas paralelas 3
2. Componentes de una línea de conducción 5
    2.1. Tuberías 5
    2.2. Piezas especiales 5
        2.2.1 Juntas 5
        2.2.2 Carretes 5
        2.2.3 Extremidades 5
        2.2.4 Tees 5
        2.2.5 Cruces 5
        2.2.6 Codos 6
        2.2.7 Reducciones 6
        2.2.8 Coples 6
        2.2.9 Tapones y tapas 6
    2.3. Válvulas 6
        2.3.1 Válvula eliminadora de aire 6
        2.3.2 Válvula de admisión y expulsión de Aire 6
        2.3.3 Válvula de no retorno 6
        2.3.4 Válvula de seccionamiento 7
    2.4. Medios para control de transitorios 7
        2.4.1 Válvula aliviadora de presión 7
        2.4.2 Válvula anticipadora del golpe de ariete 7
        2.4.3 Torre de oscilación 7
        2.4.4 Tanque unidireccional 7
        2.4.5 Cámara de aire 8

2.4.6 Instalación de un by-Pass en la válvula de no retorno 8
2.4.7 Instalación de un by-pass en la planta de bombeo 8
3. Diseño hidráulico de conducciones a presión 9
3.1. Consideraciones técnicas 9
3.1.1 Ecuaciones de conservación 9
3.1.2 Pérdidas de energía por fricción en la conducción 11
3.1.3 Pérdidas locales 14
3.1.4 Válvulas, uso y ubicación 17
3.2. Línea de conducción por gravedad 23
3.3. Línea de conducción por bombeo 29
4. Selección de tubería 35
4.1. Diámetro óptimo 35
4.2. Criterios para la selección de material 44
4.2.1 Económico 45
4.2.2 Resistencia mecánica 47
4.2.3 Resistencia a la corrosión 49
4.2.4 Facilidad de instalación 51
4.2.5 Vida útil 52
5. Protección 55
5.1. Protección catódica 55
5.1.1 Sistemas de ánodos galvánicos 58
5.1.2 Sistema por corriente impresa 65
5.1.3 Protección catódica combinada con recubrimientos 71
5.2. Recubrimientos anticorrosivos 72
5.2.1 Norma de recubrimientos 72
5.2.2 Tipo de recubrimientos 76
5.2.3 Sistemas de recubrimiento 86
5.2.4 Rendimientos de recubrimiento 91
5.3. Limpieza y Preparación de superficies 91
5.3.1 Corrección de las imperfecciones de la superficie 93
5.3.2 Métodos de preparación de superficie 93
5.3.3 Aspectos prácticos en la preparación de las superficies 94
5.3.4 Preparación mecánica 95
5.3.5 Aplicación de recubrimientos 102
6. Operación de la conducción 111
6.1. Vaciado accidental a gasto nulo 111
6.2. Vaciado accidental de gasto parcial 112
6.3. Operación de bombas 114
7. Válvulas 119
7.1. Generalidades 119
7.2. Válvulas de control 119

7.3. Válvulas reguladoras de Presión 124
7.4. Válvulas de no retorno 125
7.5. Válvulas de aire 127
8. Conducciones a superficie libre 129
8.1. Canales 129
8.2. Conceptos básicos 131
8.3. Régimen crítico 138
8.4. Régimen uniforme 139
8.5. Flujo gradualmente variado 140
8.5.1 Ecuación dinámica 141
8.5.2 Características y clasificación de los perfiles de flujo 142
8.6. Régimen bruscamente variado, elementos del salto hidráulico 149
8.6.1 Transición de régimen supercrítico a subcrítico 150
8.6.2 Formas de salto hidráulico 151
8.6.3 Tipos de salto hidráulico 152
8.6.4 Elementos verticales del salto hidráulico 153
8.6.5 Elementos longitudinales del salto hidráulico 153
8.6.6 Localización del salto hidráulico 155
8.7. Diseño de secciones hidráulicas 159
8.7.1 Sección hidráulica óptima 160
8.7.2 Bordo libre 161
8.7.3 Canales no erosionables 162
8.7.4 Material y revestimiento no erosionable 164
8.8. Trazo del canal y estructuras auxiliares 164
8.8.1 Trazo 164
8.8.2 Estructuras auxiliares 167
8.8.3 Transiciones 170
8.8.4 Curvas 172
8.8.5 Bifurcaciones 172
8.8.6 Recomendaciones generales para el trazo de una línea de conducción 174

Conclusiones 181

Bibliografía 183
Tabla de conversiones de unidades de medida 187
Ilustraciones 197
Tablas 201



Presentación

Uno de los grandes desafíos hídricos que enfrentamos a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo.

Contar con estos servicios en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México, la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años; sin embargo, mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja.

Por ello, para responder a las nuevas necesidades hídricas, la administración del Presidente de la República, Enrique Peña Nieto, está impulsando una transformación integral del sector, y como parte fundamental de esta estrategia, el fortalecimiento de los organismos operadores y prestadores de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento.

En este sentido, publicamos este manual: una guía técnica especializada, que contiene los más recientes avances tecnológicos en obras hidráulicas y normas de calidad, con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como formar recursos humanos más capacitados y preparados.

Estamos seguros de que será de gran apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios para generar ciclos virtuosos de gestión, disminuir los costos de operación, impulsar el intercambio de volúmenes de agua de primer uso por tratada en los procesos que así lo permitan, y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas del país, considerando las necesidades de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

El Gobierno de la República tiene el firme compromiso de sentar las bases de una cultura de la gestión integral del agua. Nuestros retos son grandes, pero más grande debe ser nuestra capacidad transformadora para contribuir desde el sector hídrico a **Mover a México.**

Director General de la Comisión Nacional del Agua



Objetivo General

El *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (MAPAS) está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (Conagua), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población.

Este trabajo favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana y la labor de los centros de enseñanza.



Introducción

El abastecimiento del agua, consiste en dotar de este servicio a los asentamientos humanos, para lo cual se transporta el agua desde una fuente, que puede ser superficial o subterránea, y posteriormente a un tratamiento se distribuye en la mancha poblacional.

Con la finalidad de realizar la distribución del agua, se utiliza un completo sistema de agua potable dentro del cual se encuentran todas aquellas obras de conducción que permiten desplazar el agua desde su origen hasta los usuarios, y de acuerdo al diseño de dicho sistema variará el impacto económico en la operación de éste.

El objetivo de este libro es proporcionar guías sobre el diseño de las conducciones, con una visión general, con lo cual se logran cubrir diferentes casos de conducciones. Para lograr dicha meta el presente material se ha estructurado en ocho capítulos.

En el primer capítulo del libro se realiza una descripción de las líneas de conducción, considerando el tipo de entrega del agua a una red de distribución.

El segundo capítulo trata acerca de los componentes que integran una línea de conducción (juntas, carretes, tees, cruces, codos, etc.).

El tercer capítulo presenta los aspectos relacionados con el diseño de conducciones a presión y gravedad, incluyendo las ecuaciones para el cálculo hidráulico y las consideraciones correspondientes en el diseño de las distintas fases de operación.

El capítulo cuatro establece los criterios para la obtención del diámetro óptimo y selección del material, considerando los aspectos económicos, facilidad de instalación, vida útil, resistencia mecánica y a la corrosión.

El capítulo cinco aborda los tipos de protección y recubrimientos para las tuberías, ocasionadas por las acciones de intemperismo, tomándo-

se en cuenta los métodos para el control de la corrosión (protección catódica), los recubrimientos y anticorrosivos de uso frecuente.

El capítulo seis hace mención a la operación estacionaria de la conducción, tomando en cuenta los casos de vaciado accidental a gasto nulo y parcial, además de la operación con sistemas de bombeo.

El capitulo siete muestra de manera general las características de las principales válvulas que se utilizan en líneas de conducción.

Y el último capítulo expone los conceptos básicos y recomendaciones generales para el trazo y diseño de conducciones a superficie libre.

Entre los aspectos para la práctica del diseño de conducciones se pueden señalar como los más importantes:

- Para el calculo de las perdidas de energía se recomienda el uso de la ecuacion de Darcy-Weisbach con la ecuación de Colebrook-White o su aproximación explicita planteada por Swamee y Jain
- Se introduce y utiliza el concepto de red de conducción
- En el diseño de la conducción a flujo establecido y transitorio se considera la operación de las bombas y la política de servicio de la conducción, caso que toma principal importancia cuando operan simultáneamente varios equipos de bombeo o existen derivaciones a varios asentamientos humanos.

1

Clasificación de líneas de conducción

1.1. Tipo de entrega

Las conducciones deberán entregar el agua a un tanque de regularización, como se indica en la Ilustración 1.1, para tener un mejor control en la operación de los mismos, y asegurar un funcionamiento adecuado del equipo de bombeo.

El bombeo directo a red de distribución no es deseable ya que ocasionaría que las bombas, y la propia red, operaran con presiones altamente variables durante el día, lo que disminuiría la eficiencia energética del bombeo y la vida útil de las bombas y las tuberías. En zonas pequeñas aisladas sin embargo a manera de excepción se podrán aceptar conducciones con entrega del agua a la red de distribución, únicamente cuando con esto se logre un ahorro considerable en la distancia de conducción y un aumento en las presiones de la red de distribución. Una forma de conseguir esto es cuando el tanque de regularización se conecta a la red de distribución en un punto opuesto a la conexión de la conducción, como se indica en la Ilustración 1.2.

En los casos excepcionales en que sea necesaria la entrega a la red de distribución, se deberá fundamentar dicho funcionamiento de manera estricta en una modelación hidráulica, en caso que no se cuente con dicho análisis detallado, no se deberá realizar este tipo de entregas.

Ilustración 1.1 Línea de conducción con entrega del agua a un tanque de regulación

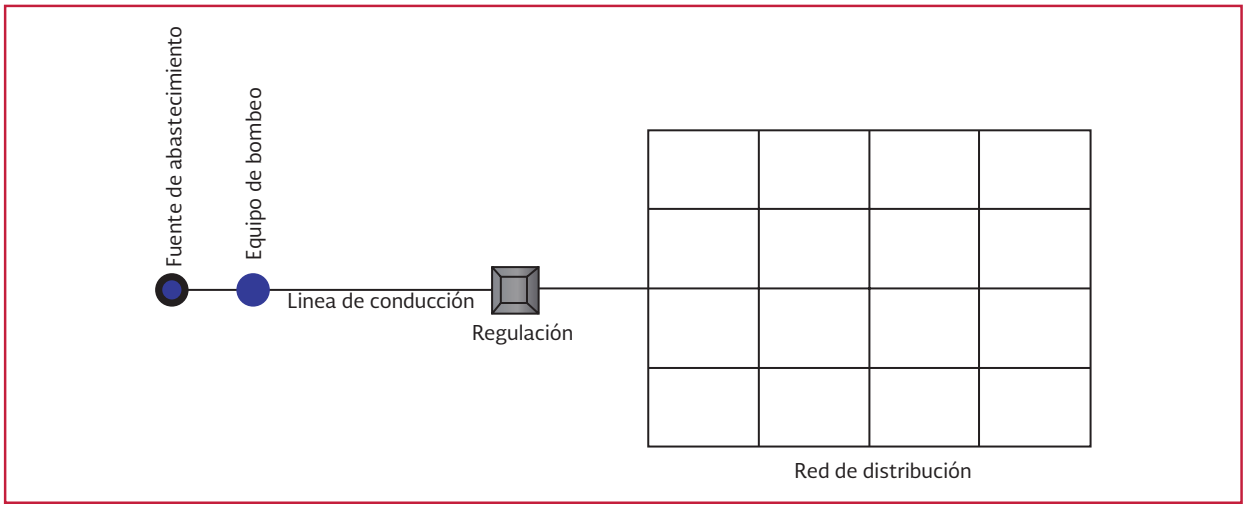
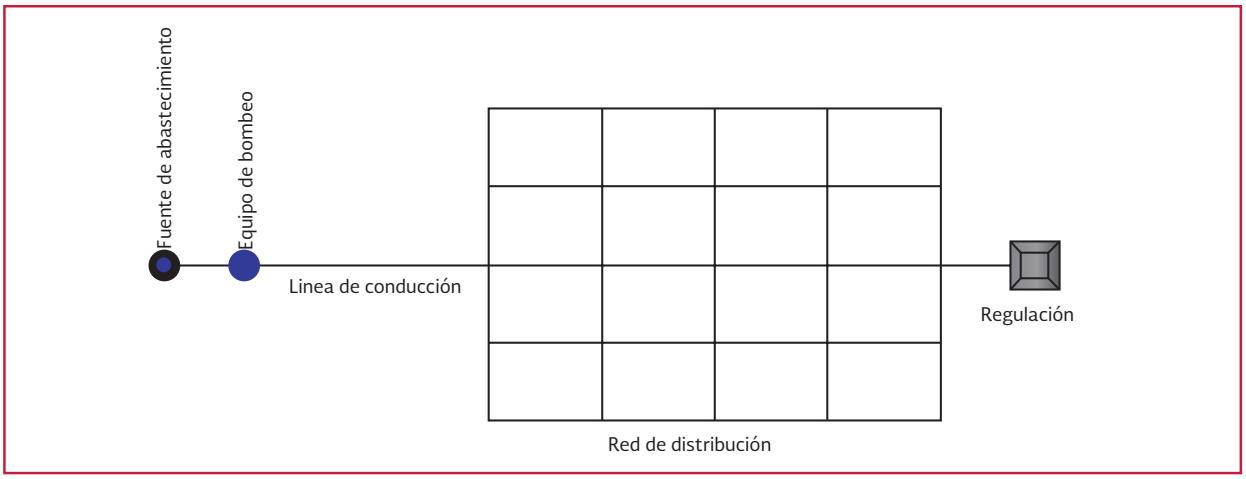


Ilustración 1.2 Línea de conducción con entrega del agua a la red de distribución



De acuerdo a lo anterior, el abastecimiento del agua a los usuarios puede realizarse de las siguientes maneras:

- Bombeo
- Gravedad
- Combinado

1.2. Conducción por bombeo

La conducción por bombeo es necesaria cuando se requiere adicionar energía para transportar el gasto de diseño. Este tipo de conducción se usa generalmente cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es menor a la altura piezométrica requerida en el punto de entrega. El equipo de bombeo proporciona la energía necesaria para lograr el transporte del agua.

En ciertos casos cuando aún no se cuenta con un tanque de almacenamiento para la provisión y balance de la demanda de agua, es común que el agua sea bombeada directamente a la red, esto pudiera aparentar una cierta ventaja dado que no se tiene el tanque de regulación respectivo que permita realizar una distribución a gravedad en la red, sin embargo, se deberá instalar en estos casos lo antes posible el tanque respectivo para que cese la operación con entrega directa de bombeo. Durante el tiempo que se pretenda realizar la entrega directa a la red se deberán tomar precauciones adicionales, como contar con una fuente de poder alternativa en el bombeo, automatizar el mismo en su operación, dar el mantenimiento de manera estricta a los equipos de bombeo, y lo más importante es que la fuente de abastecimiento debe ser capaz de proporcionar el gasto máximo horario que se demande, ya que de lo contario se tendrá déficit en el suministro.

1.3. Conducción por gravedad

Una conducción por gravedad se presenta cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es mayor a la altura piezométrica requerida o existente en el punto de entrega del agua, el transporte del fluido se logra por la diferencia de energías disponible.

Es decir, se hace uso de la topografía existente de manera que la conducción se lleve a cabo sin necesidad de bombeo y se alcanza un nivel aceptable de presión. Algunas ventajas de este esquema

son la inexistencia de costos de energía, operación sencilla, bajos costos de mantenimiento y reducidos cambios de presión.

1.4. Conducción por bombeo-gravedad

Si la topografía del terreno obliga al trazo de la conducción a cruzar por partes con mayor elevación que la superficie del agua en el tanque de regularización, conviene analizar la colocación de un tanque intermedio. La instalación de dicho tanque ocasiona que se forme una conducción por bombeo-gravedad, donde la primera parte es por bombeo y la segunda por gravedad.

1.5. Red de conducción

En algunos sitios, es necesario buscar fuentes alternas para abastecimiento del agua, resultando que dichas fuentes se encuentran en sitios separados, lo cual recae en la necesidad de interconectar las líneas de conducción de cada fuente, formando de esta manera una red de conducción.

Al unificar las líneas en una sola red de conducción, se puede llegar a reducir en cierto modo los costos de dichas líneas, sin embargo, se contará con una operación más compleja y que se deberá revisar de manera detallada en que cuente con un adecuado funcionamiento hidráulico. Tales casos se tienen cuando se incorporan diversas captaciones, como por ejemplo en las interconexiones de pozos, y en sistemas múltiples de abastecimiento a varias localidades.

Las derivaciones de una conducción hacia dos o más tanques de regularización forman también redes de distribución.

1.6. Líneas paralelas

Las líneas de conducción paralelas se forman cuando es necesario colocar dos o más tuberías sobre un mismo trazo. Esta instalación se recomiendan para efectuar la construcción por etapas (según sean las necesidades de la demanda de agua y la disponibilidad de los recursos) y facilitar la operación a diferentes gastos.



2

Componentes de una línea de conducción

2.1. Tuberías

Para los sistemas de agua potable se fabrican tuberías de diversos materiales como son acero, fibrocemento, concreto presforzado, cloruro de polivinilo (PVC), hierro dúctil, polietileno de alta densidad, poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y el fierro galvanizado, por mencionar algunos.

2.2. Piezas especiales

2.2.1 Juntas

Las juntas se utilizan para unir dos tuberías, éstas al igual que las tuberías pueden ser de materiales rígidos, semi-rígidos o flexibles, dentro de las primeras se encuentran por ejemplo las de metal que pueden ser: Gibault o Dresser.

2.2.2 Carretes

Los carretes son tubos de pequeña longitud provistos de bridas en los extremos para su unión. Se fabrican de fierro fundido con longitudes de 25, 50, y 75 cm.

2.2.3 Extremidades

Las extremidades son tubos de pequeña longitud que se colocan sobre alguna descarga por medio de una brida en uno de sus extremos. Se fabrican en longitudes de 40, 50, y 75 cm. Para materiales de PVC, las extremidades pueden ser campana o espiga.

2.2.4 Tees

Las tees se utilizan para unir tres conductos en forma de T, donde las tres uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos de igual diámetro y uno menor, cuando esto último ocurre se le llama tee reducción.

2.2.5 Cruces

Las cruces se utilizan para unir cuatro conductos en forma de cruz, donde las cuatro uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos mayores de igual diámetro y dos menores de igual diámetro, cuando esto último ocurre se le llama cruz reducción.

2.2.6 Codos

Los codos tienen la función de unir dos conductos del mismo diámetro en un cambio de dirección ya sea horizontal o vertical, entre las más comunes se encuentra de 22.5, 45 y 90 grados, sin embargo dichos ángulos disponibles variarán en función del material y el diámetro de la tubería, inclusive se recomienda verificar con el fabricante aquellas tuberías que pueden adoptar deflexiones diferentes a las mencionadas.

2.2.7 Reducciones

Las reducciones se emplean para unir dos tubos de diferente diámetro. En algunos materiales, como el PVC, las reducciones pueden ser en forma de espiga o de campana.

2.2.8 Coples

Los coples son pequeños tramos de tubo de PVC o de fibrocemento que se utilizan para unir las espigas de dos conductos del mismo diámetro. Éstos pueden ser también de reparación, en cuyo caso se deslizan libremente sobre los tubos para facilitar la unión.

2.2.9 Tapones y tapas

Los tapones y las tapas se colocan en los extremos de un conducto con la función de evitar la salida de flujo. En materiales de PVC, es costumbre llamarlos tapones, pudiendo ser en forma de campana o espiga. En materiales de fierro fundido, se acostumbra llamarlos tapas ciegas.

2.3. Válvulas

2.3.1 Válvula eliminadora de aire

La válvula eliminadora de aire cumple la función de expulsar el aire del tubo que continuamente se acumula en la tubería cuando ésta se encuentra en operación.

2.3.2 Válvula de admisión y expulsión de Aire

La válvula de admisión y expulsión de aire se utiliza para expulsar el aire que contiene la tubería al momento de iniciar el llenado del conducto. Una vez que el agua ejerce presión sobre el flotador de la válvula, ésta se cierra y no se abre mientras exista presión en el conducto.

Otra función de esta válvula es permitir la entrada de aire dentro del tubo al momento de iniciar el vaciado de la tubería, y con ello evitar que se presenten presiones negativas.

2.3.3 Válvula de no retorno

La válvula de no retorno es también conocida como válvula check, retenedora o de reflujo, y es aquella que permite el flujo en una sola dirección. Cuando se presenta un flujo en la dirección contraria la válvula se cierra hasta que se restablezca el sentido del flujo. Generalmente se colocan en las estaciones de bombeo y líneas de descarga para prevención.

2.3.4 Válvula de seccionamiento

La válvula de seccionamiento se utiliza para permitir o impedir el paso del flujo del agua, cuando además se utiliza para reducir el gasto a un valor requerido, se le denomina válvula de control.

Las válvulas de seccionamiento se clasifican de acuerdo al movimiento realizado al cerrarlas, por ejemplo, tipo compuerta, de mariposa, o de esfera.

2.4. Medios para control de transitorios

En esta parte se hará una breve descripción de elementos de control para transitorios, para su revisión completa se recomienda consultar el libro de *Fenómenos transitorios en Líneas de Conducción* de MAPAS.

2.4.1 Válvula aliviadora de presión

La válvula aliviadora de presión se coloca en la tubería para disminuir las sobrepresiones causadas por un fenómeno transitorio.

Es un dispositivo provisto de un resorte calibrado para abrir la compuerta cuando la presión sobrepasa un valor determinado.

2.4.2 Válvula anticipadora del golpe de ariete

La válvula anticipadora del golpe de ariete protege al equipo de bombeo de la onda de sobrepresión causada por el paro de la bomba o falla de la energía.

Esta válvula opera con la presión de la línea de conducción, y el nombre de anticipadora se debe a que entra en funcionamiento antes de la llegada de la onda de sobrepresión.

Este tipo de válvula realiza la apertura de la válvula cuando baja la presión hasta un valor prestablecido y evacúa agua la atmósfera reduciendo de esta manera el exceso de presión que provoca la onda de sobrepresión.

2.4.3 Torre de oscilación

La torre de oscilación es un depósito, a menudo de forma circular, en contacto con la atmósfera por la parte superior, cuyo diámetro por lo general es relativamente grande con relación al diámetro de la conducción.

Cumple la función de aliviar las sobrepresiones y depresiones causadas por un fenómeno transitorio.

Para evitar los derrames de agua cuando la conducción se encuentra funcionando, la elevación de la corona de la torre de oscilación debe ser mayor al nivel del agua del punto de descarga, y para evitar los derrames cuando el gasto de la conducción es igual cero, el nivel de la corona debe ser mayor a los niveles del agua de cualquier depósito conectado a la conducción.

2.4.4 Tanque unidireccional

El tanque unidireccional es un depósito que se coloca generalmente a una elevación superior a la del terreno natural y éste por lo general se encuentra en contacto con la atmósfera por la parte superior.

La elevación de la corona es menor a la carga piezométrica del punto de conexión del tanque con la conducción.

La función de un tanque unidireccional es aliviar fundamentalmente las depresiones causadas por un fenómeno transitorio, provocado por un paro repentino de la bomba.

Para evitar el vaciado del tanque cuando el gasto de la conducción es igual a cero, la elevación de la corona debe ser menor al nivel mínimo del agua en los depósitos conectados a la conducción.

Debe contener un conducto de vaciado y otro de llenado. En el de vaciado se instala una válvula de no retorno para permitir el flujo únicamente del tanque hacia la conducción. En el conducto de llenado debe existir una válvula para cortar automáticamente el flujo cuando se alcance el nivel máximo del agua.

2.4.5 Cámara de aire

La cámara de aire es un depósito cerrado, por lo general metálico, en cuyo interior una parte contiene un volumen de agua y el resto un volumen de aire. Se coloca normalmente al nivel del terreno natural.

La función de una cámara de aire es aliviar las sobrepresiones y depresiones causadas por un fenómeno transitorio.

Una cámara de aire contiene normalmente dos conductos, uno de vaciado y otro de llenado, el primero puede contener una válvula de no retorno para permitir la circulación del flujo únicamente del tanque hacia la conducción. El segundo conducto puede contener un dispositivo disipador de energía el cual puede ser, por ejemplo, un orificio, cuya función es evitar un incremento de presión cuando la cámara se está llenando.

2.4.6 Instalación de un by-Pass en la válvula de no retorno

Para obtener una rotación inversa controlada en la bomba y evitar sobrepresiones que causen problemas a las tuberías, se puede colocar aguas abajo del equipo de bombeo una válvula de no retorno y un by-pass alrededor de la válvula, cuya capacidad de conducción no permita una velocidad inadmisible en sentido inverso y que se asegure la reducción necesaria de las sobrepresiones, provocadas por un paro accidental del equipo de bombeo.

2.4.7 Instalación de un by-pass en la planta de bombeo

Cuando la fuente de abastecimiento dispone de un cierto nivel de presión en la succión, como en el caso de un depósito a superficie libre o un tanque elevado, el by-pass puede ser de utilidad en las plantas de bombeo para contrarrestar las presiones negativas provocadas por un paro accidental del equipo de bombeo.

El by-pass se construye colocando un tubo paralelo al equipo de bombeo que se conecta aguas abajo y aguas arriba del equipo. En este tubo se instala una válvula de no retorno para impedir la descarga de la bomba hacia el depósito, cuando la operación de la misma es en flujo permanente.

3

Diseño hidráulico de conducciones a presión

3.1. Consideraciones técnicas

3.1.1 Ecuaciones de conservación

Para aplicar las ecuaciones de conservación a una línea de conducción, se deben realizar, inicialmente, algunas consideraciones para su uso:

- El fluido es incompresible
- El flujo es permanente
- El volumen de control es rígido y fijo
- El volumen de control tiene una sola entrada y una sola salida normales al flujo

El volumen de control tiene la forma mostrada en la Ilustración 3.1.

La ecuación de conservación de masa (continuidad) es:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \qquad \text{Ecuación 3.1}$$

donde:

V_1 = Velocidad en la sección 1 (m/s)
A_1 = Área transversal de la sección 1 (m²)
V_2 = Velocidad en la sección 2 (m/s)
A_2 = Área transversal de la sección 2 (m²)

Ecuación de conservación de energía:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}\right) = H_f$$

Ecuación 3.2

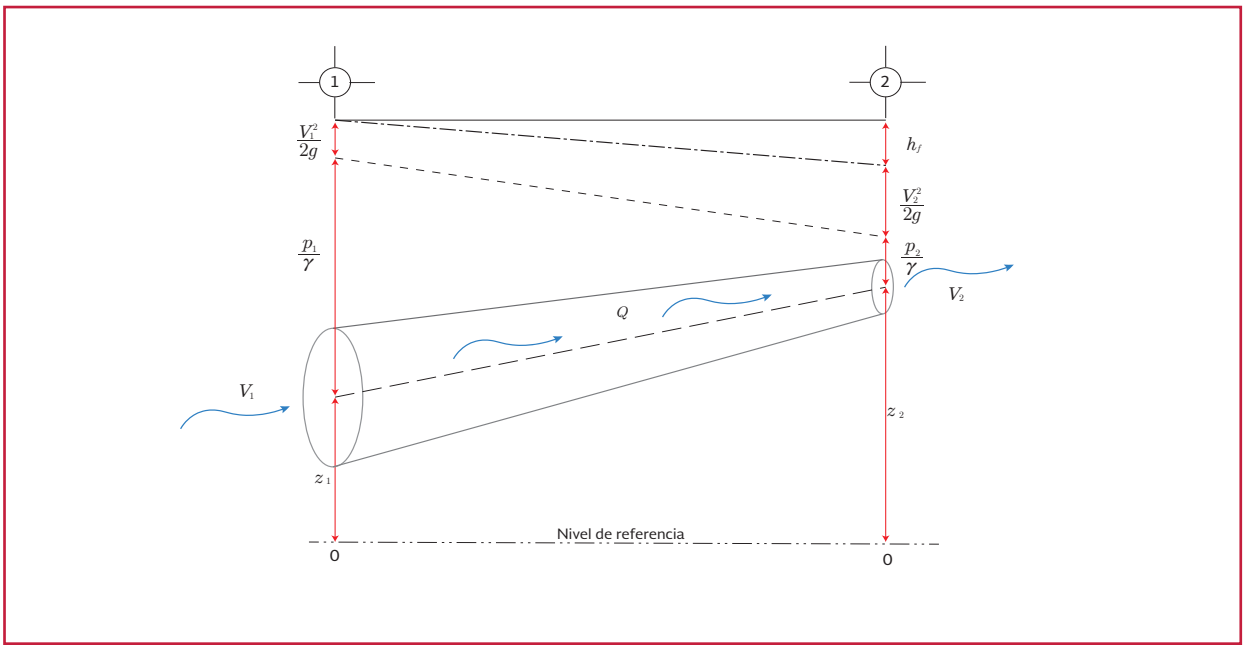
donde:

z_1, z_2 = Elevación de la conducción en las secciones 1 y 2 (m)
p_1, p_2 = Presión interna en las secciones 1 y 2 (N/m²)
H_f = Pérdidas de energía (m)

En esta última ecuación:

- z ("carga de posición", "energía potencial de posición") representa la elevación de la sección (1 ó 2 en este caso) con respecto a la referencia 0-0 en la Ilustración 3.1. La posición de este plano de referencia es completamente arbitraria, en ocasiones se adopta el nivel del mar pero no necesariamente

Ilustración 3.1 Volumen de control simplificado (adaptado de Sotelo, 1997)



- p/γ (“carga de presión”, “energía potencial de presión”) representa la presión en cada sección dividida por el peso específico del líquido
- $V^2/2g$ (“carga de velocidad”, “energía cinética”) representa la energía cinética en cada sección

Obsérvese que la dimensión física de estos elementos no es energía sino longitud. Lo anterior se debe a que durante la deducción de esta ecuación se ha expresado la energía por unidad de peso. Como veremos, esta notación resulta muy conveniente para resolver problemas prácticos.

En la Ecuación 3.2, la suma de los tres términos entre paréntesis se llama energía mecánica total o energía hidráulica. A la suma parcial $z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$ se le suele llamar energía piezométrica o energía motriz, mientras que a $\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$ se le designa por algunos autores como presión total (estática y dinámica respectivamente).

H_f representa la pérdida de energía por unidad de peso entre las secciones 1 y 2 (Ecuación 3.3) y está constituida por las pérdidas por fricción h_f (pérdidas primarias o mayores) y las pérdidas locales h_a (pérdidas por accesorios, secundarias o menores).

$$H_f = h_f + h_a \qquad \text{Ecuación 3.3}$$

donde:

H_f = Pérdida de energía por unidad de peso (m)
h_f = Pérdidas primarias o mayores (m)
h_a = Pérdidas secundarias o menores o por accesorios (m)

Se considera que las pérdidas por fricción se deben al rozamiento de las partículas fluidas entre si y entre éstas y el contorno sólido que las contiene. Por otra parte las pérdidas locales obedecen a singularidades en las tuberías; básicamente accesorios y cambios de dirección.

3.1.2 Pérdidas de energía por fricción en la conducción

La pérdida de carga se calcula a través de la ecuación de Darcy-Weisbach (1856):

$$h_f = f\frac{LV^2}{D2g} \qquad \text{Ecuación 3.4}$$

donde:

f = Coeficiente de pérdidas (adimensional)
L = Longitud de la tubería (m)
D = Diámetro de la tubería (m)
V = Velocidad media del flujo (m/s)
g = Aceleración gravitacional (m/s^2)
h_f = Pérdida de energía por fricción (m)

El coeficiente de pérdidas está en función de la rugosidad de las paredes de la tubería, sin embargo, ésta no es homogénea a lo largo de la conducción, por lo que para fines de diseño se establece un valor medio equivalente. Conviene aclarar que en dicho valor intervienen otros factores como la frecuencia y alineamiento de las juntas o bien el tipo de costura o remachado en tuberías de acero, por ejemplo, y el efecto de las incrustaciones y acumulamientos, por la acción corrosiva del agua (Sotelo, 2002).

A través de estudios experimentales se determinó el coeficiente *f*, el cual se asoció al diámetro y la rugosidad del material de la tubería y número de Reynolds el cual se define como:

$$\mathrm{Re} = \frac{V\,D}{\nu} \qquad \text{Ecuación 3.5}$$

donde:

ν = Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)
Re = Número de Reynolds (adimensional)

Coolebrook y White (1939) presentaron una ecuación empírica para números de Reynolds mayores a 4 000 (zona de transición y turbulencia completa, observe la Ilustración 3.2) en tubos comerciales.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right) \qquad \text{Ecuación 3.6}$$

donde:

ε = Rugosidad absoluta de la pared interior del tubo
Re = Número de Reynolds (adimensional)

Con base en estos resultados, Moody (1944) presentó el diagrama universal para determinar el coeficiente de fricción, *f*, en tuberías de rugosidad comercial que transporta cualquier líquido (Ilustración 3.2).

Por otra parte, el cálculo del coeficiente de pérdidas se puede aproximar de forma directa a través de la ecuación de Swamee–Jain (1976):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{5.74}{\mathrm{Re}^{0.9}}\right)\right]^2} \qquad \text{Ecuación 3.7}$$

válida para $5\,000 < \mathrm{Re} < 10^6$ y $10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2}$.

La Tabla 3.1 presenta algunos valores de rugosidad absoluta para diversos materiales, los cuales fueron tomados de la referencia indicada y no constituyen ordenanza por parte de la Conagua, por lo que es responsabilidad del diseñador el uso de estos da-

Ilustración 3.2 Diagrama universal de Moody, coeficiente de fricción para cualquier tipo y tamaño de tubo (adaptado de Moody, 1944)

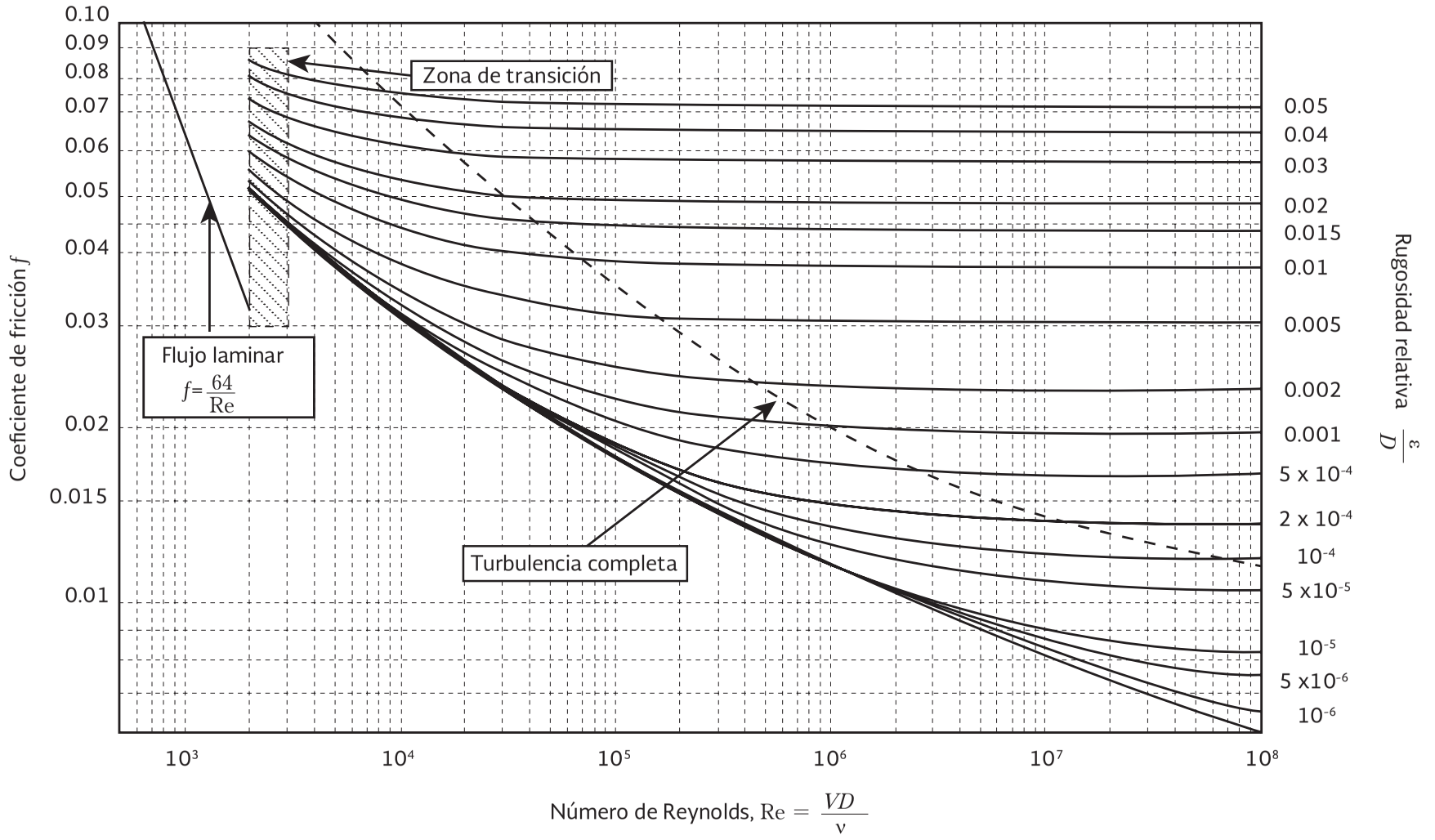


Tabla 3.1 Rugosidades absolutas para algunos materiales (Sotelo, 1997)

Material	ε(mm)
Tubos lisos	
Vidrio, cobre, acero nuevo soldado y con una mano interior de pintura, tubos de acero de precisión sin costura, serpentines industriales, plástico	0.0015
Fierro forjado	0.05
Fierro fundido nuevo	0.25
Fierro fundido, con protección interior de asfalto	0.12
Fierro fundido oxidado	1 a 1.5
Fierro fundido, con incrustaciones	1.5 a 3
Fierro fundido, centrifugado	0.05
Fierro fundido nuevo, con bridas o juntas de macho y campana	0.15 a 0.3
Fierro fundido usado, con bridas o juntas de macho y campana	2 a 3.5
Fierro fundido para agua potable con bastantes incrustaciones y diámetro de 50 a 125 mm.	1 a 4
Fierro galvanizado	0.15
Acero rolado, nuevo	0.04 a 0.1
Acero laminado, nuevo	0.05
Acero laminado con protección interior de asfalto	0.05
Tubos de acero de calidad normal	
Nuevo	0.05 a 0.1
Limpiado después de mucho uso	0.15 a 0.20
Moderadamente oxidado, con pocas incrustaciones	0.4
Con muchas incrustaciones	3
Con remaches transversales, en buen estado	0.1
Con costura longitudinal y una línea transversal de remaches en cada junta, o bien laqueado interiormente	0.3 a 0.4
Acero soldado, con líneas transversales de remaches, sencillas o dobles; o tubos remachados con doble hilera longitudinal de remaches e hilera transversal sencilla, sin incrustaciones	0.6 a 0.7
Acero soldado, con una hilera transversal sencilla de pernos en cada junta, laqueado interior, sin oxidaciones, con circulación de agua turbia	1
Acero soldado, con doble hilera transversal de pernos, agua turbia, tuberías remachadas con doble costura longitudinal de remaches y transversal sencilla, interior asfaltado o laqueado	1.2 a 1.3
Acero soldado, con costura doble de remaches transversales, muy oxidado	
Acero remachado, de cuatro a seis filas longitudinales de remaches, con mucho tiempo de servicio	2
Tubos remachados, con filas longitudinales y transversales	
a) Espesor de lámina < 5 mm	0.65
b) Espesor de lámina de 5 a 12 mm	1.95
c) Espesor de lámina > 12 mm con cubrejuntas	3
Tubos remachados, con cuatro filas transversales y seis longitudinales con cubrejuntas interiores	4
No metálicos	
Fibro cemento nuevo	0.025
Fibro cemento, con protección interior de asfalto	0.0015
Concreto centrifugado, nuevo	0.16
Concreto centrifugado, con protección bituminosa	0.0015 a 0.125
Concreto en galerías, colado con cimbra normal de madera	1 a 2
Concreto en galerías, colado con cimbra rugosa de madera	10
Concreto armado en tubos y galerías, con acabado interior cuidadosamente terminado a mano	0.01
Concreto de acabado liso	0.025
Conducto de concreto armado, con acabado liso y varios años de servicio	0.2 a 0.3

Tabla 3.1 Rugosidades absolutas para algunos materiales, Sotelo, 1997 (continuación)

Material	ε(mm)
Concreto alisado interiormente con cemento	0.25
Galerías con acabado interior de cemento	1.5 a 1.6
Concreto con acabado normal	1 a 3

tos, lo más recomendable, para el caso de tubería nueva, tubería usada y de materiales no considerados en esta tabla, consultar las especificaciones de cada proveedor, las cuales deberán estar fundamentadas en la normatividad correspondiente.

El efecto corrosivo del agua y los años de servicio de la tubería afectan el valor de la rugosidad absoluta del tubo. Para evaluar estos efectos se puede usar el criterio de Genijew (Sotelo, 2002) que corresponde a la Ecuación 3.8.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + a\,t \qquad \text{Ecuación 3.8}$$

donde:

ε_t = Rugosidad del conducto después de t años de servicio (mm)
ε_0 = Rugosidad del tubo nuevo (mm)
a = Coeficiente que depende del grupo en que se clasifique el agua que va a escurrir
t = Número de años de servicio de la tubería

No puede establecerse el resultado de aplicar una ecuación de este tipo como valor de diseño sin un previo estudio, sobre todo en acueductos grandes los cuales pueden limpiarse de forma mecánica con relativa economía , pues se estaría dimensionando en exceso el diámetro del tubo, por lo que deben valorarse también experiencias de conducciones en operación.

3.1.3 Pérdidas locales

La ecuación para el cálculo de las pérdidas locales, h_a, que fueron definidas anteriormente tiene la forma siguiente (ver Tabla 3.2):

$$h_a = k\frac{V^2}{2g} \qquad \text{Ecuación 3.9}$$

donde:

h_a = Pérdida menor (m)
g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)
k = Coeficiente para el cálculo de pérdidas locales (adimensional)
V = Velocidad del fluido (m/s)

Los valores del coeficiente k corresponden a la referencia bibliográfica indicada, por lo que no constituyen ordenanza alguna por parte de la Conagua su uso, se recomienda que las pérdidas locales puedan ser definidas o estimadas en base a los valores proporcionados por los fabricantes, principalmente de válvulas y medidores, en caso contrario, se recomendará el uso de referencias en literatura como: Sotelo (1994) y Cabrera *et al.*, (1997).

Otra manera comúnmente aplicada para determinar las pérdidas locales en el diseño de conducciones, es aplicando el método de longitud equivalente, el cual considera igualar las pérdidas ocasionadas en accesorios a la pérdida que ocurre en un tramo de tubería recta, de esta manera se calcularían las pérdidas solamente con longitudes de tubería, la longitud real más la longitud equivalente por accesorios o por pérdidas locales.

Es recomendable solicitar los nomogramas o tablas de pérdidas locales emitidas por los mismos fabricantes de tuberías o se pueden consultar en

Tabla 3.2 Valores de k para cálculo de pérdidas locales (Sotelo, 1997)

Elemento	Coeficiente k
Válvulas	
Válvula de globo, completamente abierta	10.00
Válvula en ángulo, completamente abierta	5.00
Válvula check completamente abierta	2.50
Válvula de compuerta, completamente abierta	0.20
Válvula de compuerta, con ¾ de apertura	1 a 1.15
Válvula de compuerta, con ½ de apertura	5.60
Válvula de compuerta, con ¼ de apertura	24.00
Accesorios	
Codo de radio corto ($r / d = \pm 1$)	0.90
Codo de radio mediano	0.75 a 0.80
Codo de gran radio ($r / d = \pm 1.5$)	0.60
Codo de 45°	0.4 a 0.42
Retorno (curva en U)	2.20
Tee en sentido recto	0.30
Tee a través de la salida lateral	1.80
Unión	0.30
Ye de 45°, en sentido recto	0.30
Ye de 45°, salida lateral	0.80
Entrada recta a tope	0.50
Entrada con boca acampanada	0.10
Entrada con tubo reentrante	0.90
Salida	1.00
Depósito a tubería (pérdida a la entrada)	
Conexión a ras de la pared	0.50
Tubería entrante	1.00
Conexión abocinada	0.05
De tubería a depósito (pérdida a la salida)	1.00
Contracción brusca (ver Tabla 3.3)	k_c
Codos y tees	
Codo de 45°	0.35 – 0.45
Codo de 90°	0.50 – 0.75
Tees	1.50 – 2.00

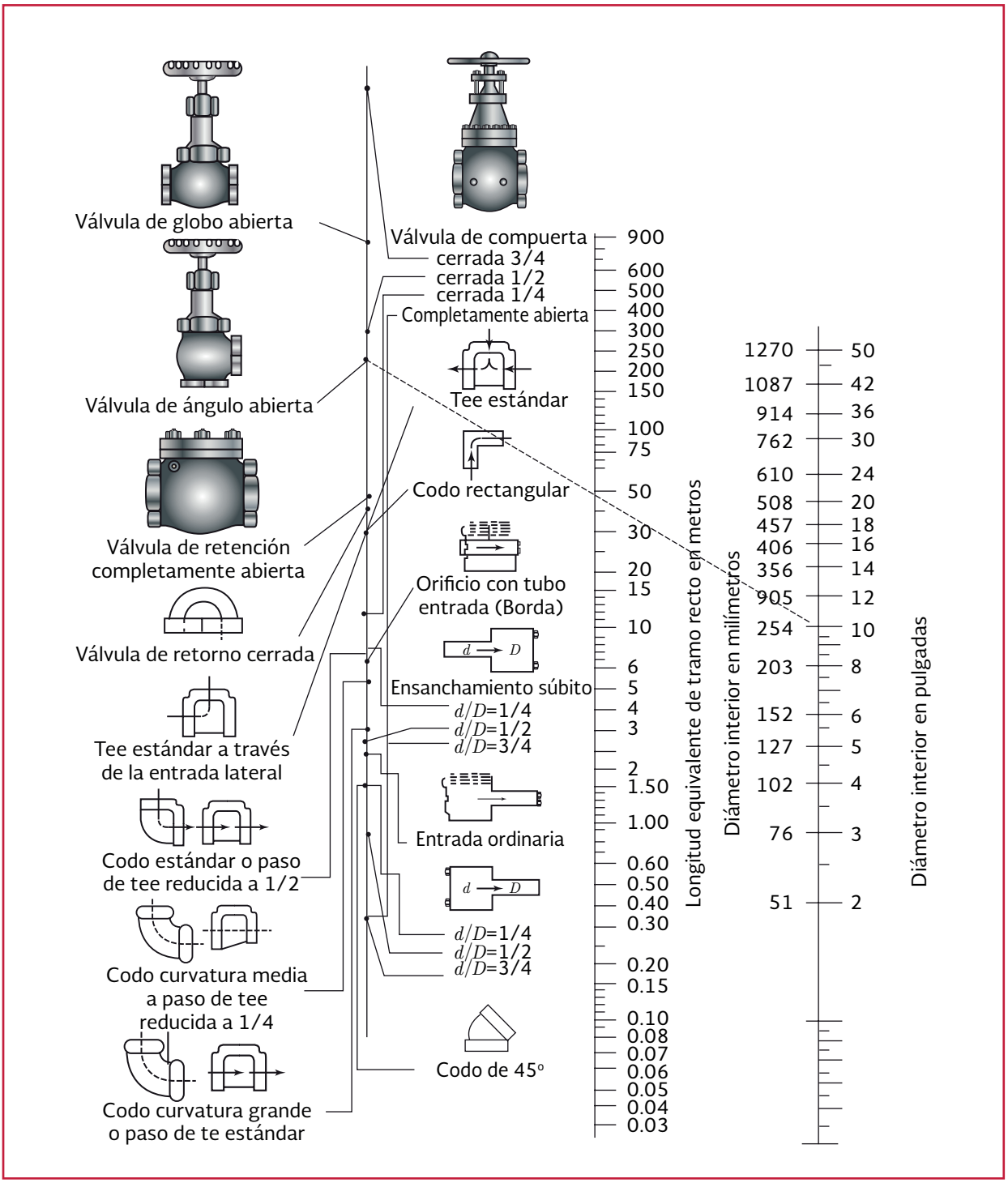
diversas bibliografías, por ejemplo en la Ilustración 3.3 se muestra un nomograma para obtener las pérdidas locales por longitud equivalente.

La línea punteada de la Ilustración 3.3 indica que la pérdida de carga en una válvula de ángulo abierto de 250 mm (10”) es equivalente a la que verifica en un tramo recto de tubería del mismo diámetro de 47 metros de longitud.

Tabla 3.3 Valores de k_c para una contracción brusca (Brater et al., 1996)

D_1/D_2	k_c
1.20	0.08
1.40	0.17
1.60	0.26
1.80	0.34
2.00	0.37
2.50	0.41
3.00	0.43
4.00	0.45
5.00	0.46

Ilustración 3.3 Nomograma para determinar la longitud equivalente (adaptado de Valdez, 1990)



De acuerdo al nomograma para contracciones o ampliaciones bruscas, se debe utilizar el diámetro menor d en la escala de tuberías. Para encontrar la pérdida de carga en accesorios, expresada en metros de tubería del mismo diámetro, se debe unir el punto correspondiente a la pieza de que se trata, al diámetro en la tercer escala a la derecha, la intersección con la escala central determina la longitud equivalente en metros de pérdidas.

En este caso las pérdidas totales se calcularán con la ecuación Ecuación 3.4, con la variante de que la longitud total para definir las pérdidas estará dada por la suma de la longitud "real" de la tubería, más la "longitud equivalente" de los accesorios.

3.1.4 Válvulas, uso y ubicación

Cada vez que la conducción se pone en funcionamiento, es necesario expulsar el aire de la tubería para permitir que el tubo pueda llenarse de agua; en ocasiones esto no es necesario, ya que el perfil puede ser tal que la tubería puede mantenerse llena.

Cuando la conducción se encuentra fuera de funcionamiento y que ésta requiere desaguarse, por ejemplo, para realizar alguna reparación de la tubería, es necesario abrir las válvulas de desagüe colocadas en los puntos bajos de la tubería, y en los puntos altos es preciso admitir aire a la tubería.

Para que se logre el llenado y el vaciado de la tubería, se colocan válvulas de admisión y expulsión de aire, las cuales hacen la doble función, expulsar el aire cuando la tubería se está llenando, o admitir aire a la tubería cuando ésta se está vaciando (ver Ilustración 3.4).

Cuando la conducción se encuentra en funcionamiento, en sus partes altas tiende a acumularse el aire que viene disuelto en el agua. Se estima que el agua que se transporta en los tubos contiene aproximadamente un 2% de aire.

Para desalojar el aire que se va acumulando por esta situación, se colocan válvulas eliminadoras de aire en los puntos altos de la conducción.

Para poder seleccionar de manera adecuada las válvulas y su ubicación, se debe considerar lo siguiente:

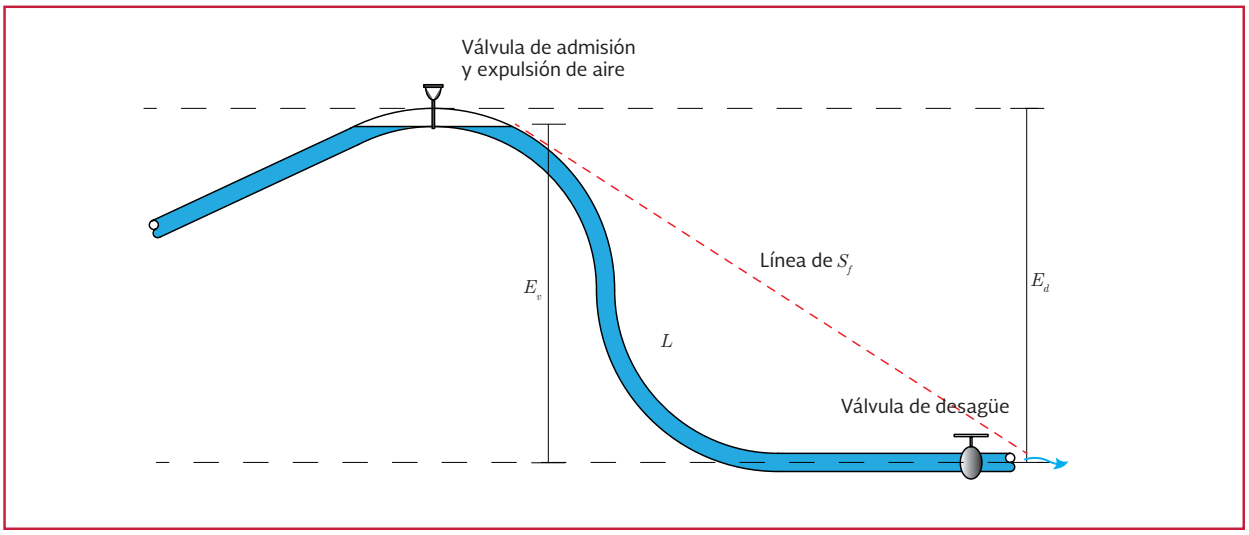
1. Identificar los puntos de mayor altura, es decir, puntos donde la pendiente cambia de manera sensible de una mayor a otra menor o negativa, ya que ahí es donde se necesita admitir o expulsar el aire. Identificar también tramos planos o de pendiente uniforme en la conducción, para este caso se debe considerar colocar las válvulas a distancias entre 500 y 1 000 m
2. Identificar los puntos más bajos de la línea de conducción, en ellos se colocarán las válvulas de desagüe. En tramos largos de pendiente uniforme pueden ubicarse también en puntos intermedios, con el objeto de reducir el tiempo de vaciado
3. Determinar el gasto máximo de llenado de la tubería que está dado por la Ecuación 3.10:

$$Q_{máx} = \Delta h \frac{gA}{a} \qquad \text{Ecuación 3.10}$$

donde:

Q_{max} = Gasto máximo de llenado (m^3/s)
Δh = Resistencia mínima de la tubería (m)
A = Área de la tubería (m^2)
a = Celeridad de la onda de presión (m)

Ilustración 3.4 Gradiente hidráulico



La celeridad de onda de presión depende del fluido y el material de la tubería, la Tabla 3.4 muestra valores enunciativos para este término, se recomienda revisar los libros de *Fenómenos transitorios en Líneas de Conducción, Cálculo y diseño de instalaciones eléctricas* y *Selección de equipos y materiales electromecánicos* del MAPAS.

Con el gasto máximo de llenado se determina la capacidad requerida de expulsión de aire.

4. Determinar el gasto medio y gasto máximo para el vaciado de la tubería. El vaciado programado considera la entrada de aire por medio de válvulas de admisión que eviten depresiones en la conducción; la ubicación de éstas deberá ser en los puntos altos del trazo. Las válvulas de admisión deben de tener suficiente capacidad para admitir el aire que pueda suplir el gasto que sale de las válvulas de vaciado, sin llegar a producirse depresiones inadmisibles, ver apartado 7.5

El gasto de vaciado programado de una conducción generalmente estará definido por el operador con base al volumen de agua por vaciar, que a su vez depende del diámetro y la longitud de la conducción. Por tanto el gasto medio de vaciado será en función del tiempo de vaciado y el volumen a desalojar:

Tabla 3.4 Módulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (μ) y magnitud tentativa de la celeridad de onda (a) para materiales de tubería (Sanks, 1998)

Material	E_{mat} N/m²	E_{mat} kg/cm²	μ	Magnitud de a (m/s)
Acero	(200 - 212) E+9	(2 030 - 2 160) E+3	0.30	1 000 - 1 250
Fibrocemento	23.5 E+9	240 E+3	0.30	900 - 1 200
Concreto presforzado	39 E+9	398 E+3	0.15	1 050 - 1 150
Hierro dúctil	166 E+9	1 690 E+3	0.28	1 000 - 1 350
Polietileno alta densidad	(0.59 - 1.67) E+9	(6 - 17) E+3	0.45	230 - 430
PVC	(2.4 - 2.75) E+9	(24.5 - 28.1)E+3	0.45	300 - 500

$$Q_{Vac} = \frac{L\,A}{t}$$ Ecuación 3.11

donde:

Q_{Vac} = Gasto medio de vaciado (m^3/s)
L = Longitud de la tubería (m)
A = Área de la tubería (m^2)
t = Tiempo de vaciado (s)

El tiempo de vaciado puede variar mucho de una línea de conducción a otra, desde minutos hasta varios días. Considerando la capacidad tentativa de evacuar agua de una válvula de desagüe, y el caudal admisible que se puede desalojar para las condiciones del terreno y el destino del agua desalojada, el operador podrá calcular este tiempo de vaciado despejando *t* de la Ecuación 3.11, para una o más válvulas de desagüe. Se recomienda que este tiempo no sea demasiado largo, a manera de ejemplo que no sobrepase de 6 a 8 horas

Así mismo es importante revisar el gradiente hidráulico y la velocidad de vaciado. El gradiente hidráulico S_f con el cual se va desaguando la tubería se calcula como:

$$S_f = \frac{E_v - D_m - E_d}{L}$$ Ecuación 3.12

donde:

E_v = Diferentes elevaciones que puede tomar la superficie del agua en el tubo (m)
D_m = Presión de succión máxima admisible en la tubería (m)
E_d = Elevación a la que se encuentra la válvula de desagüe (m)
L = Longitud de la tubería de conducción (m)

Una vez definido el gradiente hidráulico máximo que se presenta en el tramo que existe entre la válvula de admisión y la de desagüe, con la Ecuación 3.13 (*Hydraulic Research Station*, 1969); que se obtiene combinando las ecuaciones de Darcy-Weisbach y de Colebrook-White, se calcula el gasto máximo de vaciado:

$$Q_{mv} = -\frac{\pi}{2} D^{\frac{5}{2}} \sqrt{2g\,S_f}\,\log\left(0.27\frac{\varepsilon}{D} + \frac{2.51\,\nu}{D^{\frac{3}{2}}\sqrt{2g\,S_f}}\right)$$

Ecuación 3.13

5. Se realiza una comparación de los caudales de llenado y vaciado y se selecciona aquel que sea mayor
6. El diámetro de la válvula se determina con ayuda de las curvas de funcionamiento con una carga máxima de expulsión de tres metros de columna de agua (4.26 lb/in^2) o inferior en caso de existir peligro de colapso en la tubería, ver Ilustración 3.5, Ilustración 3.6. Éstas son proporcionadas por los fabricantes y comúnmente se presentan en unidades del sistema inglés
7. El gasto calculado por la Ecuación 3.13 se emplea para revisar si el gasto por drenar pueda fluir por el tramo de tubo y se verifica la velocidad en la tubería para ese gasto. Si el gasto y velocidad en el tubo son adecuados, se calcula el diámetro del desagüe. Para calcular el diámetro del desagüe se parte de la ecuación de descarga un orificio:

$$Q = C_d A\sqrt{2gH}$$ Ecuación 3.14

de la cual se despeja el diámetro teórico del desagüe Ddesagüe como:

$$D_{desague} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi C_d\sqrt{2gH}}} = 0.54\sqrt{\frac{Q}{C_d\sqrt{H}}}$$ Ecuación 3.15

Ilustración 3.5 Curvas de funcionamiento de válvulas de admisión y expulsión de aire con orificios de 1" a 3"

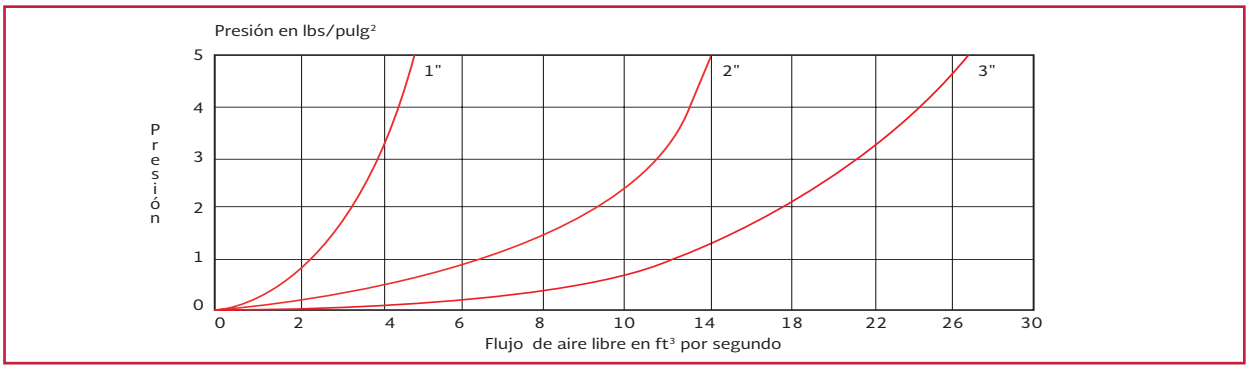
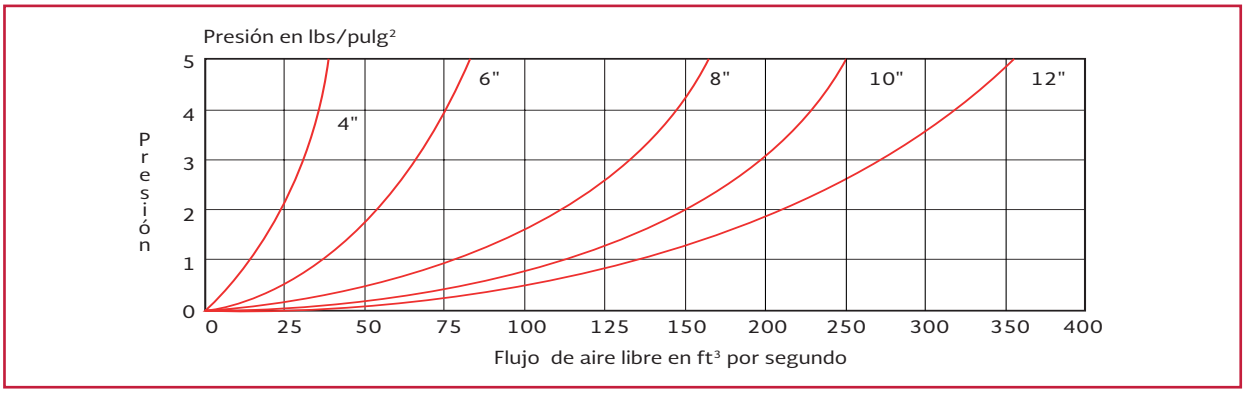


Ilustración 3.6 Curvas de funcionamiento de válvulas de admisión y expulsión de aire con orificios de 4" a 12"



donde C_d es el coeficiente del gasto, igual a 0.60 para una descarga de pared delgada e igual a 0.82 para una descarga de pared gruesa o tubo corto, aproximadamente (Sotelo 1997); A es el área de la sección transversal del tubo de desagüe; y H es la diferencia entre el nivel de agua en la tubería y el punto de desagüe. El diámetro calculado por la Ecuación 3.15 se aproxima al diámetro comercial más cercano, se calcula el área A, y el gasto Q de la Ecuación 3.14 para el desnivel H entre el punto más alto y el punto de desagüe, que representa el gasto máximo del vaciado para este diámetro comercial. Debido a que el vaciado se produce con un desnivel H variable, el gasto medio del vaciado Q_{vac} se puede aproximar como el gasto medio de vaciado de un depósito con carga variable, que es igual a la mitad del gasto máximo (Sotelo 1997). Con este gasto medio se despeja el tiempo t de la Ecuación 3.11, y se compara con el tiempo deseado de vaciado (6 a 8 horas como se señaló anteriormente). Si no se cumple con el tiempo deseado se colocan desagües intermedios para reducir la longitud y así llegar al tiempo deseado. Si, por el contrario, se obtiene un tiempo de vaciado demasiado corto, se asume un diámetro comercial menor que proporcione un tiempo de vaciado razonable. Si el gasto calculado por la Ecuación 3.13 y la velocidad correspondiente en el tubo no resultan adecuados se examina la opción de colocar una válvula de desagüe con un diámetro tal que produzca un tiempo de vaciado que se crea conveniente. Cabe recalcar que para el diseño de la válvula de admisión de aire se toma el gasto máximo que puede fluir (considerando

este gasto puede generarse no sólo en los vaciados intencionales de la línea sino en una falla de la misma) que pueda, pero el diámetro del desagüe se calcula para el gasto máximo que se desea drenar.

8. Cuando la capacidad de admisión o descarga de aire no se puede alcanzar con una sola válvula, es posible instalar varias válvulas en paralelo
9. Se dimensionan las válvulas eliminadoras de aire, que normalmente se combinan con las válvulas de admisión y expulsión, también con ayuda de las curvas de funcionamiento (ver Ilustración 3.7, Ilustración 3.8) proporcionadas por los fabricantes. La selección se realiza para la presión de operación normal, y a falta de datos sobre el caudal de aire a eliminar éste se asume igual a 2% del caudal de agua en operación normal de la línea

Las curvas de funcionamiento de la Ilustración 3.5 a Ilustración 3.8 se muestran a manera de ejemplo, cabe señalar que el diseñador deberá verificar las curvas de funcionamiento específicas del proveedor o fabricante que se trate, debido a la variedad de proveedores existentes en el mercado para este tipo de dispositivos.

Es importante que la clase o resistencia de las válvulas de aire y válvula de desagüe sean adecuadas para las presiones que se presentarán en la tubería en el punto de su colocación. Las presiones altas en los puntos de los desagües pueden hacer problemática la

Ilustración 3.7 Curvas de funcionamiento de válvulas eliminadoras de aire con orificios de $^{3}/_{32}$" y $^{1}/_{8}$"

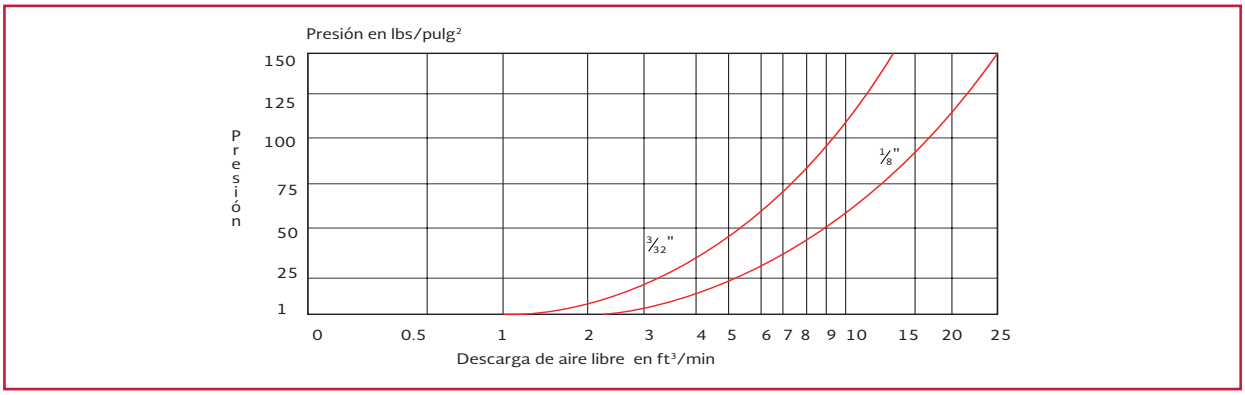
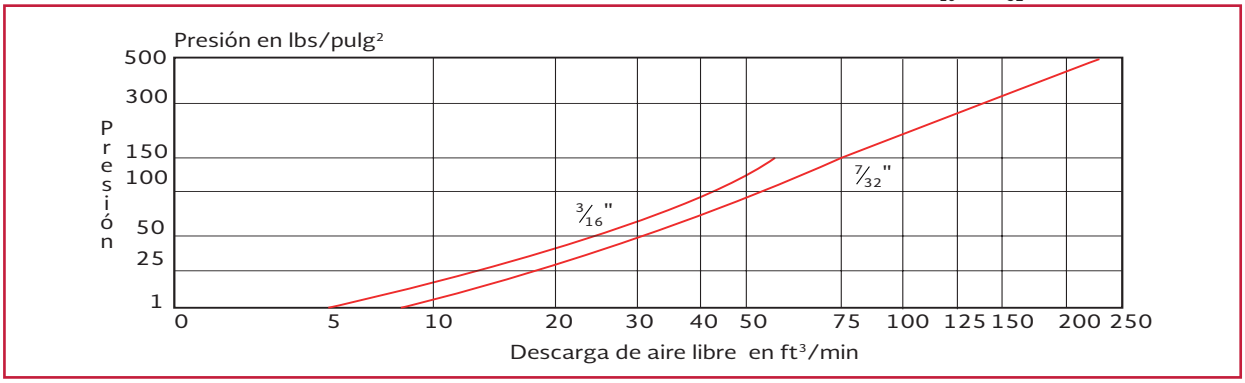


Ilustración 3.8 Curvas de funcionamiento de válvulas eliminadoras de aire con orificios de $^{3}/_{16}$" y $^{7}/_{32}$"



apertura de las válvulas de desagüe, en cuyos casos dichas válvulas se pueden sustituir por tapas bridadas que sin embargo requerirán de cuidados especiales al abrirlas.

Ejemplo 3.1

Considerando una tubería de acero de 16" (0.4064 m) de diámetro, 1 035 m de longitud, gasto de diseño de 20 l/s, desnivel de 12.5 m entre el punto más alto y el punto de desagüe y una resistencia mínima de 70 m (este dato debe ser obtenido del fabricante o proveedor), se tiene que determinar el diámetro de las válvulas de admisión y expulsión de aire, válvulas eliminadoras y desagues, para los siguientes datos:

Δh = 70 m
A = 0.1297 m^2
a = 1 000 m/s

Solución

De la Ecuación 3.10 se tiene:

$$Q_{llen} = 70\,\frac{(9.81)(0.1297)}{1\,000} = 0.088\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$$

Con los datos del problema se tiene:

$$S_f = \frac{12.5}{1\,035} = 0.012$$

Cabe señalar que para el cálculo de S_f, se han considerado despreciables las pérdidas menores por accesorios, los cambios de diámetro y de rugosidad de los tubos. Cuando sea importante el número de accesorios y las pérdidas se consideren significativas, se deberán contemplar en una longitud equivalente al tubo de la línea de conducción, sumando este valor a la longitud L ya definida, utilizando la Ecuación 3.13 y para una viscosidad cinemática del agua a 20°C ($\nu = 1\times10^{-6}\ m^2/s$) y una rugosidad asumida de ε= 0.1mm.

$$Q_{mv} = -\frac{\pi}{2}(0.4064)^{5/2}\sqrt{(2)(9.81)(0.012)}\left[\log\left(0.27\left(\frac{0.1}{406.4}\right) + \frac{(2.51)(1x10^{-6})}{(0.4064)^{5/2}\sqrt{(2)(9.81)(0.012)}}\right)\right] = 0.326\,m^3/s$$

Comparando los caudales de llenado y vaciado se observa que el mayor es el de $Q=0.326\ m^3/s$ ($10.99\ ft^3/s$). El diámetro de la válvula se determina con ayuda de las curvas de funcionamiento, ver Ilustración 3.5, Ilustración 3.6, en este caso la sección de la válvula es de 2".

Ahora verificaremos la velocidad en el tubo, para el gasto de la Ecuación 3.13 tenemos:

$$V = \frac{0.326}{\pi\dfrac{(0.4064)^2}{4}} = 2.51\ \mathrm{m/s}$$

Esta velocidad es aceptable, más aun porque se presentará solamente en los eventuales vaciados de la línea.

Asumiendo C_d = 0.60 para una descarga de pared delgada se calcula el diámetro teórico del desagüe $D_{desagüe}$ por la Ecuación 3.15 como:

$$D_{desague} = 0.54\sqrt{\frac{0.326}{0.60\sqrt{12.50}}} = 0.212\,m$$

Se asume el diámetro comercial más cercano, igual a 8" (0.2048 m), y se calcula el gasto por la Ecuación 3.14 como:

$$Q = C_d A\sqrt{2gH} = \frac{(3.1416)(0.2048)^2}{4}\sqrt{(19.62)(12.5)}$$
$$= 0.305\, m^3/s$$

Este es el gasto máximo de vaciado. El gasto medio de vaciado es igual al doble de este valor, es decir 0.710 m³/s, con el cual la Ecuación 3.11 da un tiempo de vaciado *t* igual a 811.20 segundos. Este tiempo de vaciado es admisible, pero muy corto, por lo que se puede reducir el diámetro del desagüe, por ejemplo a 6", con lo que las mismas ecuaciones dan un gasto medio de vaciado de 0.0857 m³/s y un tiempo de vaciado de 1 567 segundos.

Si un 1 m³/s es igual a 2 118.88 ft³/min entonces el gasto para la selección de las válvulas eliminadoras, igual a 2% del gasto de diseño de 0.02 m3/s es:

$$Q_{ve} = (0.02)(0.02)(2\,118.88)$$
$$= 0.8476\ \mathrm{ft}^3/\mathrm{min}$$

De la Ilustración 3.7 se observa que aun la válvula de $^3/_{32}$", la más pequeña mostrada en dicha ilustración, es suficiente para eliminar el aire en la línea de conducción para cualquier presión de operación, e incluso se puede buscar una más pequeña si se encontrara un fabricante que la maneje.

3.2. Línea de conducción por gravedad

En el diseño de una línea de conducción por gravedad, se debe encontrar el tubo necesario que transporte el gasto de diseño sobre una topografía que proporcione un desnivel favorable hacia el punto de descarga. En este tipo de conducción se tiene un desnivel disponible dado entre las cargas hidráulicas existentes en el inicio (en la fuente) y el final (la descarga) de la conducción. El problema consiste en determinar el diámetro del tubo, que conducirá el gasto deseado *Q* con una pérdida de carga dada en la conducción.

Es necesario que al momento de trazar la linea piezométrica resultante en el perfil del terreno, ésta no cruce el terreno natural a lo largo de la conducción, que aritméticamente corresponde a presiones negativas en ciertos puntos de la conducción. Presiones negativas en el flujo de agua son posibles hasta cierto límite, igual a la presión absoluta de vapor saturado del agua, por lo que si el valor obtenido es inferior a esa presión la interpretación física es que el gasto que pasará por la línea será menor al requerido.

Otro punto importante a considerar durante la definición de los diámetros óptimos para la linea de conducción son las velocidades que se presenten en el flujo, para las cuales se recomienda que no sobrepasen ciertos límites. En el libro de Datos Básicos de MAPAS se indican las velocidades admisibles para diferentes materiales de tubería, que son la velocidad mínima para evitar la precipitación de partículas que arrastre el agua y la velocidad máxima que no ocasiona erosión en las paredes de las tuberías, siendo la velocidad mínima igual a 0.30 m/s para todos los materiales y la velocidad máxima de 3 a 5 m/s según el tipo de material. Para el diseño de las líneas de conducción sin embargo normalmente no se llega a esos valores extremos de la velocidad dado que la velocidad se limita con base a criterios económicos y otros relacionados con la operación y efectos transitorios, siendo el valor recomendable variable para la velocidad máximas desde 2.1 hasta 2.5 m/s, y 0.5 m/s para la velocidad mínima, en casos excepcionales (grandes desniveles), se pueden aceptar velocidades hasta 3 m/s. Es importante mencionar

que aun cuando en el diseño no se alcancen dichas velocidades máxima, se deberá proceder siempre a la revisión del fenómeno transitorio que pudiera presentarse de acuerdo al tipo de conducción.

Ejemplo 3.2

En este caso se mostrará el procedimiento para determinar la velocidad y el caudal que circula por una tubería dada (revisión de una línea existente), conociendo las características de la tubería y las del fluido. Para resolver este problema se debe de seguir el procedimiento indicado a continuación.

La problemática que se ejemplifica, implica incrementar el caudal de descarga entre dos tanques.

Datos:

Dos tanques de abastecimiento de agua potable están conectados con una tubería de PVC de 8 pulgadas (0.2032 m) de diámetro y 800 m de longitud, la línea cuenta con 10 años de servicio y de acuerdo a los análisis de calidad del agua, contiene menos de 3 mg/L de materia orgánica y hierro en solución. Se requiere conocer la capacidad actual de la línea instalada para definir la pertinencia del cambio de la misma en un cierto tramo o en toda la línea, debido a que con el paso del tiempo el volumen entregado aún con la válvula de salida completamente abierta no es suficiente (ver Ilustración 3.9).

La diferencia de niveles entre los tanques es de 25 m. Todos los accesorios que forman parte del sistema, incluyendo la entrada y la salida, implican un coeficiente global de pérdidas locales de k=15.2. Se deberá proponer una cierta longitud de tubo de mayor diámetro que permita recuperar el caudal original que se ha perdido por el cambio en la rugosidad del tubo instalado, debido a una mayor demanda de la localidad. Así también se desea conocer el caudal que actualmente circula en la línea. El caudal que se demanda actualmente es de 75 litros por segundo. Se deberá comparar la opción de combinar diámetros aprovechando un tramo de la línea existente o reemplazar la línea existente por una nueva de 8 pulgadas para recuperar su caudal con tubería nueva.

Solución:

Si aplicamos la ecuación de conservación de energía entre los dos tanques:

$$\left(z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}\right)-\left(z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2g}\right)=H_f$$

Reagrupando:

$$(z_1-z_2)+\left(\frac{p_1-p_2}{\gamma}\right)+\left(\frac{V_1^2-V_2^2}{2g}\right)=H_f$$

Considerando que la velocidad es la misma a lo largo de la tubería y que los tanques se encuentran a presión atmosférica resulta H_f=L S_f:

$$S_f=\frac{H_f}{L}=\frac{25}{800}=0.03125$$

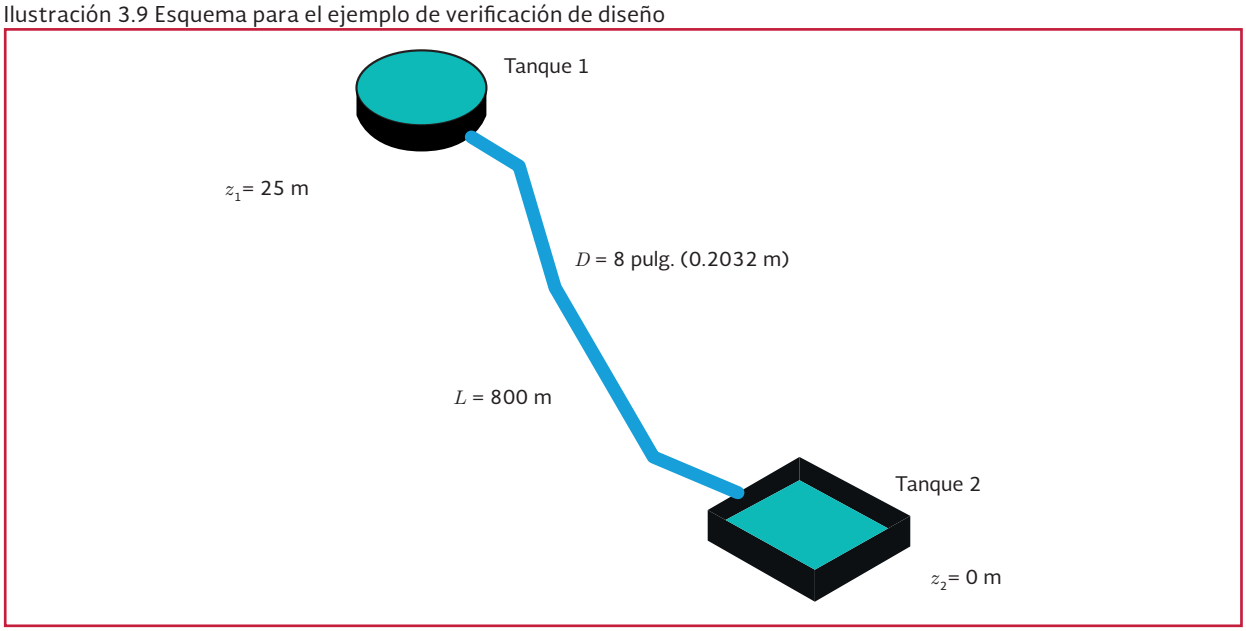
Por otra parte las pérdidas están compuestas por dos partes, pérdidas por conducción y pérdidas por accesorios:

$$H_f=h_f+h_a=25\text{ m}$$

De la Ecuación 3.9 se obtiene:

$$h_a=k\frac{V^2}{2g}$$

Ilustración 3.9 Esquema para el ejemplo de verificación de diseño



y de la Ecuación 3.13, despejando la velocidad con la ecuación de continuidad se tiene:

$$V = -2\,D^{\frac{1}{2}}\sqrt{2g\,S_f}\,\log\left(0.27\frac{\varepsilon}{D}+\frac{2.51\,\nu}{D^{\frac{3}{2}}\sqrt{2g\,S_f}}\right)$$

Como puede notarse, se tienen las siguientes incógnitas (h_a, h_f,, V y la proporción de longitudes de diámetros combinados L_1 y L_2) y tres ecuaciones, por lo que la forma de resolver este sistema es a través de un proceso iterativo. En este caso debido a que la tubería ya cuenta con cierto tiempo de servicio y el agua presenta componentes de hierro, se deberá afectar la rugosidad *e*. En este caso se tiene un agua del grupo II de acuerdo a la tabla del coeficiente de Genijew y para afectar la rugosidad (Sotelo, 1994) el coeficiente *a* se considera con un valor medio de 0.07.

Aplicando la Ecuación 3.8 de Genijew resulta con 10 años de servicio nuestro nuevo valor:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_o + \alpha\, t = 0.0015 + (0.07)\,(10) = 0.7015$$

Paso 1: se propone un valor de h_f= 25 m

Paso 2: se calcula la velocidad considerando una viscosidad cinemática del agua a 20°C (ν=1×10^{-6} m^2/s).

$$V = -2(0.2032)^{\frac{1}{2}}\sqrt{2(9.81)(0.03125)}\,\log\left\{0.27\left(\frac{0.75}{203.2}\right)+\frac{2.51(1x10^{-6})}{(0.2032)^{\frac{5}{2}}\sqrt{2(9.81)(0.03125)}}\right\} = 2.13\frac{m^3}{s}$$

Paso 3: se calculan las pérdidas por accesorios.

$$h_a = 15.2\frac{(2.13)^2}{2(9.81)} = 3.51 \ \ \text{m}$$

Paso 4: se propone nuevamente h_f como:

$$h_f = 25 - h_a = 25 - 3.51 = 21.49 \ \ \text{m}$$

Paso 5: se repite el proceso hasta que el valor de h_f converge con un error aceptable. La Tabla 3.5 muestra los resultados de este proceso, nótese que se requirieron 5 iteraciones para logar converger el valor.

Con lo anterior se obtiene un caudal actual de 65 L/s, el cual es inferior a los 75 L/s demandados actualmente, de esta manera se deberá encontrar la longitud de tubería que se deberá ampliar con un diámetro mayor para definir la opción más viable entre reemplazar un tramo con un diámetro mayor o reemplazar toda la línea con el diámetro que se requiera.

En este punto se revisará la longitud para un tramo de 10 pulgadas de PVC, con la Ecuación 3.16 para diámetros combinados:

$$L_1 = \frac{\frac{E_1 - E_2}{Q^2} - \frac{0.81\, f_2\, L}{g\, D_2^5}}{\frac{0.81\, f_1}{g D_1^5} - \frac{0.81\, f_2}{g D_2^5}}$$

Ecuación 3.16

donde:

L_1 = Longitud del diámetro mayor (m)
E_1 = Energía o nivel en el tanque origen (m)
E_2 = Energía o nivel en el tanque destino (m)
Q = Caudal a conducir (m^3/s)
L = Longitud total del tramo (m)
D_1 = Diámetro mayor (m)
D_2 = Diámetro menor (m)
f_1 = Coeficiente del diámetro mayor
f_2 = Coeficiente del diámetro menor

en donde los subíndices 1 representan los datos del tubo con diámetro mayor, en este caso de 10 pulgadas. Calculando con la Ecuación 3.7 para definir el valor de f_2 tenemos para la tubería de 8 pulgadas con 10 años de servicio utilizando el valor de ε obtenido anteriormente:

$$f_2 = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{0.7015/203.2}{3.71} + \frac{5.74}{469946^{0.9}}\right)\right]^2}$$

Q = 0.075 m^3/s
D_2 = 0.2032 m = 8 pulg
ε = 0.7015 mm

Resultando el factor de fricción f_2 = 0.027583.

Para la ecuación que define la longitud del diámetro mayor, las energías 1 y 2 son las disponibles en la salida y la llegada del tanque, en este caso los niveles del agua en cada uno, los cuales son las cotas 0.0 y 25.0.

Obtenemos los valores de f_1 también para el tubo nuevo de 10 pulgadas con la rugosidad de f_2, resultando el factor de fricción f_1 = 0.013882.

Tabla 3.5 Iteraciones realizadas en el paso 5

Iteración	h_f	h_a	V	Q	Error
Número	m	m	m/s	m^3/s	$H_f - h_f - h_a$
1	25.00	3.50	2.12	0.06	-3.50
2	21.52	3.01	1.97	0.06	0.49
3	21.98	3.08	1.99	0.06	-0.07
4	21.91	3.07	1.99	0.06	0.01
5	21.92	3.07	1.99	0.06	0.00
6	21.92	3.07	1.99	0.06	0.00

Con los siguientes datos se calcula la longitud L_1

E_1 = 25.0 m
E_2 = 0.0 m
Q = 0.075 m^3/s
L = 800 m
D_1 = 0.2540 m
D_2 = 0.2032 m

Calculamos la longitud del tramo de 10 pulgadas requerido para recuperar la capacidad de conducción:

$$L_1 = \frac{\frac{25.00-0.0}{0.075^2} - \frac{0.013882\,(0.81)\,(800)}{9.81\,(0.2032)^5}}{\frac{0.013882\,(0.81)}{9.81\,(0.2540)^5} - \frac{0.027583\,(0.81)}{9.81\,(0.2032)^5}}$$

$$= 148.41 \text{ m}$$

Para la tubería de 10 pulgadas resultó una longitud de 148.41 metros y para la existente de 8 pulgadas es posible mantener en uso 651.58 metros lineales. Redondeando a metros completos serían 149 metros de 10 pulgadas por reemplazar.

Considerando un costo de suministro e instalación de tubería de 10 pulgadas de PVC a $286.00 por metro lineal resulta un total de $42 614.00 mientras que un reemplazo de la totalidad de la línea con tubería de 8 pulgadas, con un costo unitario de $244.00 para tubo de 8 pulgadas, resulta en $195 200.00, con un importe de ahorro de $152 586 utilizando la consideración de la tubería de 10 pulgadas.

De esta manera se puede observar que en una primera aproximación es posible sustituir 149 metros de 8 pulgadas por tubería de 10 pulgadas de PVC, con lo que se tendría el suministro requerido de 75 L/s. Esto a manera de ejemplo permite ver las diversas opciones de análisis que se tienen para solucionar un problema y estar en posibilidades de tomar la mejor decisión tanto económica como técnica. Considerando que la rugosidad de la tubería puede seguir incrementándose cada año, el análisis puede ser complementado con la variante de cambiar la totalidad de la tubería en el tiempo.

Ejemplo 3.3

Datos:

Se requiere diseñar una línea de conducción de tubería plástica (PVC o polietileno) entre dos tanques para un gasto de diseño de 252 L/s. El nivel de agua en el Tanque 1 (el más alto) varía entre 679.10 y 681.89 metros sobre el nivel del mar (msnm), y la tubería descarga en el Tanque 2 a un nivel igual a 674.94 msnm. La longitud de la tubería L es igual a 2 360 m. Las pérdidas de carga menores se consideran despreciables.

Solución:

La Tabla 3.6 muestra el cálculo de la pérdida de carga H_f (igual a la diferencia entre el nivel de agua en el Tanque 1 y el nivel de descarga en el Tanque 2) y el gradiente hidráulico $S_f = H_f/L$. Para definir el orden de magnitud de los diámetros por considerar se calcula luego un valor teórico tentativo para el diámetro de la tubería, para cierta velocidad del flujo asumida correspondiente al gasto de diseño, por ejemplo para 1.00 m/s (otra manera de obtener este diámetro, exacta pero un poco más compleja matemáticamente, es despejarlo de la Ecuación 3.4 con la ayuda de algún método numérico). De la ecuación de continuidad:

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0.252}{1.00} = 0.252 m^2$$

de donde

$$D = \sqrt{\frac{4\,A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\,(0.252)}{3.1416}} = 0.566 m$$

Se calcula después el gasto en la tubería por la Ecuación 3.13, y la velocidad correspondiente, para varios diámetros comerciales de la tubería cercanos a este diámetro teórico. La Tabla 3.7 presenta los valores obtenidos, para una rugosidad de 0.0015 mm (para tubería plástica nueva) y viscosidad cinemática del agua a 20°C ($\nu = 1\times10\text{-}6\ m^2/s$), donde Q_{min} y Q_{max}, y V_{min} y V_{max}, representan estos valores para el nivel máximo y nivel mínimo en el Tanque 1 respectivamente. Se observa que para diámetros de 16" y 18" no se puede conducir el gasto de diseño de 252 L/s. Para el diámetro de 20" se puede conducir para ciertos valores de la pérdida de carga (desnivel) H_f, pero no para el valor mínimo de H_f. El diámetro de 24" a su vez resulta con capacidad de conducción sobrada.

Cabe señalar que los cálculos se deben hacer con el diámetro interior exacto, que por general depende de la clase del tubo y no siempre es igual al diámetro nominal en pulgadas, aunque en la Tabla 3.7 para simplificar se usa el diámetro correspondiente al diámetro nominal.

En este ejemplo, para garantizar el gasto de diseño el proyectista tiene la opción de diseñar la línea con cierta parte de 20" y el resto de 24", en cuyo caso con el uso de la Ecuación 3.16 podrá calcular las longitudes de estas dos partes que proporcionen exactamente el gasto de diseño. Otra opción es dejar toda la tubería con diámetro de 24" con capacidad sobrada. Esta situación en realidad se tiene en la mayoría de los diseños de líneas por gravedad dado que hay que diseñar con diámetros comerciales que no darían exactamente el gasto de diseño. Se calculan las longitudes teóricas requeridas y sobre sus resultados y simulaciones del funcionamiento se toma la decisión de diseñar con combinación de diámetros o con uno sólo. Teniendo en cuenta que el cálculo por la Ecuación 3.16 supondría una rugosidad constante *e* igual a la rugosidad de tubo nuevo, y que esta rugosidad por lo general se incrementaría en el tiempo de operación, la variante con un solo diámetro normalmente resulta más práctica, aun con capacidad sobrada. Si se requiere mantener exactamente el gasto de diseño en la operación habría que agregar algún elemento de control del mismo, tal como una válvula que genere ciertas pérdidas de carga, en forma automática o manual.

Tabla 3.6 Cálculo de la pérdida de carga H_f y el gradiente hidráulico S_f

	E_1 (m)	E_2 (m)	H_f (m)	S_f
Nivel mínimo	679.10	674.94	4.16	0.001763
Nivel máximo	681.89	674.94	6.95	0.002945

Tabla 3.7 Gastos y velocidades para diferentes diámetros de la tubería del Ejemplo 3.3

D (pulg)	D (mm)	Q_{min} (L/s)	Q_{max} (L/s)	V_{min} (m/s)	V_{max} (m/s)
16	406.4	131.49	174.29	1.01	1.34
18	457.2	179.65	238.02	1.09	1.45
20	508.0	237.45	314.48	1.17	1.55
24	609.6	384.56	508.96	1.32	1.74

La Ilustración 3.10 muestra la posición de la línea de gradiente hidráulico (línea piezométrica) de este ejemplo, que no cruza el terreno en ningún punto. A partir de la línea estática máxima (681.89) se trazan las clases resistentes de tubos comerciales y sobre estas se seleccionan las clases a emplear por tramos. Se examinan luego los posibles transitorios en la línea, generados por ejemplo por el cierre de válvulas en su final, y se obtienen las sobrepresiones transitorias resultantes, que en su caso pueden requerir modificar las clases de tubo seleccionadas.

3.3. Línea de conducción por bombeo

Para adicionar energía hidráulica a una conducción, a la ecuación de conservación de energía (Ecuación 3.2) se debe adicionar la carga correspondiente H_B que debe suministrar el equipo de bombeo.

$$\left(z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}\right)-\left(z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2g}\right)=H_f-H_B$$

Ecuación 3.17

donde:

H_B = Energía que suministra el equipo de bombeo (m)

La Ilustración 3.11 presenta el arreglo típico de una conducción a presión en la cual se ha instalado una bomba. Puede apreciarse que la piezométrica observa un ascenso brusco en la sección que ocupa la bomba, debido naturalmente a la energía que ésta transfiere al líquido.

Ejemplo 3.4

Un sistema de captación de agua necesita bombear un gasto de 50 L/s desde el sitio de toma hasta un tanque de potabilización. Estos dos puntos se encuentran separados a una distancia de 1 000 m, existiendo 20 m de diferencia entre los niveles en la obra de toma y el nivel en el tanque (ver Ilustración 3.12). Si se dispone de una tubería de PVC de 8 pulgadas (0.2032 m) de diámetro y un coeficiente de pérdidas menores o por accesorios de 10.2. ¿Cuál es la potencia que debe de suministrar la bomba en el sitio de toma? (ν=1.007 x 10^{-6} m^2/s).

Al conocer el diámetro de la tubería de conducción y el caudal que se desea entregar, se hace uso de la ecuación de conservación de masa (Ecuación 3.1):

$$V_1A_1 = V_2A_2$$

Y sabiendo que:

$$Q = AV \therefore V = \frac{Q}{A}$$

Se obtiene la velocidad presente en la conducción:

Considerando que:

$$A = \pi\frac{D^2}{4}$$

$$V = \frac{0.05}{\pi\frac{(0.2032)^2}{4}}$$

$$V = 1.56 \text{ m/s}$$

Una vez conociendo la velocidad presente en la línea de conducción se aplica la ecuación de conservación de energía (Ecuación 3.2) entre los dos tanques:

Ilustración 3.10 Línea de gradiente hidráulico sobre el terreno para el Ejemplo 3.3.

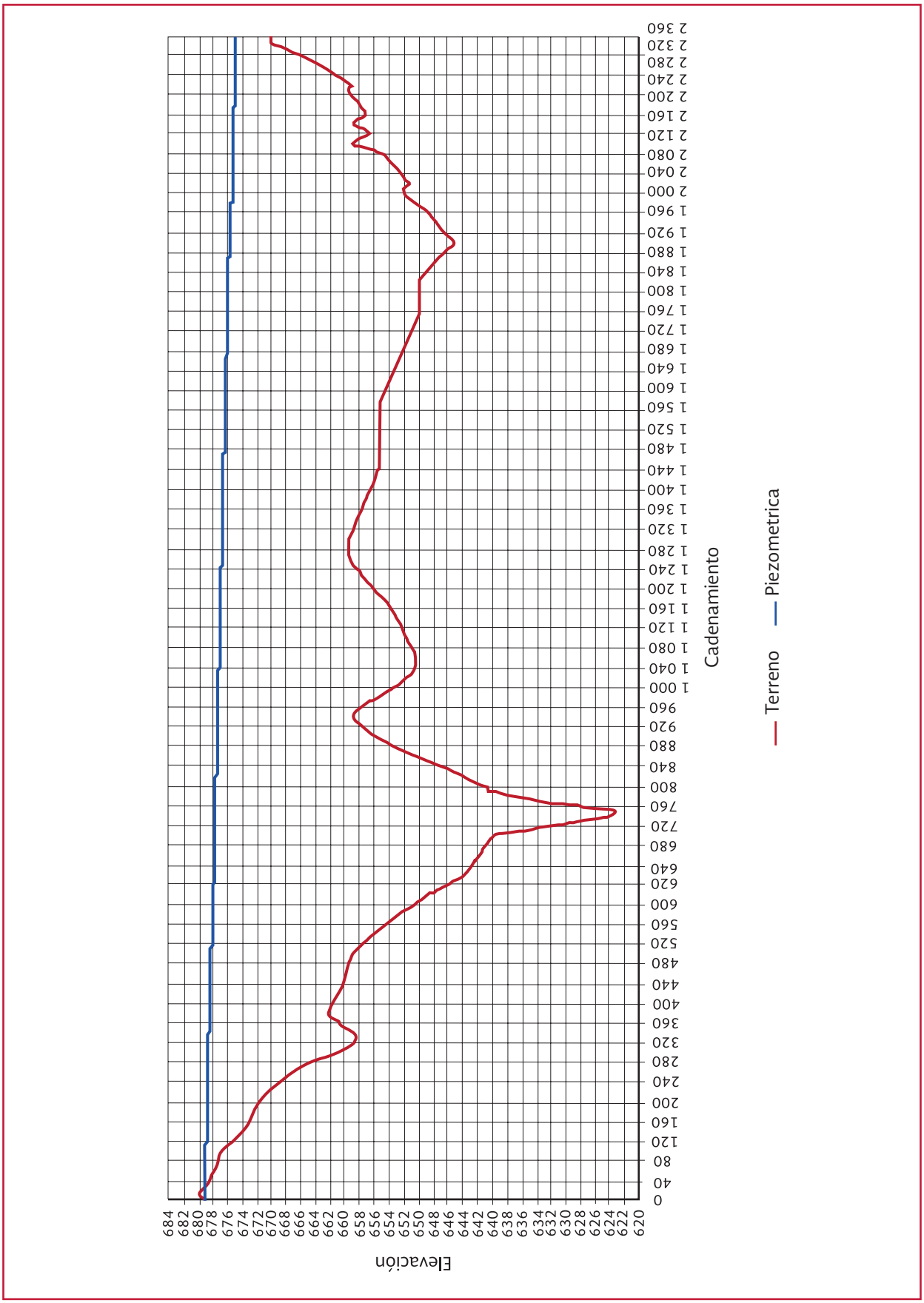


Ilustración 3.11 Arreglo típico de una instalación de bombeo para servicio de agua

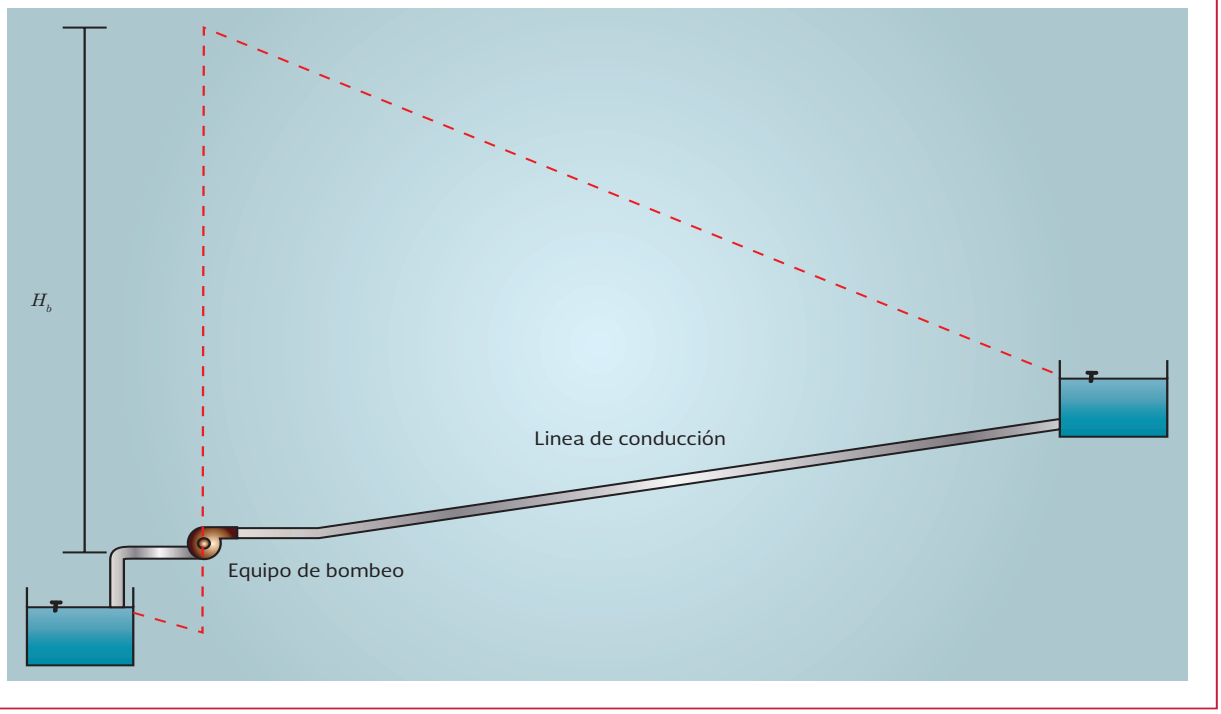
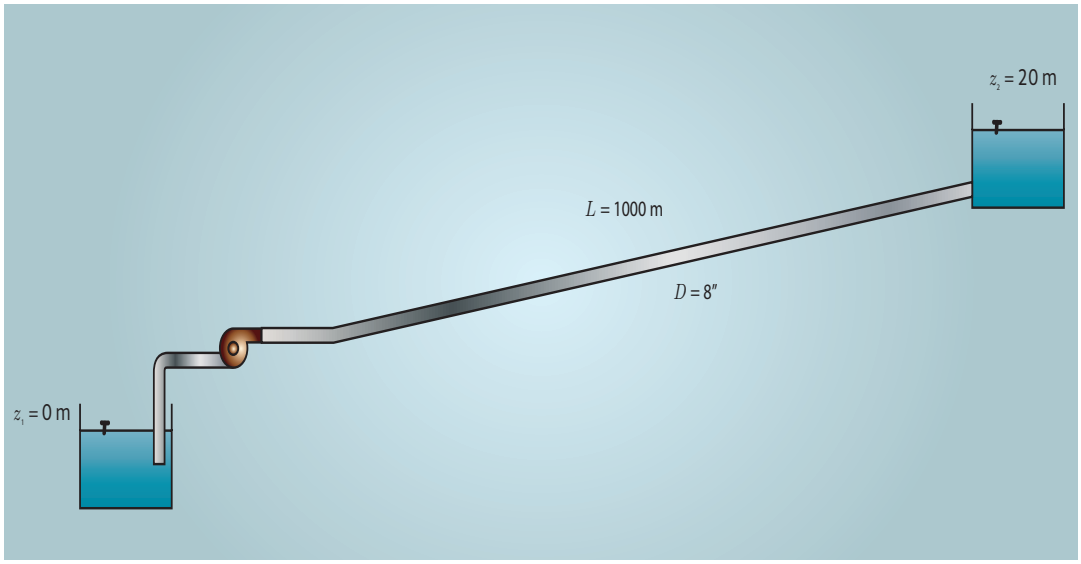


Ilustración 3.12 Esquema ejemplo de calculo de potencia de bomba



$$\left(z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}\right)-\left(z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2g}\right)=H_f-H_b$$

Reagrupando:

$$(z_1-z_2)+\left(\frac{p_1-p_2}{\gamma}\right)+\left(\frac{V_1^2-V_2^2}{2g}\right)=H_f-H_b$$

Considerando que la velocidad es la misma a lo largo de la tubería y que los tanques se encuentran a presión atmosférica, la carga que la bomba debe suministrar al sistema resulta:

$$H_b=20+H_f$$

Por otra parte las pérdidas están compuestas por dos partes, pérdidas por conducción y pérdidas por accesorios (Ecuación 3.3).

$$H_f=h_f+h_a$$

De la Ecuación 3.9.

$$h_a=k\frac{V^2}{2g}$$

$$h_a=10.2\frac{1.56^2}{2(9.81)}=1.26\ \text{m}$$

Se calcula la pérdida por fricción, para lo cual se determina el número de Reynolds:

$$\text{Re}=\frac{VD}{\upsilon}$$

$$\text{Re}=\frac{1.56\,(0.2032)}{1.007x10^{-6}}=\ 314\ \ 788.48$$

Teniendo el valor del número de Reynolds se aplica la Ecuación 3.7:

$$f=\frac{0.2}{\left[\log\left(\frac{0.0015/\,203.2}{3.71}+\frac{5.74}{314\,788.48^{0.9}}\right)\right]^2}$$
$$=\ 0.0143$$

Se determinan las pérdidas con la Ecuación 3.4:

$$h_f=0.0143\,\frac{(1\,000)\,(1.56^2)}{(0.2032)\,(2)\,(9.81)}$$
$$=8.73\ \text{m}$$

Luego, entonces:

$$H_b=20+H_f=20+8.73+1.26=29.99\ \text{m}$$

Con la carga total requerida, se procede a calcular la potencia del conjunto motor- bomba como:

$$P=\frac{1}{\eta}\gamma\,Q\,H_b \qquad \text{Ecuación 3.18}$$

donde:

P = Potencia (W)
η = Eficiencia
γ = Peso específico del agua (N/m^3)
H_b = Carga de bombeo (m)
Q = Gasto (m^3/s)

Suponiendo una eficiencia de 75 por ciento y considerando que el peso específico del agua a 20°C es de γ=9 789 N/m^3, se tiene:

$$P = \frac{1}{0.75}(9\,78\,9)(0.05)(29.99)$$
$$= 19\,571.47 \text{ W}$$

Para transformar los W a hp tenemos que:

$$P = \frac{19\,571.47}{745.7} = 26.24 \text{ hp}$$

De esta forma se requiere una potencia total de 26.24 hp.

Cabe señalar que para la selección de una bomba se deberán consultar las eficiencias y características con el proveedor o fabricante correspondiente, dada la amplia gama de opciones disponibles.



4

Selección de tubería

4.1. Diámetro óptimo

En conducciones por bombeo, la selección del diámetro y material de la tubería debe considerar, además de los aspectos hidráulicos (como los mostrados en el apartado 3.3), el costo de instalación y el costo energético que implicaría su funcionamiento. Considere que un menor diámetro origina menor costo de instalación, pero mayores pérdidas en la conducción y por tanto un mayor consumo energético.

El diámetro con el que la suma de ambos intereses contrapuestos sea óptimo se conoce como diámetro económico. La expresión, que contemple ambos costos resulta:

$$C = C_1(D) + C_2(D) + C_3(D) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

C	=	Costo integrados
$C_1(D)$	=	Costo de instalación de la tubería
$C_2(D)$	=	Costo de instalación del equipo de bombeo
$C_3(D)$	=	Costo de la energía eléctrica a pagar en los t años de vida útil de la conducción

Como primer paso, se debe estimar un diámetro de partida, el cual se puede proponer a partir de la Ecuación 4.2:

$$D_0 = 1.2\sqrt{Q} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

donde:

D_0	=	El diámetro inicial (m)
Q	=	El gasto de diseño (m^3/s)

El resultado se utiliza para proponer varios diámetros comerciales, como mínimo tres, por ejemplo el más próximo, el inmediato superior o el inmediato inferior a éste. Para cada uno de estos valores se realiza el cálculo hidráulico, energético y su costo asociado; a través de esta evaluación se define el diámetro óptimo para el sistema.

De manera general existen dos metodologías para definir el diámetro óptimo en una conducción, se presentará en el mismo ejemplo la aplicación de ambas opciones para mostrar los resultados que se obtiene con ambos. El primero consiste en un análisis a "valor presente" de los costos de construcción y energéticos, y el segundo caso considera igual ambos costos con la diferencia de que toma en cuenta la proyección del pago por financiamiento de la obra, siendo este segundo caso determinado mediante un "costo anual equivalente".

El método del costo anual equivalente (CAE) maneja un solo costo anual, por lo que es aplicable cuando el gasto de bombeo, y con esto el costo

anual de energía no varían a lo largo de la vida del proyecto.

La Ecuación 4.2, conocida también como ecuación o fórmula de Bresse cuya derivación puede ser encontrada en muchos textos sobre líneas de conducción, está obtenida con base en un análisis que asume que el costo de instalación (construcción) de la tubería varía linealmente con el diámetro y no considera la actualización del costo de energía eléctrica para el bombeo a valor presente. Considera también un valor constante del gasto de bombeo a lo largo del proyecto, mientras que el gasto real normalmente es variable debido al crecimiento de la población servida. Esto lleva a una sobreestimación del costo de energía eléctrica por lo que el diámetro obtenido por la Ecuación 4.2 puede resultar mayor que el diámetro obtenido por el análisis completo, en particular en los casos cuando el costo de energía eléctrica ocupa una parte importante del costo total.

Para obtener el costo energético, se deben consultar las tarifas vigentes en la CFE aplicables para este tipo de instalaciones, de manera general al mes de febrero de 2015 existen 3 rangos tarifarios, la tarifa O-M que aplica en demandas menores a 100 kW, la tarifa H-M con demanda superior a 100 kW y también existe la tarifa H-MC que aplica sólo para las regiones de Baja California y Noroeste del país (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Tarifa H-M, obtenida de la página electrónica de CFE (cfe.gob.mx) en el apartado tarifario

Concepto	$
Cargo por kilowatt-hora de energía de punta	2.0003
Cargo por kilowatt-hora de energía intermedia	1.0874
Cargo por kilowatt-hora de energía de base	0.9092
Cargo por kilowatt-hora de demanda facturable	184.54

También existe una tarifa diferente aplicable a diversos horarios en la semana, como se muestra en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3.

A partir de la forma en que se aplican las tarifas por parte de CFE, se puede calcular el costo energético de dos maneras, una es obtener un promedio pesado de las tarifas aplicables en cada rango para toda la semana y la segunda se analizará mediante una política de operación definiendo los horarios en que será operado el bombeo.

Para transformar a valor presente los costos de energía de cada año, se utiliza cierta tasa de actualización anual (tasa de descuento) r. Normalmente r se asume como 0.10 ó 0.12, este valor representa una tasa de interés que "actualiza" el valor del dinero en el tiempo, en caso que no se desee utilizar los valores recomendados es posible investigar las tasas de interés emitidas por los bancos para préstamos a largo plazo para montos similares al costo de construcción y utilizar dicho valor, otra opción es utilizar la tasa TIIE (Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio) emitida por el Banco de México

Tabla 4.2 Tarifas, del 1º de mayo al sábado anterior al último domingo de octubre (cfe.gob.mx)

Día de la semana	Tarifa Base	Tarifa Intermedia	Tarifa Punta
Lunes a viernes	0-6 h	6-20 y 22-24 h	20-22h
Sábado	0-7 h	7-24 h	NA
Domingo y festivos	0-19 h	19-24 h	NA

Tabla 4.3 Tarifas, del último domingo de otubre al 30 de abril (cfe.gob.mx)

Día de la semana	Tarifa Base	Tarifa Intermedia	Tarifa Punta
Lunes a viernes	0-6 h	6-18 y 22-24 h	18-22 h
Sábado	0-8 h	8-19 y 21-24 h	19-21 h
Domingo y festivos	0-18 h	18-24 h	NA

en la que se define una tasa media de interés que cobran los bancos por otorgar créditos.

Para el costo de construcción estimado, de manera inicial, se recomienda basarse en el "Catálogo General de Precios Unitarios para la Construcción de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado" que es emitido por la CONAGUA cada año.

Ejemplo 4.1

En este caso se revisará el procedimiento para determinar el diámetro más económico para una línea de conducción a bombeo (ver Ilustración 4.1) , de tal manera que se optimice el costo total de la instalación del sistema y gastos de energía eléctrica a lo largo de la vida útil del mismo.

Se desea conocer el valor presente para el siguiente caso:

Considerando un gasto requerido de 148.00 L/s (para el año 2040) a través de una conducción de 2 310 m de longitud, existiendo 95.64 m de diferencia entre los niveles de descarga y llegada. ¿Cuál es el diámetro óptimo para la tubería? considerando un tiempo anual con diferentes horarios de operación, la tubería considerada para el ejemplo es de PEAD.

Se deberá considerar el crecimiento poblacional desde la construcción del sistema hasta la demanda requerida al horizonte de proyecto, en este caso se tomará en cuenta un horizonte de proyecto de 25 años de operación (para diversos horizontes de diversa infraestructura se puede consultar el *libro de Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado* de MAPAS) por lo que el año 2015 se considerará como de diseño y construcción (año cero) y se proyectará hasta 2040 la población anual para definir el caudal requerido durante cada año de operación.

A través de la Ecuación 4.2 se propone un valor inicial para el diámetro.

$$D_o = 1.2\sqrt{\frac{148}{1000}} = 0.4616 \text{ m}$$

Para ese caso, los diámetros comerciales cercanos se presentan en la Tabla 4.4.

Se analizarán los diámetros desde 12 hasta 24 pulgadas con la finalidad de mostrar los resultados en ese espectro de diámetros, de manera práctica se pueden analizar tres diámetros, el tentativo y los diámetros inferior y superior del diámetro inicial estimado, en caso de no obtener un total mínimo con dichos diámetros, se

Ilustración 4.1 Esquema para ejemplo de diámetro óptimo

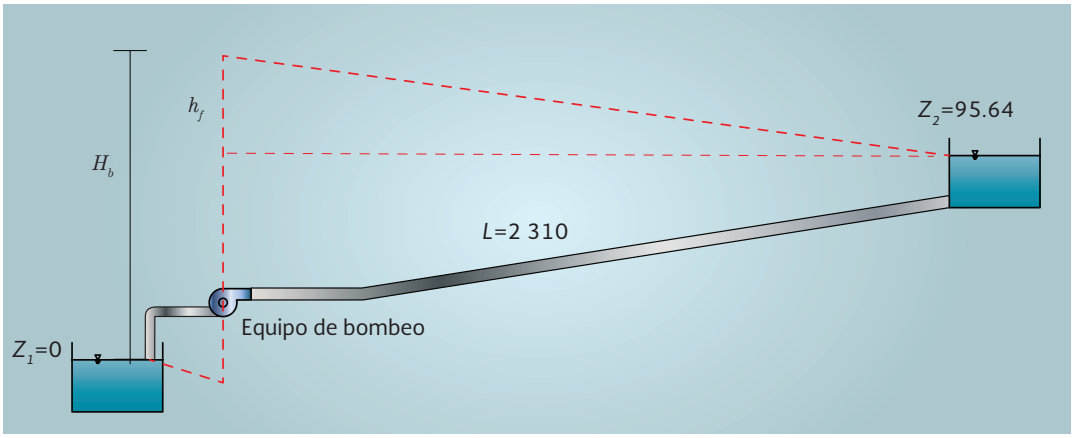


Tabla 4.4 Diámetros analizados para el ejemplo

Pulgadas	m
12	0.3048
14	0.3556
16	0.4064
18	0.4572
20	0.508
24	0.6096

deberá analizar el diámetro siguiente hasta obtener el mínimo.

Para iniciar con la primer metodología, que es considerando los costos a "valor presente", se definirá la evolución de la población desde el año actual hasta el horizonte de proyecto, para la determinación de los datos de población se recomienda consultar el libro de *Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado* de MAPAS. En la Tabla 4.5 se presenta la evolución poblacional año con año y su caudal demandado.

Haciendo el análisis para el primer año de operación que es el 2016, una vez propuesto el diámetro inicial para la línea de conducción, se aplica la ecuación de conservación de energía (Ecuación 3.2) entre los dos tanques:

$$\left(z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}\right)-\left(z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2g}\right)=H_f-H_b$$

Reagrupando:

$$(z_1-z_2)+\left(\frac{p_1-p_2}{\gamma}\right)+\left(\frac{V_1^2-V_2^2}{2g}\right)=H_f-H_b$$

Considerando que la velocidad es la misma a lo largo de la tubería y que los tanques se encuentran a presión atmosférica, la carga que la bomba debe suministrar al sistema resulta:

$$H_b=95.64+H_f$$

Tabla 4.5 Evolución de la población y demanda anual debombeo

Año	Población	Q (L/s)
2015	42 246	Proyecto y construcción
2016	42 842	123.96
2017	43 418	125.63
2018	43 974	127.24
2019	44 512	128.79
2020	45 030	130.29
2021	45 529	131.74
2022	46 010	133.13
2023	46 473	134.47
2024	46 915	135.75
2025	47 338	136.97
2026	47 741	138.14
2027	48 124	139.25
2028	48 485	140.29
2029	48 824	141.27
2030	49 140	142.19
2031	49 431	143.03
2032	49 699	143.80
2033	49 942	144.51
2034	50 160	145.14
2035	50 354	145.70
2036	50 522	146.19
2037	50 709	146.73
2038	50 851	147.14
2039	50 972	147.49
2040	51 071	147.77

El calculo detallado se muestra para la tubería de 12 pulgadas. Se calcula la pérdida por fricción, para lo cual, se determina el número de Reynolds para ν=1.007 x 10^{-6} m^2/s) y V= 1.69 m/s:

$$\mathrm{Re}=\frac{VD}{\upsilon}$$

$$\mathrm{Re}=\frac{1.69\,(0.3048)}{1.007x10^{-6}}=517\,817$$

Se calcula la pérdida por conducción H_f para el año 2016, considerando sólo las pérdidas por fricción (H_f=h_f), a través de la Ecuación 3.7:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{0.0015/304.8}{3.71} + \frac{5.74}{517\,817^{0.9}}\right)\right]^2}$$
$$= 0.013090$$

$$h_f = 0.01309\frac{(2\,310)(1.69^2)}{(0.3048)(2)(9.81)}$$

$$h_f = H_f = 14.59\,\text{m}$$

Luego entonces:

$$H_b = 95.64 + H_f = 95.64 + 14.59 = 110.23\,\text{m}$$

Con la carga total requerida, se procede a calcular la potencia del conjunto motor- bomba por la Ecuación 3.18

Suponiendo una eficiencia del conjunto motor-bomba de 75 por ciento y considerando que el peso específico del agua a 20°C es de γ=9 789 N/m^3, se tiene:

$$P = \frac{1}{0.75}(9\,789)(0.123)(110.23)$$
$$= 178\,350.43\ \text{W} = 178.35\ \text{kW}$$

Esto equivale a un consumo eléctrico anual, considerando operación continua de 24 horas:

$$E_{año} = 178.35\ \text{kW}(8\,760\ \text{h}) = 1\,562\,349.75\ \text{kWh}$$

En ese caso se considerará una tarifa de tipo H-M para demandas superiores a 100 kW en la zona central del país, ver Tabla 4.1.

Considerando un costo energético con los horarios en la Tabla 4.2 y conceptos de la Tabla 4.1 para el calendario del 2015 del 1º de mayo al sábado anterior al último domingo de octubre y considerando un bombeo ininterrumpido, las demandas en horas para este periodo son:

$D_{base/\,horas}$ = 1 285 horas
$D_{intermedia/\,horas}$ = 2 157 horas
$D_{punta/\,horas}$ = 206 horas

Por lo tanto el costo por demanda base, intermedia y punta para este periodo utilizando la potencia del conjunto motor-bomba sera:

$D_{base} = (178.35)(0.9092)(1\,285) = \$\,208\,370.23$
$D_{intermedia} = (178.35)(1.087)(2157) = \$\,418\,169.93$
$D_{punta} = (178.35)(2.003)(206) = \$73\,491.22$

El costo para este periodo es de:

$$D_{periodo} = 208\,370.23 + 418\,169.93 + 73\,491.22$$
$$= \$\,700\,031.38$$

Para el calculo del costo de la demanda facturable (*DF*) tenemos una potencia constante de 178.35 kW por lo tanto aplicando a este periodo de 5 meses tenemos:

$$DF = (178.35)(184.54)(5) = \$164\,563.35$$

El costo total para este periodo sumando la demanda facturable es de:

$$D_{total} = 700\,031.38 + 164\,563.55 = \$864\,594.93$$

Considerando un costo energético con los horarios de la Tabla 4.3 y conceptos de la Tabla 4.1 para el calendario del 2015 del último domingo de octubre al 30 de abril tenemos:

$D_{base/\,horas}$ = 1 766 horas
$D_{intermedia/\,horas}$ = 2 716 horas
$D_{punta/\,horas}$ = 630 horas

$$D_{base} = (178.35)(0.9092)(1\,766) = \$286\,367.18$$
$$D_{intermedia} = (178.35)(1.087)(2\,716) = \$526\,541.28$$
$$D_{punta} = (178.35)(2.003)(630) = \$224\,754.70$$

El costo para este periodo es de :

$$D_{periodo} = 286\,367.18 + 526\,541.28 + 224\,757.70 = \$1\,037\,663.16$$

Para el calculo del costo de la demanda facturable (*DF*) tenemos una potencia constante de 178.35 kW por lo tanto aplicando a este periodo de 7 meses tenemos:

$$DF = (178.34)(184.54)(7) = \$230\,388.96$$

El costo total para este periodo sumando la demanda facturable es de:

$$D_{total} = 1\,037\,663.16 + 230\,388.96 = \$1\,268\,052.13$$

Para el total de ambos periodos integrando la demanda facturable en todo el año de operación, para el primer año tenemos:

$$C_{año\,1} = 864\,594.93 + 1\,268\,052.13 = \$2\,134\,647.06$$

Para transformar a valor presente los costos de energía del cada año (2016), se utiliza la ecuación siguiente:

$$Valor_{presente} = \frac{Valor_i}{(1+r)^i}$$

donde:

$Valor_i$ = Costo para el año i de operación

r = Tasa de actualización anual (tasa de descuento)

De esta manera tenemos el costo para el año cero que sera el de construcción $ 3 585 608.25, sacado del catalogo de conceptos ver Tabla 4.6. Si se opera durante este año se podrá agregar el costo de bombeo.

El costo para el año 1 (2016) de operación para 12 pulgadas de diámetro es $ 2,132,647.06 por lo cual tenemos el valor presente de:

$$Valor_i = \frac{2\,132\,647.06}{(1+0.12)^1} = \$\,1\,904\,149.16$$

En este caso se utilizarán a manera de ejemplo los precios emitidos en dicho catálogo en mayo de 2014. Para los volúmenes de excavación requeridos para cada diámetro, se recomienda consultar el libro de *Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado* de MAPAS, en la Tabla 4.6 se muestra un catálogo de conceptos y precios unitarios.

Con el procedimiento anterior, se determinarán los costos de construcción para cada diámetro analizado y posteriormente también para cada año se realizará el mismo procedimiento para obtener los costos anualizados de energía a valor presente, resultando en la Tabla 4.7 para un diámetro de 12 pulgadas en PEAD. El costo total a valor presente será la suma de cada costo anualizado de energía más el costo estimado de la construcción de la línea (ver Tabla 4.8 e Ilustración 4.2).

Se puede observar que el diámetro con menor costo a valor presente es el de 14 pulgadas, el cual presentará una velocidad de flujo de 1.24 m/s.

Ahora se mostrará el ejemplo para el cálculo del diámetro óptimo mediante el segundo método.

Tabla 4.6 Desglose de conceptos y precios unitarios para ejemplo de línea de 12 pulgadas en PEAD.

Clave Conagua	Concepto	Unidad	Cantidad	P.U. $	Importe $
1000 05	Ruptura y demolición de pavimento hidráulico.	m^3	25.41	271.11	6 888.91
1019 02	Excavación en roca fija para zanjas en seco en zona alta hasta 2.00 m de profundidad	m^3	2 086.22	205.79	429 322.96
1090 01	Excavación con equipo en cualquier material	m^3	368.16	34.92	12 856.02
1130 02	Plantilla apisonada al 85% próctor en zanjas con material producto de banco	m^3	196.35	126.83	24 903.07
1131 04	Relleno en zanjas compactado al 85% próctor con material de banco	m^3	1 570.80	104.45	164 070.06
1131 01	Relleno en zanjas a volteo con material producto de excavación	m^3	687.23	11.34	7 793.13
1001 10	Construcción de pavimento o banqueta de concreto 10 cm espesor f'c= 200 kg/cm^2	m^2	254.10	252.14	64 068.77
	Suministro e instalación de PEAD				
8011 09	Suministro de tubería RD 11 de 12" de diámetro	m	2 310.00	1 198.25	2 767 947.34
2050 06	Instalación de tubería de 12" de diámetro	m	2 310.00	46.65	107 758.00
				Costo de construcción	3 585 608.25

Tabla 4.7 Resumen de análisis de costo a valor presente para tubería de 12 pulgadas en PEAD

Año	Población	Q (L/s)	Perdida de carga H_f (m)	Carga de bombeo H_t+H_f	Potencia (kW)	Cargo por-bombeo $/kWh	Valor presente $
2015	42 246	Proyecto y Construcción					3 585 608.25
2016	42 842	123.96	14.59	110.23	178.35	2,132,647.06	1,904,149.16
2017	43 418	125.63	14.96	110.60	181.35	2,168,465.04	1,728,687.06
2018	43 974	127.24	15.31	110.95	184.25	2,203,245.51	1,568,226.64
2019	44 512	128.79	15.65	111.29	187.07	2,236,968.23	1,421,633.75
2020	45 030	130.29	15.98	111.62	189.82	2,269,828.11	1,287,961.43
2021	45 529	131.74	16.31	111.95	192.50	2,301,805.09	1,166,166.09
2022	46 010	133.13	16.63	112.27	195.08	2,332,656.77	1,055,175.46
2023	46 473	134.47	16.93	112.57	197.58	2,362,583.70	954,207.93
2024	46 915	135.75	17.23	112.87	199.98	2,391,341.67	862,341.78
2025	47 338	136.97	17.51	113.15	202.29	2,418,908.43	778,823.77
2026	47 741	138.14	17.79	113.43	204.51	2,445,490.27	703,020.02
2027	48 124	139.25	18.05	113.69	206.63	2,470,841.01	634,203.34
2028	48 485	140.29	18.30	113.94	208.63	2,494,710.52	571,723.26
2029	48 824	141.27	18.53	114.17	210.52	2,517,307.60	515,091.01
2030	49 140	142.19	18.75	114.39	212.30	2,538,614.15	463,795.31
2031	49 431	143.03	18.96	114.60	213.93	2,558,147.01	417,289.19
2032	49 699	143.8	19.14	114.78	215.44	2,576,118.75	375,197.12
2033	49 942	144.51	19.32	114.96	216.83	2,592,746.83	337,159.74
2034	50 160	145.14	19.47	115.11	218.07	2,607,547.09	302,753.89
2035	50 354	145.7	19.61	115.25	219.17	2,620,739.14	271,683.55

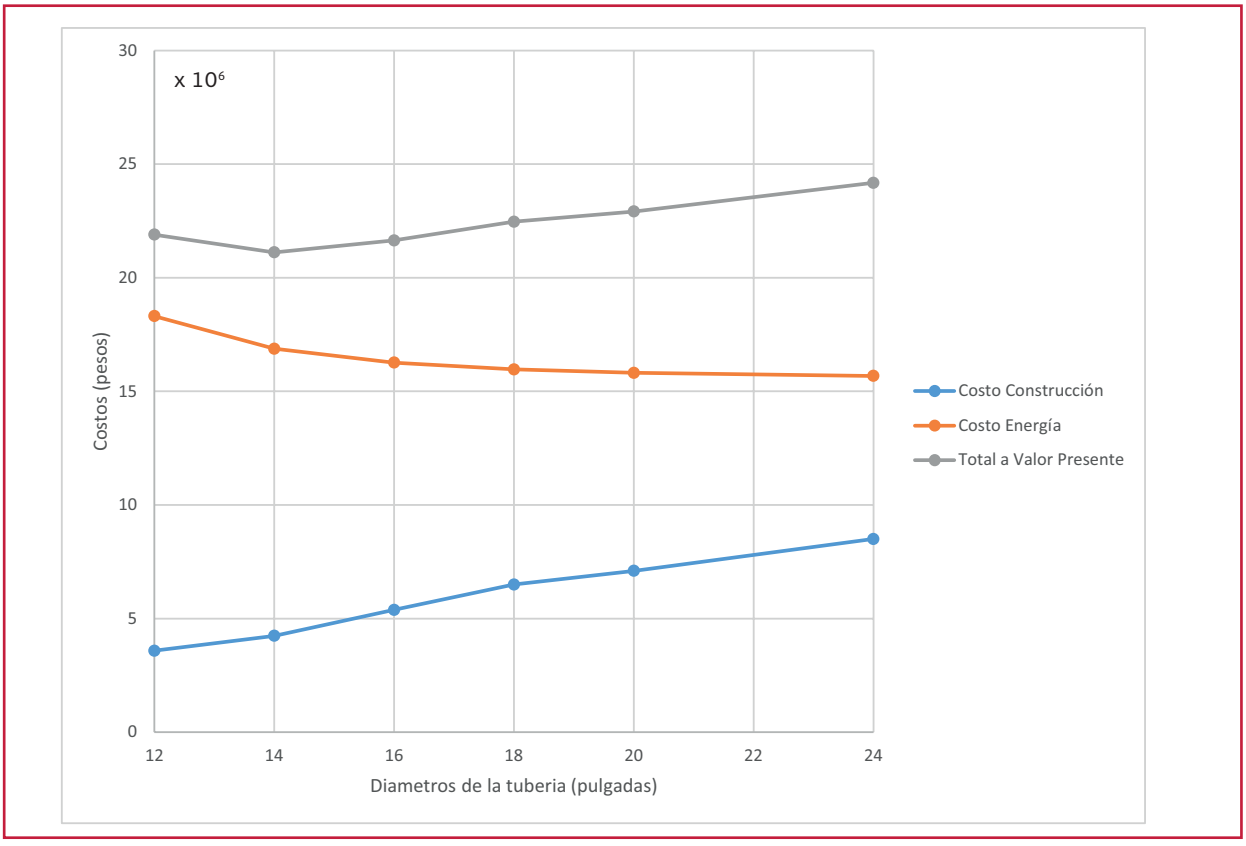
Tabla 4.7 Resumen de análisis de costo a valor presente para tubería de 12 pulgadas en PEAD (continuación)

Año	Población	Q (L/s)	Perdida de carga H_f (m)	Carga de bombeo H_t+H_f	Potencia (kW)	Cargo por-bombeo $/kWh	Valor presente $
2036	50 522	146.19	19.73	115.37	220.14	2,632,310.27	243,645.62
2037	50 709	146.73	19.86	115.50	221.21	2,645,092.58	218,597.09
2038	50 851	147.14	19.97	115.61	222.02	2,654,819.06	195,893.67
2039	50 972	147.49	20.05	115.69	222.71	2,663,136.79	175,453.05
2040	51 071	147.77	20.12	115.76	223.27	2,669,800.71	157,046.51
						Total a valor presente	$21,895,533.68

Tabla 4.8 Resumen de análisis de costo a valor presente para todos los diámetros analizados en PEAD

Material	Diámetro	Costo construcción	Costo energía	Total a valor presente
PEAD	12	$3,585,608.25	$18,309,925.43	$21,895,533.68
PEAD	14	$4,241,417.50	$16,877,485.02	$21,118,902.52
PEAD	16	$5,382,012.78	$16,262,205.39	$21,644,218.17
PEAD	18	$6,500,219.47	$15,967,612.64	$22,467,832.11
PEAD	20	$7,100,143.41	$15,814,253.27	$22,914,396.68
PEAD	24	$8,500,613.70	$15,678,812.48	$24,179,426.18

Ilustración 4.2 Costos a valor presente del ejemplo



Ejemplo 4.2

Ahora como segundo análisis se procederá a analizar el costo anualizado de la inversión de construcción y de energía eléctrica, para la cual se tomará en cuenta la potencia instalada en el año 2016 de vida útil que en este caso para la línea de 12 pulgadas el cual resultó de 178.35 kW lo que equivale a 239.17 HP, siendo éste el primer análisis para el diámetro menor considerado.

Para la amortización anual que definirá el costo anualizado de la construcción, se tiene que el horizonte de proyecto es de 25 años, contabilizando el año de construcción se tienen 26 años de amortización, para definir el monto amortizado anual de la instalación se aplica la ecuación siguiente:

$$M = \frac{i\, C_C (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \qquad \text{Ecuación 4.3}$$

donde:

i = Tasa de interés anual fija en decimales
C_c = Costo de construcción en pesos
n = Número de años de amortización

Aplicando la ecuación anterior para nuestro ejemplo, considerando una tubería de 12 pulgadas tenemos un costo obtenido de construcción mostrado en la Tabla 4.6, y se muestran también en la Tabla 4.8 para todos los diámetros analizados, en este caso se calcula con una tasa de interés del 12 por ciento anual.

$$M = \frac{(0.12)\,(3\ 585\ 608.25)\,(1+0.12)^{26}}{(1+0.12)^{26} - 1}$$

$$= \$\,454\ 123.95$$

Considerando un costo anual por bloques horarios en kilowatts-hora de energía de acuerdo con CFE, ver Tabla 4.2 y Tabla 4.3, para una potencia de 178.35 kWh, del ejemplo anterior tenemos un cargo por bombeo para una tubería de 12" de:

$$E = \$2\ 132\ 647.06$$

El costo anual de amortización en la construcción del sistema lo sumamos al costo de energía eléctrica en kWh para la demanda del caudal de diseño *Q=123.96 L/s*.

Unicamente en el caso que se desconozca la forma y tiempos de operación del sistema que se diseñará se recomienda aplicar un costo promedio del kWh, en caso que se cuente con los tiempos que estará operando el sistema es recomendable desde el diseño plantear los horarios para el funcionamiento de las bombas, con la finalidad de optimizar el uso de la energía eléctrica.

Para nuestro ejemplo se determinará mediante el costo por bloques mostrado anteriormente, de tal manera que el costo anual equivalente para la tubería es:

$$CAE = M + E_{anual1} \qquad \text{Ecuación 4.4}$$

$$CAE = \$454\ 123.95 + \$\ 2\ 132\ 647.06$$

$$CAE = \$2\ 586\ 771.00$$

Se realiza el mismo procedimiento para los demás diámetros. En este segundo caso, también se puede observar que resulta como diámetro óptimo el de 14 pulgadas, con lo que como resultado final

se concluye que ese será el diámetro seleccionado para nuestro ejemplo (ver Tabla 4.9).

En estricto sentido el ejemplo 4.1 no es el adecuado para presentar la aplicación del método del costo anual equivalente (CAE) porque el gasto de bombeo varía en el tiempo. Aunque en este ejemplo las dos metodologías dieron el mismo resultado, el CAE puede arrojar resultados diferentes que aplicando el del valor presente si los costos y volúmenes son diferentes para cada año. Las dos metodologías darían resultados idénticos cuando el costo de energía y otros gastos anuales no varían a lo largo de la vida del proyecto. Por otro lado, el diámetro óptimo obtenido de 14" es menor que el diámetro tentativo inicial de 18" calculado por la Ecuación 4.2, debido a las limitaciones de dicha ecuación que se explican en el principio de este capítulo.

Es importante señalar que mientras más información se cuente para el diseño de una línea de conducción, no solamente en el sentido del proyecto ejecutivo sino también en la operación del mismo, se podrá justificar de mejor manera el uso de uno u otro diámetro como diámetro óptimo.

Una vez realizada la selección del mismo, se deberá proceder a hacer la revisión del funcionamiento hidráulico bajo la acción de fenómenos transitorios, para esto último se recomienda consultar el libro de *Fenómenos Transitorios en Líneas de Conducción* de MAPAS.

Los ejemplos presentados consideran un bombeo ininterrumpido de 24 horas del día. Algunos organismos operadores recurren a una interrupción en el bombeo, generalmente diaria, para evitar la operación en horas pico de demanda eléctrica cuando la tarifa es la más cara. Si bien con esto se puede disminuir el costo directo del bombeo, cada paro y arranque involucra también maniobras adicionales en la operación, que pueden tener su costo y efectos, más aun si se interrumpe el proceso de potabilización. Como se explica en Tzatchkov et al. (2014), cada paro y arranque conlleva también transitorios hidráulicos en que puede variar de forma importante la presión en la línea de conducción, que a lo largo de los años propicia eventuales fallas por fatiga del material de la tubería si ésta no cuenta con espesor suficiente para prevenir fallas por fatiga. Por estas razones, la decisión de bombeo interrumpido debe tomarse después de un análisis de costos y efectos relacionados.

4.2. Criterios para la selección de material

Como primer criterio para la selección de la tubería es la presión máxima a que estará sometida, para líneas por gravedad el criterio de selección

Tabla 4.9 Resultados obtenidos con el análisis de costo anual equivalente en el ejemplo

Material	Diámetro	Costo anual financiamiento	Costo anual de energía	Total a costo anual equivalente
PEAD	12	$454,123.95	2,132,647.06	$2,586,771.00
PEAD	14	$537,183.41	1,984,402.31	$2,521,585.72
PEAD	16	$681,641.92	1,920,706.02	$2,602,347.94
PEAD	18	$823,264.87	1,890,201.42	$2,713,466.29
PEAD	20	$899,246.36	1,874,318.17	$2,773,564.52
PEAD	24	$1,076,618.52	1,860,287.53	$2,936,906.05

es considerando la presión estática, mientas que para conducciones por bombeo, se diseña por presión dinámica. En ambos casos, el espesor o clase seleccionada, debe revisarse ante la presencia de los fenómenos transitorios. La selección de la tubería también debe estar basada en las recomendaciones de códigos aplicables, estándares dimensionales y especificaciones de material establecidas. Sin embargo, el ingeniero de diseño debe considerar también los requerimientos de servicio y parámetros tales como: resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, facilidad de instalación, costo y vida útil para su selección.

Una buena práctica de ingeniería debe ser realista y al mismo tiempo requerir un nivel de calidad, fabricación y soldado o unión de los materiales que satisfagan las demandas del servicio particular, por lo que es importante tomar en cuenta las propiedades de cada tipo de material existente en base a las necesidades del proyecto, enseguida se muestran algunas de las características generales de algunos de los materiales existentes en el mercado. A manera de ejemplo en la Tabla 4.10 se muestra información de tuberías con las normas asociadas.

Para mayor abundamiento sobre los criterios de selección de diámetros revisar las normas mexicanas.

4.2.1 Económico

El criterio económico para la selección de la tubería para conducción de agua potable considera dos aspectos, independientemente del material:

- Costo de adquisición e instalación de tubería
- Costo de operación y mantenimiento

Los elementos que determinan el costo de adquisición de la tubería son:

- Diámetro
- Espesor
- Norma y especificación

Estos elementos dependen a su vez de diversos factores, como se muestra en la Ilustración 4.3.

El costos de adquisición de las tuberías dependerá directamente del material del que se trate, así como de las normas y especificaciones (Normas Oficiales Mexicanas, Normas Mexicanas, Normas Internacionales: ISO, AWWA o ASTM por mencionar algunas) para a cada caso según el diseño y uso de estas.

Para tubería de una norma y especificación determinada, el costo de adquisición es proporcional al diámetro y al espesor.

Un aspecto decisivo en la selección de la tubería es el costo de operación y mantenimiento.

El costo de mantenimiento se integra por:

- Inspección periódica del estado físico de la tubería
- Mantenimiento de la protección anticorrosiva
- Detección y corrección de fallas
- Celaje de la línea (vigilancia para evitar extracciones no autorizadas)

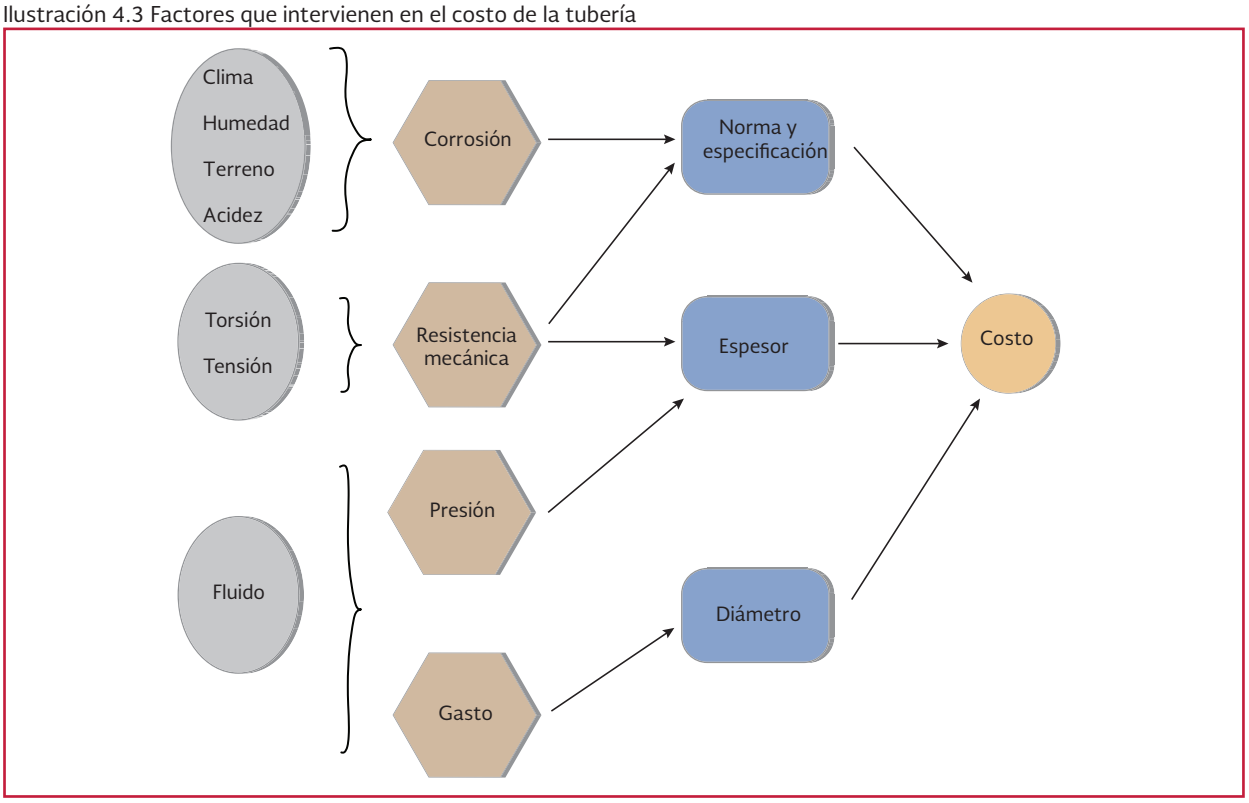
En líneas de conducción por bombeo, además de los costos anteriores se agregan:

- Operación
- Consumo de combustible por bombeo
- Consumo de energía eléctrica
- Mano de obra de bombeo
- Mantenimiento
- Mano de obra de mantenimiento de

Tabla 4.10 Información de tuberías de acuerdo al mercado nacional

Línea o red	Material de la tubería (manuales y normas)	Tipo de unión
Línea de Conducción	Policloruro de vinilo (PVC) Norma AWWA C900 y AWWA C905 NMX-E145/1	Espiga-campana con anillo con refuerzo encapsulado fijo a campana, bridada y Juntas mecánicas
	Polietileno de alta densidad (PEAD) PE3408, Norma NMX-E-018-SCFI	Termofusión, electrofusión, bridada
	Hierro Fundido Dúctil GS Norma EN 545 e ISO 2531 Norma AWWA C-151 NMX B-504-2011	Espiga – Campana Juntas mecánicas
	Acero ASTM A 53 Grado B, A 106, A 134 y A 139	Soldada, bridada Juntas mecánicas
	Polyester reforzado con fibra de vidrio (P.R.F.V.) Norma AWWA C950-1, AWWA M-45, ASTM D3517, NMX-E-253-CNCP-	Espiga-campana, bridada de PRFV, Uniones flexibles de acero, juntas mecánicas
	Concreto presforzado NMX-C-252-ONNCCE, NMX-C-253-ONNCCE	Espiga-campana con anillo de hule, uniones bridadas
	Fibrocemento NMX-C-039-ONNCCE	Coples de fibrocemento con anillos de hule, junta Gibault
Conexión de pozo de tren de descarga con línea de conducción	Acero ASTM A 53 Grado B, A 106, A 134 y A 139	Soldada, Bridada Juntas mecánicas
	Hierro Fundido Gris Norma ASTM A 126	Bridada y juntas mecánicas
Conexión de línea de conducción con tanque de almacenamiento y tren de descarga a red de distribución	Acero ASTM A 53 Grado B, A 106, A 134 y A 139	Soldada, Bridada Juntas mecánicas
	Hierro Fundido Gris Norma ASTM A 126	Bridada y juntas mecánicas

Ilustración 4.3 Factores que intervienen en el costo de la tubería



equipo de bombeo
- Refacciones, partes de repuesto
- Reposición de equipo

4.2.2 Resistencia mecánica

Dentro de este parámetro se encuentran las características de resistencia a la tensión, fluencia, elongación, dureza, así como al corte, aplastamiento, fatiga, entre otros.

Como la selección de un material para una aplicación estructural específica depende de sus propiedades mecánicas, es importante familiarizarse con algunas de las pruebas patrón empleadas para medir estas propiedades y entender el significado de la información que se obtiene con ellas. La capacidad de un material para soportar una carga estática puede determinarse mediante una prueba de tensión o compresión, mientras que de las pruebas de dureza se deduce su resistencia a la deformación permanente; de las pruebas de impacto se determina la tenacidad de un material a las cargas de choque y de las pruebas de fatiga se mide el período de vida útil del material sometido a cargas cíclicas.

La selección del material quedará determinada como resultado de las pruebas de tensión, fundamentalmente en lo referente a la resistencia de fluencia mínima especificada (f_y), la cual será determinada a 0.5 por ciento de deformación. Asimismo, dependiendo del criterio que se utilice para diseño, ya sea a través de un modelo elástico o plástico de esfuerzo de formación multiaxial, los parámetros de selección deberán estar definidos para garantizar adecuada ductilidad del material.

Según el manual AWWA M45 (2013), en el caso específico de las tuberías de poliéster reforzado con fibra de vidrio, la flexibilidad de diseño inherente que presentan y el rango de los procesos de fabricación utilizados, impiden el simple listado de las propiedades mecánicas de las tuberías de fibra de vidrio. Por esta razón, los estándares de las tuberías de poliéster reforzado se basan en el comportamiento y los requerimientos de comportamiento del producto.

Esta amplia gama de propiedades mecánicas se ilustra adicionalmente mediante las curvas de tensión-deformación, dependiendo de la cantidad, el tipo y la orientación del refuerzo, así como el proceso de fabricación. La Ilustración 4.4 e Ilustración 4.5 muestran la forma típica de las curvas tensión-deformación para tuberías de alta y baja presión para direcciones circunferencial y axial, respectivamente.

El manual AWWA M55 (2006) menciona que el polietileno (PE) se caracteriza por ser un material de construcción viscoelástico. Debido a su naturaleza molecular, es una combinación compleja de elementos de tipo elásticos y de tipo fluidos. Como resultado, este material muestra propiedades que son intermedias entre metales cristalinos y fluidos de muy alta viscosidad.

Como resultado del carácter viscoelástico del polímero, la curva de tensión-deformación para el PE se divide en tres regiones distintas. La primera de ellas es una deformación lineal inicial en respuesta a la carga impuesta que generalmente es recuperable cuando se retira la carga. En la segunda etapa de carga, la deformación continúa, pero a un ritmo cada vez menor. Por lo tanto, la pendiente de la curva de tensión-deformación está en constante cambio, lo que acredita su naturaleza curvilínea. La deformación en la segunda etapa puede no ser totalmente recuperable. La etapa final de la curva tensión-deformación para PE se caracteriza por un estrangulamiento seguido por un alargamiento distinto o extensión en última instancia, que termina en la rotura del material.

Ilustración 4.4 Curva típica de tensión-deformación circunferencial para tubería de poliéster reforzado con fibra de vidrio (adaptado de AWWA M45, 2013)

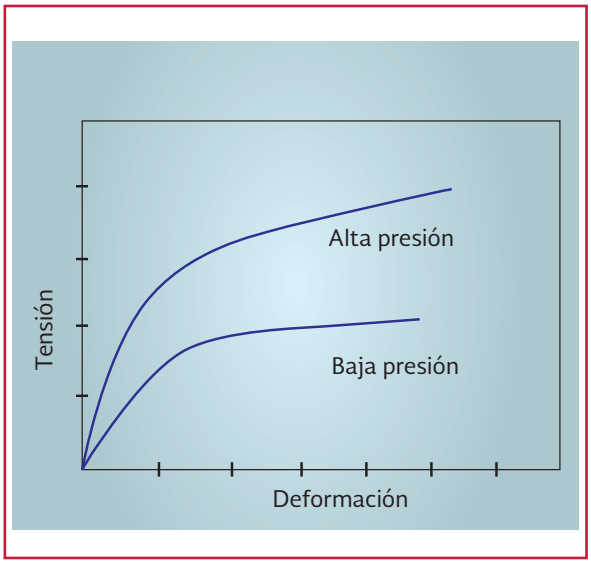
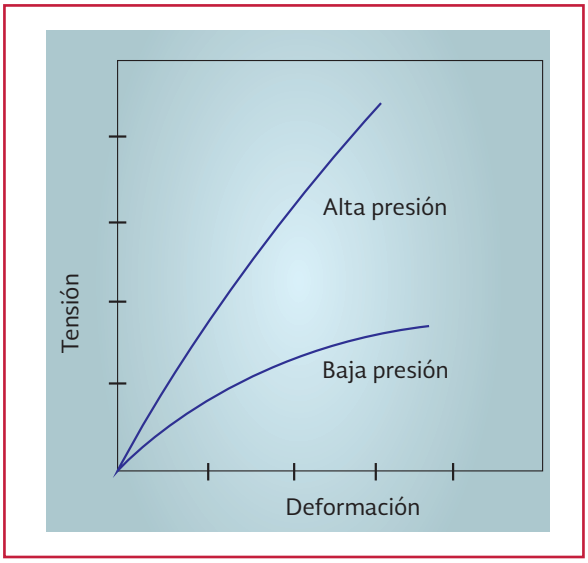


Ilustración 4.5 Curva típica de tensión-deformación axial para tubería de poliéster reforzado con fibra de vidrio (adaptado de AWWA M45, 2013)



La naturaleza viscoelástica del PE proporciona dos características únicas de ingeniería que se emplean en el diseño de sistemas de tuberías de agua de PEAD (Polietileno de Alta Densidad). Éstos son fluencia y relajación de la tensión.

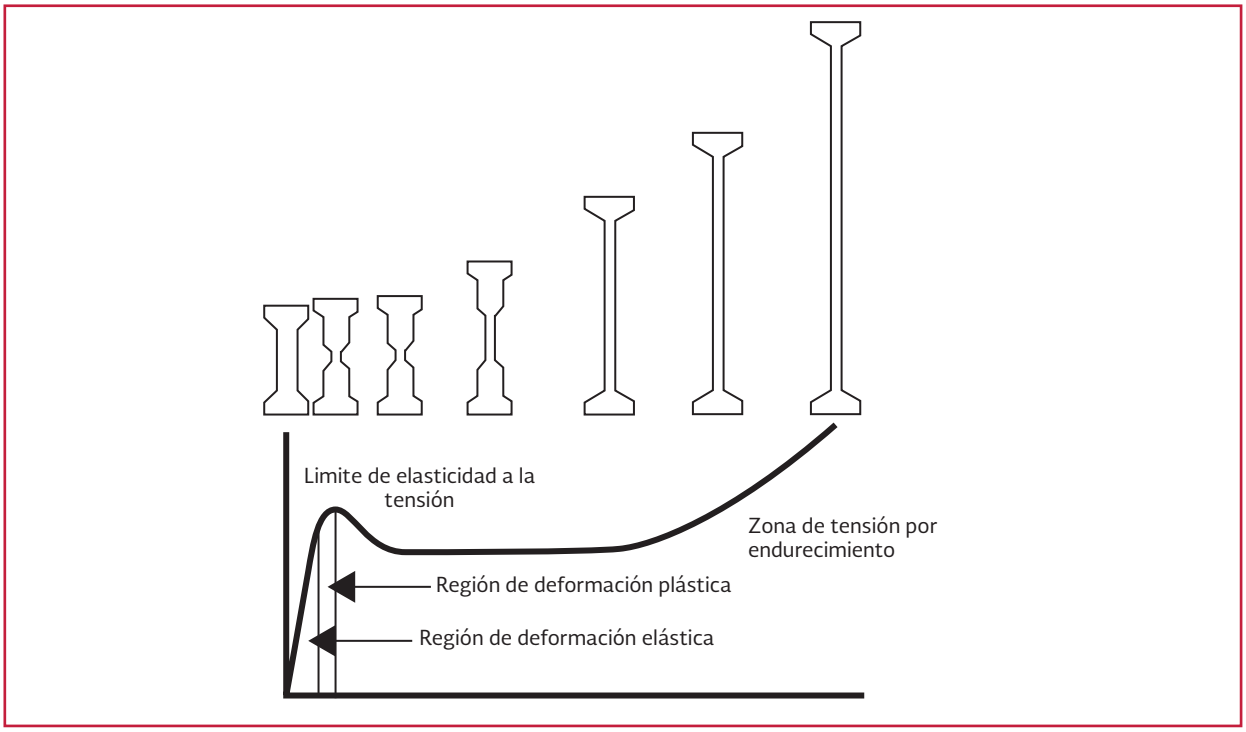
Cualquier material se deforma cuando se le aplica una fuerza. La cantidad de deformación por unidad de longitud se denomina deformación unitaria, y la fuerza por área de sección transversal se denomina tensión. En lo que respecta al ensayo de los grados de tensión de la tubería de PE, la deformación se aproxima generalmente asumiendo una relación de línea recta a la tensión a niveles de tensión más bajos (hasta 30 por ciento del punto de fluencia a la tracción), y es reversible. Es decir, el material se deforma pero al retirar la tensión con el tiempo va a recuperar su forma original. La deformación en esta región se conoce como deformación elástica, ya que es reversible. El módulo de elasticidad (o módulo de Young) es la relación entre la tensión y la deformación en esta región reversible.

A niveles de tensión en general mayores al 50 por ciento, la deformación ya no es proporcional a la tensión y no es reversible, es decir, la pendiente de la curva de los cambios de tensión-deformación cambia a una tasa creciente.

A esta intensidad de tensión, los materiales comienzan a deformarse de tal manera que las dimensiones originales no son recuperables. En la prueba real de materiales de tubería de PE, esta etapa se caracteriza por la iniciación de un claro "estrechamiento" de la muestra. Esto se denomina la región de deformación plástica. El punto en el que la tensión provoca que un material se deforme más allá de la región elástica se denomina límite de elasticidad. La tensión requerida para romper finalmente la muestra de ensayo se denomina resistencia a la ruptura (ver Ilustración 4.6).

A pequeñas deformaciones (hasta 3 por ciento para la mayoría de las resinas para tuberías PE), el módulo de compresión es aproximadamente igual al módulo elástico. Sin embargo, a diferen-

Ilustración 4.6 Curva general de tensión-deformación para tuberías de PE (AWWA M55, 2006)



cia de la carga de tensión, que puede resultar en un fallo, la compresión produce un lento e infinito rendimiento que rara vez conduce a una falla.

4.2.3 Resistencia a la corrosión

Existen diversas formas en las que se puede presentar la corrosión en tuberías metálicas, dentro de las cuales se tienen:

- Corrosión generalizada
- Corrosión galvánica
- Corrosión por picadura
- Corrosión en zonas estancadas

La selección del material deberá considerar los aspectos de corrosión interna y externa.

4.2.3.1. Corrosión interna

Los factores primordiales que influyen en la corrosión son: las características del agua, temperatura, velocidad de flujo y el contacto con metales de composición diferente.

Las características principales que tienden a variar la naturaleza corrosiva del agua son el contenido de bióxido de carbono, la concentración de oxígeno disuelto, los sólidos disueltos y el valor del *pH*, por lo que mientras mayor sea la concentración de sólidos disueltos, especialmente cloruros y sulfatos, mayor será la corrosión causada por el oxígeno disuelto y el bióxido de carbono.

El oxígeno disuelto reacciona químicamente con el hidrógeno en la superficie catódica, formando agua y dipolarizando la superficie, lo que permite que se disuelva una mayor cantidad de hierro; la corrosión causada por el oxígeno se puede identificar fácilmente ya que tiene la forma de cráteres o depresiones pequeñas.

Lo anterior muestra, que la selección del material para resistir la corrosión interna no depende de fundamentalmente de las características de

composición química de un acero API o ASTM en sus diferentes grados, dado que ambos tienen prácticamente la misma resistencia a la corrosión, por lo que su selección estará básicamente determinada por su resistencia mecánica; no obstante, la mayor parte de los procedimientos disponibles para evitar o retardar el proceso de la corrosión en los sistemas de conducción de agua, consiste en la aplicación de recubrimientos internos o tratamientos químicos, los cuales deben ser especificados en el diseño.

4.2.3.2. Corrosión externa

Al igual que el fenómeno de corrosión interna en tuberías de conducción de agua, la corrosión externa dependerá de varios factores, entre los cuales destacan:

- EI contenido de cloruros en el suelo
- La resistividad del terreno
- La cercanía a líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje
- Presencia de potenciales variables entre la tubería, y suelos causadas por corrientes parásitas
- Cruces con otras líneas o estructuras

Los factores antes señalados muestran que en la selección del material no influyen predominantemente la composición química del acero ni su resistencia contra corrosión, por lo que en el diseño de la línea de conducción deberá de especificarse una protección adecuada contra la corrosión, la cual puede ser a través de un sistema combinado de un recubrimiento anticorrosivo, complementado en caso de requerirse con un sistema de protección catódica (ver factores que producen corrosión).

En el caso de las tuberías de poliéster reforzado con fibra de vidrio, la AWWA M45 (2013) señala que proporcionan una excelente resistencia al agua y a las condiciones del terreno nativo. No están sujetas al ataque general a la corrosión, a la corrosión galvánica, a la corrosión aeróbica, picaduras, a la pérdida de zinc, ni a la corrosión intergranular y grafítica.

Estas tuberías son resistentes a una amplia gama de productos químicos. La resistencia química de la tubería de poliéster reforzado de fibra de vidrio depende principalmente del material de la matriz de resina utilizada. Además, otros factores tales como la construcción de revestimiento, y el método de fabricación pueden influir en la resistencia química de la tubería, pero el factor primario es la resina. Las resinas pueden seleccionarse para proporcionar resistencia química a una amplia gama de materiales. Se debe consultar al fabricante de la tubería sobre el rendimiento para una aplicación particular de productos químicos.

Por otra parte, según el manual AWWA M55 (2006) el PE utilizado en aplicaciones de tuberías de agua es un polímero eléctricamente no conductor y no se ve afectado negativamente por las condiciones naturales del suelo. Como tal, no está sujeto a la acción galvánica y no se oxida ni se corroe. Esta propiedad significa que no se requiere protección catódica para proteger la integridad a largo plazo de la tubería incluso en los entornos más corrosivos. Esta consideración sólo debe aplicarse a los accesorios de metal que se pueden usar para unir a los componentes de la tubería o del sistema.

Otro material comúnmente utilizado en tuberías, es el Policloruro de Vinilo (PVC), que como el manual AWWA M23 (2002) indica, es inmune a casi todos los tipos de corrosión -químicos y electroquímicos- que se presentan en sistemas de tuberías subterráneos. Debido a

que el cloruro de polivinilo no es un conductor, no existen efectos galvánicos ni electroquímicos en los sistemas de tuberías de PVC. El PVC no sufre daños por aguas agresivas o suelos corrosivos. Como consecuencia, no se necesita recubrimiento, protección catódica o película protectora cuando se utilizan tuberías de PVC.

4.2.4 Facilidad de instalación

La selección del material deberá considerar el aspecto relacionado con la instalación, ya que éste incide directamente con el costo; por tal razón, uno de los principales factores que debe de tomarse en cuenta es el peso de la tubería, por lo que la selección de aceros de alta resistencia para la determinación del espesor es una alternativa conveniente para reducir el peso de la tubería y facilitar así su instalación.

Un tipo de tuberías que son de fácil instalación son de PE, que según el manual AWWA M55 (2006), al ser resistentes, ligeras y flexibles, su instalación generalmente no requiere equipos de elevación de alta capacidad.

Las instalaciones subterráneas de sistemas de PE para distribución de agua y de transmisión generalmente implican la excavación de una zanja, la colocación de tubería, la colocación del relleno de empotramiento alrededor de la tubería, y luego la colocación del relleno al nivel de terminación requerido. Una de las desventajas que presentan estas tuberías es que son permeables a hidrocarburos de bajo peso molecular (combustibles derivados del petróleo), a disolventes orgánicos y a sus vapores, por lo que no se recomiendan para suelos contaminados con estos productos.

Si la instalación en suelos contaminados no se puede evitar, las tuberías de PE deben ser instaladas en una carcasa continua sellada, que se extienda por el área contaminada y el suelo limpio. La carcasa puede ser cualquier material de tubería, incluyendo Polietileno (PE), y sus extremos estar herméticamente sellados para evitar la migración de relleno del suelo, y el tubo de PE debe protegerse contra cizallamiento y cargas de flexión. Otra alternativa es remover el suelo contaminado.

La tubería de PE se utiliza con frecuencia para aplicaciones en cuerpos de agua dulce y de agua salada donde corre a lo largo o en todo el cuerpo de agua, o de los emisarios o entradas. La tubería de PE puede ser sumergida en una zanja en el cauce de un río, en el lecho de un lago, o fondo marino, y sumergida en el lecho y rellenada, puede también estar expuesta en el lecho, sumergida por encima de la cama a cierta distancia por debajo de la superficie, o flotando en o sobre la superficie.

Debido a que incluso llena de agua la tubería de PE es menos densa que el agua, las instalaciones sumergidas requieren de un lastre permanente adjunto alrededor de la tubería para garantizar el sumergimiento y una instalación estable una vez sumergido. El diseño del lastre depende del tipo de instalación, y de la presencia de corrientes cruzadas, mareas y olas.

En algunos casos, puede ser apropiado para una tubería flotar o estar encima de una superficie. Por ejemplo, una tubería se puede extender en un depósito y conectarse a una succión flotante, a una estructura de descarga, o una tubería temporal que puede ser necesaria para reducir el nivel del embalse. El tubo de PE flexible puede ser una excelente opción para tales aplicaciones. Cuando la tubería es apoyada en la superficie, unos flotadores deben aguantar su propio peso y el de la tubería con su contenido.

Por otra parte, el manual AWWA M23 (2002) señala que las tuberías de Policloruro de Vinilo (PVC) se deben instalar con lechos que brinden el apoyo adecuado debajo de la tubería. El material de relleno debe ser trabajado bajo los lados de la tubería para proporcionar un acostillado satisfactorio. El material de relleno inicial debe ser colocado a una profundidad mínima de 6 pulg. (150 mm) sobre la parte superior de la tubería. Todo el material de empotramiento debe ser seleccionado y colocado con cuidado, evitando las piedras (más de 2.11 pulg. de tamaño), grumos congelados y escombros. Las piedras afiladas y roca triturada (más de 3/4 pulg.), que podrían causar arañazos o abrasión en la tubería, deben excluirse del material de empotramiento. Deben ejercerse procedimientos adecuados de compactación para proporcionar las densidades de suelo según lo especificado por el ingeniero de diseño.

Después de la colocación y compactación de los materiales de relleno, la nivelación se puede llevar a cabo con maquinaria. El material no debe contener piedras o rocas grandes, material congelado, o escombros. La terminología comúnmente utilizada en la instalación de tuberías de PVC se presenta en la Ilustración 4.7.

4.2.5 Vida útil

La selección de tubería para conducción de agua es hecha en función de su vida útil, es decir, del período en que estará en operación y cubriendo la demanda para la cual ha sido diseñada. Se basa en dos aspectos:

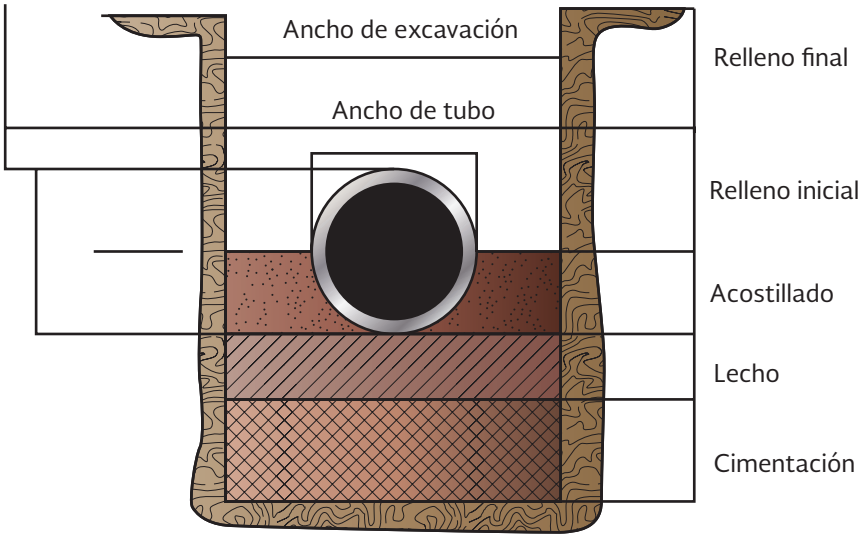
- Duración
- Utilidad

Duración: La duración o tiempo en el que la tubería está en condiciones de operar físicamente, depende de manera directa del material con que está fabricada, y sus variables son:

- Espesor
- Norma y especificación

En la norma y la especificación de la tubería a utilizar, se toman en cuenta factores como corrosión, resistencia mecánica, presión, temperatura, entre otros.

Ilustración 4.7 Zanja transversal tipo para tubería de PVC (adaptado de AWWA M23, 2002)



A medida que se incrementa el espesor o la calidad del material, la duración de la tubería aumenta.

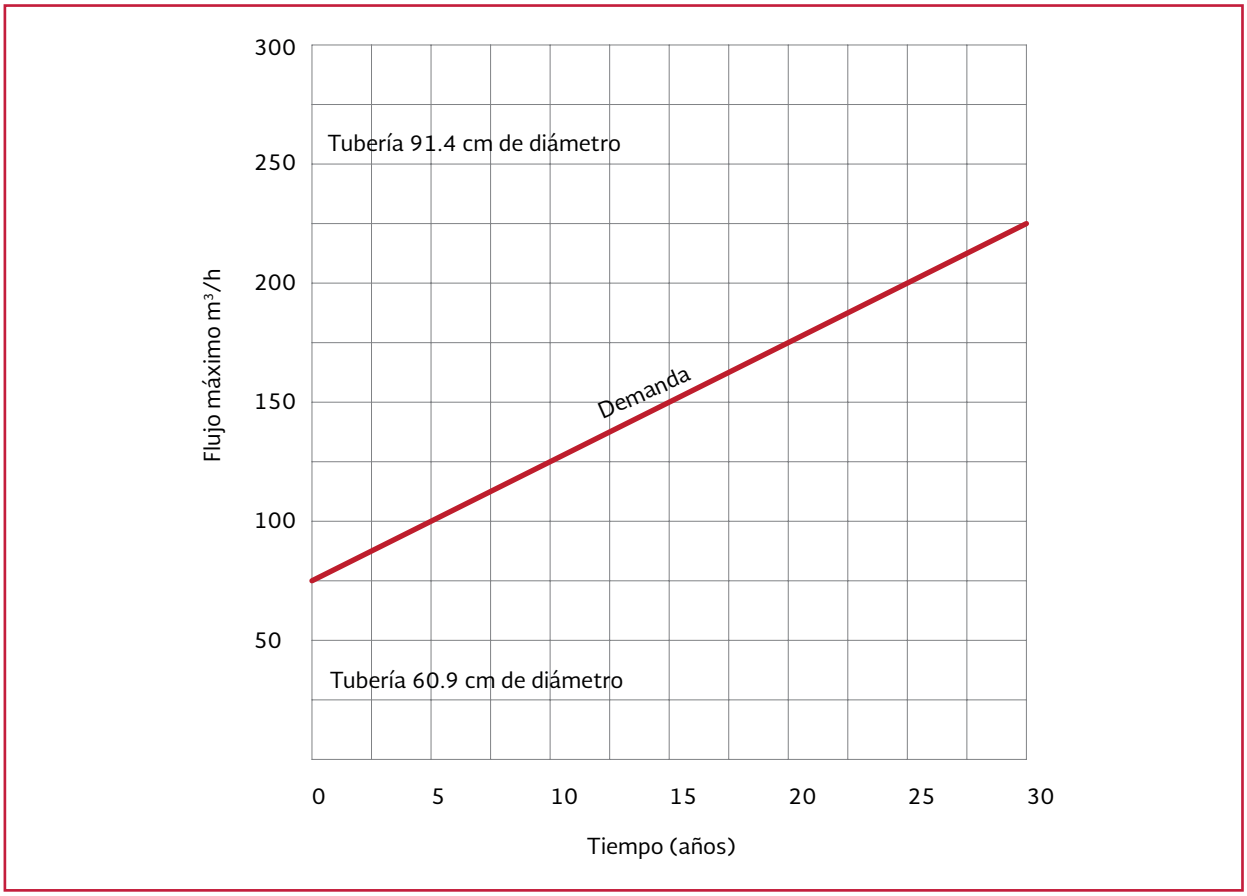
Utilidad: La utilidad de la tubería, entendida como el período en el que satisface la demanda, para condiciones de operación definidas, está en función directa de su diámetro.

En la selección del diámetro de la tubería, es necesario considerar que la demanda de agua normalmente tiende a crecer, debido a factores como el crecimiento poblacional o industrial (ver Ilustración 4.8).

Cuando la demanda de conducción supera la capacidad de operación de la tubería, se podrá manejar el gasto faltante a través de otras líneas paralelas, las cuales aunque forman parte de proyectos diferentes, junto con la línea original podrán conformar un sistema integral o trabajar en forma independiente.

En la actualidad existe una amplia gama de productos y proveedores de tuberías en el mercado, es importante que para cualquier tipo de tubería que se desee utilizar para el diseño hidráulico y posterior instalación en proyecto, se deba verificar que cumpla con la normativa aplicable existente, así también es importante verificar con el proveedor de la misma las características particulares en cuanto a la capacidad de deformación, cargas de presión admisibles y demás características particulares de la tubería que sea seleccionada, con la finalidad de contar con toda la información técnica disponible referente a la tubería que será utilizada en un proyecto dado.

Ilustración 4.8 Crecimiento de la demanda en función del tiempo





5

Protección

En este capítulo se mencionarán y mostrarán los tipos de protección y recubrimientos para las tuberías principalmente de acero, debido a las acciones de intemperismo que llegan a ocurrir en ellas a través de la oxidación del material, en el caso de tuberías plásticas, esto no ocurre debido a las mismas propiedades del material, tal como se mencionó en el capítulo anterior.

5.1. Protección catódica

La protección catódica es el más importante de todos los métodos para el control de la corrosión. Por medio de una corriente eléctrica aplicada externamente, la corrosión es reducida virtualmente a cero, y una superficie metálica puede mantenerse en un ambiente corrosivo sin deterioro por un tiempo indefinido.

La base de la protección catódica es mantener la polarización del cátodo, usando una corriente externa, de tal manera que ambos electrodos (cátodo y ánodo) obtienen el mismo potencial y por lo tanto la corrosión no ocurre. Esta acción se lleva a cabo suministrando una corriente externa al metal que se está corroyendo, sobre la superficie del cual operan celdas de acción local. La corriente sale del ánodo auxiliar (compuesto de cualquier conductor metálico o no metálico) y entra a ambas áreas, la catódica y la anódica de las celdas de corrosión del metal que se quiere proteger, retornando a la fuente de corriente directa.

Cuando las áreas catódicas están polarizadas por la corriente externa, al potencial de circuito abierto de los ánodos, toda la superficie del metal está al mismo potencial y la corriente de acción local no fluye por más tiempo. El metal, por tanto, no puede corroerse mientras se mantenga la corriente externa.

En otras palabras, la protección catódica se puede definir como un método o sistema para reducir la corrosión de una estructura metálica convirtiendo la estructura completa en el cátodo de una celda de corrosión galvánica o electrolítica. La corriente directa, ya sea generada por una celda galvánica o alimentada a la celda electrolítica desde una fuente externa, fluye hacia la estructura protegida, venciendo cualquier corriente que pudiera ser creada por la formación natural de las celdas de corrosión, donde la estructura sería un ánodo, ya que la corriente fluye de la estructura al electrolito, la corrosión no puede ocurrir.

Como ya fue mencionado, el mecanismo de protección depende de una corriente externa que polariza los elementos catódicos de las celdas de acción local, al potencial de circuito abierto de los ánodos. La superficie total llega a ser equipotencial (los potenciales de cátodos y ánodos son iguales), y en esta forma las corrientes de

corrosión ya no fluyen. Visto en otra forma, con un valor lo suficientemente alto de densidad de corriente externa, una corriente positiva neta entra al metal en todas las regiones de la superficie metálica (incluyendo las áreas anódicas) y así no hay tendencia para que los iones metálicos entren a la solución.

En la práctica, la protección catódica puede aplicarse para proteger metales tales como aceros (desnudos o embebidos en concreto), cobre, plomo y bronce, contra la corrosión en todo tipo de suelos y en casi todos los medios acuosos.

Principios de la protección catódica

La corrosión es un proceso electroquímico en donde una estructura metálica está sujeta a una pérdida de metal, causada por una descarga de corriente de la estructura al electrolito circundante.

Se pueden presentar muchas formas de corrosión debido a diversos factores y especialmente en estructuras enterradas debido al par galvánico activo.

Para formar la celda galvánica o electrolítica protectora se requieren los mismos cuatro elementos que para la celda de corrosión de formación natural: un ánodo, un cátodo, un electrolito y un circuito para la corriente. El cátodo es la estructura protegida, la cual debe ser eléctricamente continua para asegurar una protección completa. El electrolito conductor es el ambiente mismo del suelo corrosivo. El ánodo y el circuito para la corriente o trayectoria de retorno de la corriente se adicionan, como se muestra en la Ilustración 5.1 e Ilustración 5.2.

Para crear la celda galvánica, se seleccionan los ánodos de la serie galvánica para generar la corriente necesaria. Para crear una pila o celda de corrosión electrolítica se utiliza una fuente externa de corriente directa. En cualquier caso, los ánodos instalados son barras o varillas de metal destinadas a corroerse. Después de varios años de servicio, se puede requerir el reemplazo de los ánodos.

El diseño de sistemas de protección catódica efectivos, económicos y factibles, es una tarea que debe ser realizada por un ingeniero en corrosión calificado.

Los detalles, tales como tamaño y material de los ánodos y el diseño de la caja terminal, pueden variar considerablemente de una instalación a otra, con objeto de alcanzar la máxima protección y la mayor economía. Los sistemas que incorporan protección catódica requieren monitoreo y mantenimiento periódico, para asegurar que se ha suministrado la protección adecuada; por lo que los propietarios de los sistemas deben ser notificados al respecto.

Para explicar los principios de la protección catódica se considera la corrosión de un metal (Me) típico en un medio ácido. Las reacciones electroquímicas son la disolución del metal y el desprendimiento de hidrógeno, Ecuación 5.1 y Ecuación 5.2.

$$Me \rightarrow Me^{n+} + ne^{-} \qquad \text{Ecuación 5.1}$$

$$2H^{+} + 2^{e-} \rightarrow H_2 \qquad \text{Ecuación 5.2}$$

Una protección catódica se logra si los electrones viajan hacia la estructura metálica a proteger, ya que al examinar las reacciones anteriores se observa que la adición de elec-

Ilustración 5.1 Metal protegido contra corrosión mediante una batería y un ánodo inerte (adaptado de AWWA M27, 2013)

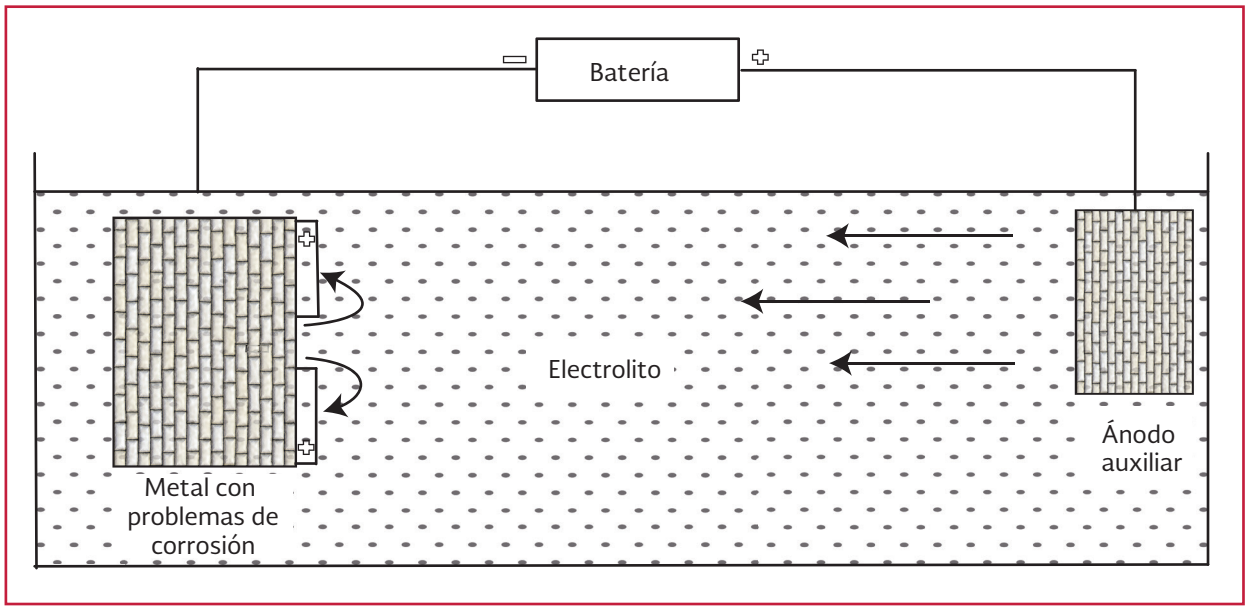


Ilustración 5.2 Protección catódica, equipos y medición de resistencia de ánodos



trones a la estructura tiende a suprimir la disolución del metal y a acelerar la producción de hidrógeno. Si se considera que la corriente eléctrica fluye de positivo a negativo, como en la teoría electrónica convencional, entonces una estructura estará protegida si la corriente eléctrica entra desde el electrolito a la estructura. Si sucediera lo contrario, es decir la corriente pasara del metal al electrolito, ocurriría una corrosión acelerada.

Existen dos métodos para proteger catódicamente una estructura, ambos muy efectivos y con aplicaciones particulares que pueden complementarse para lograr una máxima protección: Sistema de ánodos galvánicos y Sistema por corriente impresa.

5.1.1 Sistemas de ánodos galvánicos

Este método de protección se conoce también como sistema de ánodos de sacrificio. Los sistemas galvánicos de protección catódica hacen uso de los pares galvánicos de corrosión que se crean cuando se conectan eléctricamente dos metales diferentes en un electrolito común. En la Ilustración 5.3 se muestra el fundamento de una protección catódica galvánica.

La diferencia del potencial se logra por el potencial galvánico natural que existe entre el magnesio y el hierro. De la serie electromotriz o galvánica (ver Tabla 5.1), se puede ver que el potencial del hierro respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre es de -0.5 volts, mientras que el del magnesio es de −1.75 volts. Esencialmente ésta es la batería que proporciona el voltaje. El fierro es positivo con respecto al magnesio. Por lo tanto, el flujo de corriente convencional en el circuito metálico es en el sentido del hierro (+), hacía el magnesio.

La corriente sale del ánodo (causando una pérdida de metal y corrosión) y entra al electrolito. La corriente fluye por el electrolito y entra al cátodo sin causar corrosión, dándole de esta forma protección catódica por medios galvánicos.

Los metales de sacrificio usados para protección catódica son principalmente magnesio y sus aleaciones y en último caso zinc y aluminio.

La diferencia de potencial de un circuito abierto del magnesio respecto al acero es de aproximadamente 1 voltio, de tal forma que solamente una longitud limitada de una línea de tubería, puede ser protegida por medio de un solo ánodo, particularmente en suelos de alta resistividad.

El potencial del zinc es menor que el del magnesio y por lo tanto la corriente de salida por el ánodo es también menor. Generalmente, se especifica un zinc de alta pureza para evitar una polarización anódica significativa, que trae como consecuencia la reducción de la corriente de salida, que es originada por la acumulación de productos de reacción del zinc aislantes y adherentes sobre zinc comercial. Esta tendencia es menos pronunciada en el zinc de alta pureza.

El aluminio opera teóricamente a un voltaje entre el magnesio y el zinc. Tiende a ser pasivo en agua o en suelos, con acompañamiento de cambio de potencial a un valor cercano al potencial del acero, donde deja de funcionar como un electrodo de sacrificio. En estos casos, si se quiere evitar la pasividad, es necesario rodear al electrodo con un ambiente químico especial rico en cloruros; sin embargo, tal ambiente llamado relleno (backfill), es solamente una medida temporal.

El aluminio aleado con 0.10 por ciento de estaño, seguido por un tratamiento térmico a 620°C durante 16 horas y enfriado en agua, disminuye mucho la polarización anódica en soluciones de cloruro. El potencial de corrosión de la aleación anterior en cloruro de sodio 0.10 N es de 1.20 V y 0.50 V, para el aluminio puro. Algunos ánodos de sacrificio de aluminio contienen aproximadamente 0.10 por ciento de estaño y 5.00 por ciento de zinc, otra composición contiene 0.60 por ciento de zinc. 0.04 por ciento de mercurio y 0.06 por ciento de fierro. Tales aleaciones en la forma de ánodos de sacrificio tienen anualmente un consumo aproximado de 5 200 toneladas en los Estados Unidos.

La mayor parte de los ánodos de sacrificio son de magnesio y a menudo están aleados con 6.0

Ilustración 5.3 Protección catódica por ánodos galvánicos (adaptado de AWWA M27, 2013)

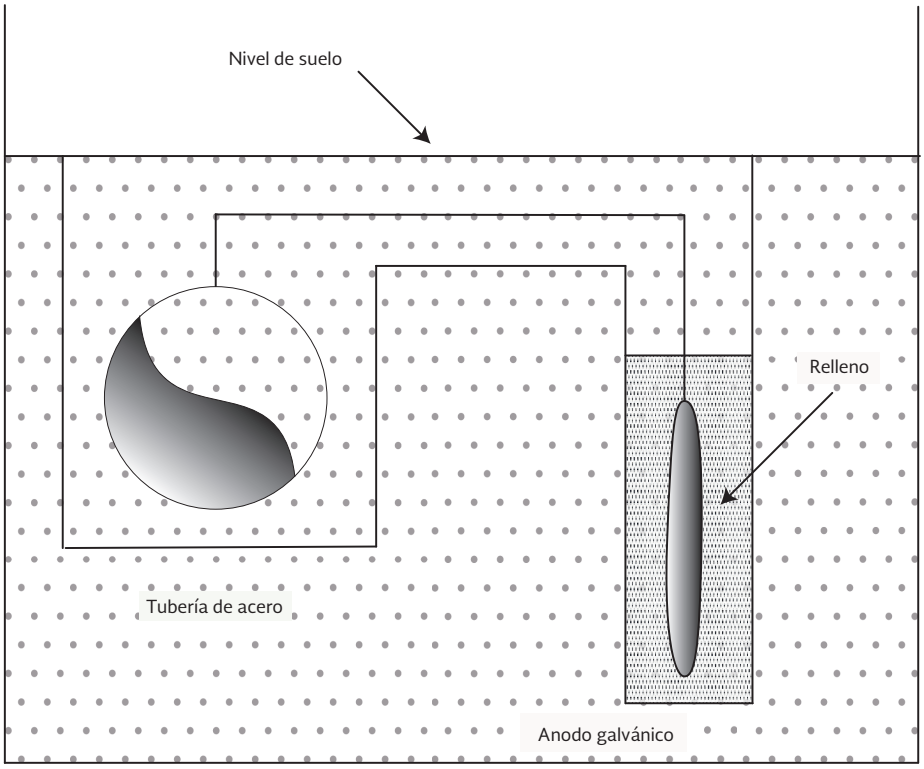


Tabla 5.1 Serie galvánica o electromotriz (adaptada de AWWA M27, 2013)

Metal	Volts (1)
Magnesio comercial puro	-1.75
Aleación de Magnesio (6% Al, 3% Zn, 0.15% Mn)	-1.60
Zinc	-1.10
Aleación de Aluminio (5% Zn)	-1.05
Acero suave (limpio y brilloso)	-0.5 a -0.8
Aluminio comercialmente puro	-0.80
Acero suave (oxidado)	-0.2 a -0.5
Hierro fundido (sin grafito)	-0.50
Plomo	-0.50
Acero suave en concreto	-0.20
Cobre, Latón, Bronce	-0.20
Hierro fundido con alto contenido de silicón	-0.20
Escala de molibdeno en Acero	-0.20
Carbón, Grafito, Coque	+0.30

por ciento de aluminio y 3.0 por ciento de zinc para reducir el ataque por picadura e incrementar la eficiencia de corriente. Usando magnesio de alta pureza, con un contenido aproximado de 1.00 por ciento de manganeso, se obtiene la ventaja de un potencial más alto. La eficiencia práctica de ánodos de magnesio promedia aproximadamente 500 Amp h/libra, comparada a la eficiencia teórica de 1000 Amp h/libra.

Se colocan varios ánodos a lo largo de la tubería para lograr una distribución uniforme de la corriente. La determinación de las corrientes de protección es empírica. Los valores mostrados en la Tabla 5.2 se emplean comúnmente y representan los requerimientos típicos de corriente para la protección catódica del acero.

En algunos suelos muy ácidos se requieren corrientes de 1 015 mA/pie^2 para reducir la corrosión de estructuras de acero a un nivel aceptable, mientras que para proteger una tubería con recubrimiento orgánico, se requiere mucho menos corriente, ya que sólo hay que proteger algunas zonas descubiertas ocasionadas por fallas de aplicación o por daños durante las maniobras.

En la gran mayoría de los casos, durante las operaciones de protección catódica se requieren ajustes del tamaño de ánodo y del valor del voltaje aplicado, hasta que se llegue al nivel de protección deseado. Un método no empírico y más rápido, es medir el potencial electroquímico de la estructura a proteger con un electrodo de referencia adecuado. Esta medición se realiza con un voltímetro de alta resistencia interna: se coloca el electrodo de referencia sobre el suelo o mejor sobre una esponja impregnada de solución salina para mejorar el contacto eléctrico con el suelo y se determina fácilmente la densidad de corriente catódica necesaria para polarizar la tubería.

En la Ilustración 5.4 e Ilustración 5.5 se ilustra el procedimiento antes mencionado. En el caso de ánodos de sacrificio, como el magnesio, la medición es la misma y sirve para determinar el número y el tamaño de los ánodos necesarios para lograr una protección total. Es necesario efectuar un control programado de los potenciales a lo largo de una tubería o de estructuras más complejas, para determinar la uniformidad de la corriente aplicada.

La selección de un ánodo galvánico se efectúa a partir de consideraciones de ingeniería y económicas. El magnesio es el ánodo galvánico más utilizado; su eficiencia es baja (50 por ciento), pero su potencial es fuertemente electronegativo y produce una alta densidad de corriente. En la Tabla 5.3 se comparan algunos tipos de ánodos galvánicos.

Material de relleno

En aplicaciones subterráneas el suelo no es homogéneo (aunque aparentemente parezca serlo), y los productos de corrosión que se forman, no se pueden predecir, debido a la gran diversidad de medios ambientes en los cuales pueden estar instalados. Por lo tanto, si los ánodos se instalan descubiertos, se pueden formar productos de corrosión que pueden volver pasivo al ánodo, o podrían causar un ataque corrosivo no uniforme, que se traduce en un decremento de la vida útil del ánodo.

Debido a lo anterior, los ánodos galvánicos que se van a utilizar en instalaciones subterráneas, generalmente se instalan como paquetes que contienen un relleno especial denominado “backffil”. El material especial que se utiliza como relleno debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Proporcionar un medio ambiente uniforme para el metal anódico

Tabla 5.2 Protección catódica del acero (adaptado de AWWA M 27, 2013)

Estructura	Ambiente	Condiciones	Densidad de corriente
			(mA/pie²)
Líneas de tanques de almacenamiento	Bajo tierra (suelos)	Estático	1-3
Líneas de tubería	Agua fresca	Fluido	5-10
Piletas	Agua de mar (oleaje)	Movimiento	6-8

Ilustración 5.4 Protección catódica a base de ánodos galvánicos en el que se muestra un punto de prueba para medición (adaptado de AWWA M27, 2013)

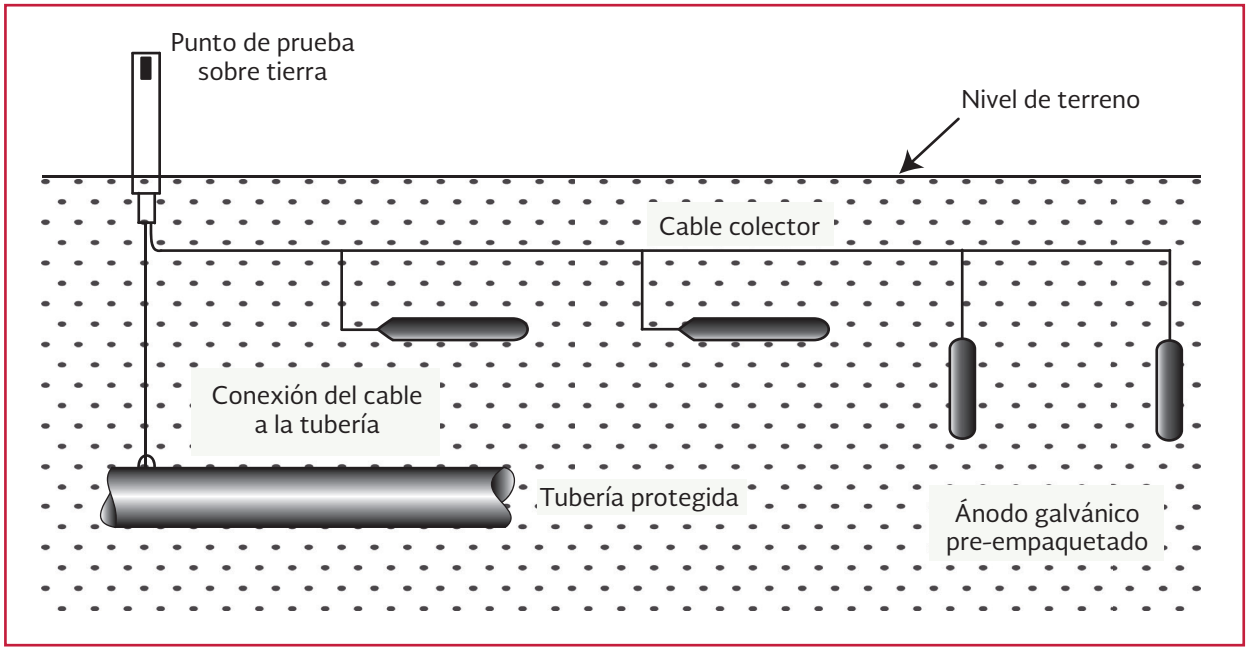


Ilustración 5.5 Medición del potencial de corrosión electroquímico de la estructura a proteger, con un electrodo de referencia (adaptado de AWWA M 27, 2013)

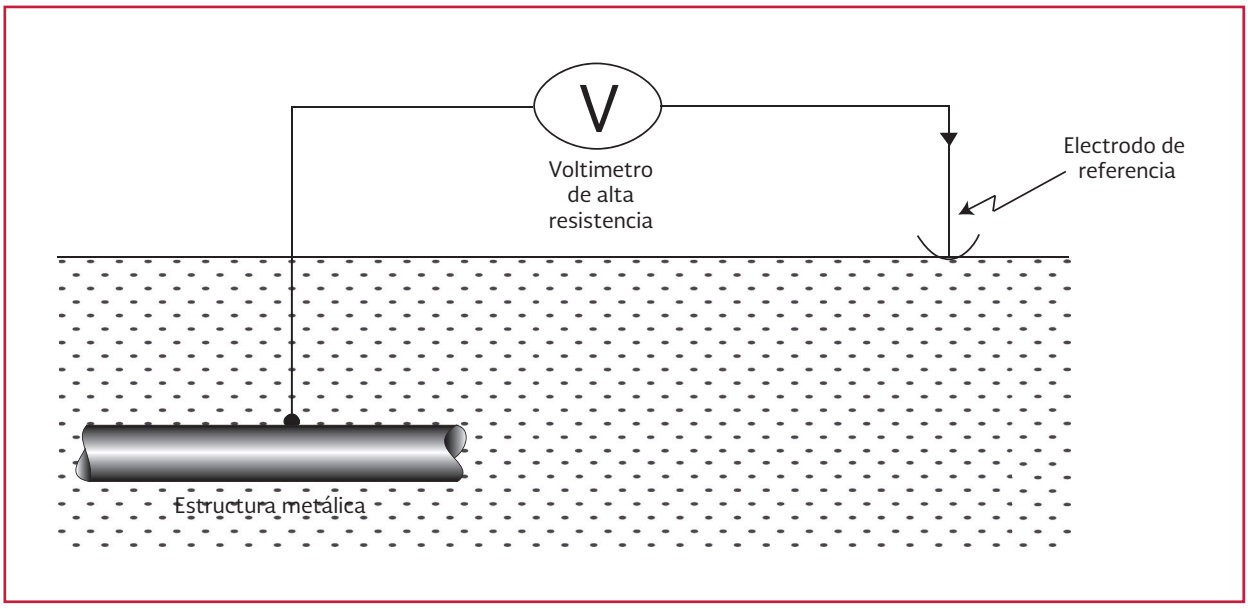


Tabla 5.3 Ánodos galvánicos (adaptado de AWWA M 27, 2013)

	Magnesio	Zinc	Aluminio
Consumo teórico (Libras/Amp-año)	9	23	6.50
Consumo real (Libras/Amp-año)	18	25	16-20
Potencial vs. electrodo de cobre/sulfato de cobre	-1.70	-1.15	-1.30

- Debe ser capaz de retener humedad
- Debe retardar o prevenir la pasividad del ánodo

Los materiales de relleno generalmente son mezclas de diversas proporciones de yeso hidratado y de arcilla bentonítica y sulfato de sodio.

Características y selección de los ánodos

Todos los materiales que se utilizan para los ánodos galvánicos, independientemente que se utilicen en aplicaciones submarinas o subterráneas, son aleaciones que tienen las siguientes propiedades:

- Un potencial alto
- Una vida útil prolongada
- Eficiencia
- Otras cualidades metalúrgicas, tales como maleabilidad y dureza

En la selección del material se deben comparar cuidadosamente estos factores para llegar a la selección más económica y efectiva:

- Cantidad requerida de corriente
- Peso total de cada tipo de ánodo
- Cálculos para determinar la vida útil del ánodo
- Vida útil deseada para la instalación
- Eficiencia de los tipos de ánodos
- Intervalo de desgaste teórico
- Potencia
- Resistividad del suelo o del agua
- Costo del ánodo
- Costos de embarque
- Disponibilidad de material
- Experiencia requerida para instalar el sistema de ánodos galvánicos. Es probable que para cada instalación cambie el orden de prioridad de cada uno de los factores anteriores

Diseño y construcción

El zinc y el magnesio son los metales usados como ánodos de sacrificio para proteger estructuras de hierro y acero. Los ánodos de magnesio son probablemente los más usados, debido a que generan voltajes más altos que los ánodos de zinc. Los ánodos de magnesio proporcionan protección en suelos con resistencias menores a 5 000 Ohms-cm. Los ánodos de zinc están limitados para usarse en suelos cuyas resistividades sean de 1 000 Ohms-cm o menores. Para determinar la salida de corriente de un ánodo de magnesio, se deben conocer el ánodo y los factores de corrección. La Tabla 5.4 lista los factores anódicos basados en el potencial (P/S) suelo-línea de tubería requerido.

Un potencial (P/S) de -850 mV, con referencia a un electrodo de cobre sulfato de cobre, se considera que es adecuado para asegurar que una estructura ferrosa (hierro o acero) está protegida. Para acero en concreto, un potencial de -710 mV puede ser considerado adecuado para la protección. Los niveles de protección requeridos para otros metales y aleaciones y criterios adicionales

Tabla 5.4 Factores de los ánodos de magnesio (adaptada de AWWA M 27, 2013)

Peso del ánodo de magnesio	Dimensión	Factor anódico	P/S requerido	Factor de corrección
kg (lbs.)	pulgadas (mm)	(f)		y
1.3 (3)	3x3x4.5	0.53	-0.70	1.14
	(76x76x144)			
2.3 (5)	3x37.5	0.60	-0.80	1.07
	(76x76x191)			
4 (9)	3x3x13.5	-0.85	0.71	1.00
	(76x76x343)			
7.7 (17)	3x3x25.5	1.00	-0.90	0.93
	(76x76x648)			
14.7 (32)	5x5x25.5	1.06	-1.00	0.79
	(127x127x533)			
23 (50)	8 diámetros	1.09	-1.10	0.64
	(203 x 15 381)			

Nota: Estos factores están basados en las dimensiones típicas del ánodo.

de protección pueden encontrarse en la norma NACE (2002).

La corriente de salida de un ánodo se calcula con la ecuación:

$$I = \frac{150\,000(f)(y)}{\rho} \qquad \text{Ecuación 5.3}$$

donde:

I = Corriente de salida (mA)
f = Factor anódico (ver Tabla 5.4)
y = Factor de corrección (ver Tabla 5.4)
ρ = Resistividad promedio (Ohm-cm)

Por ejemplo, para un potencial (P/S) de 0.90 V, un ánodo de magnesio de 8.0 kg (17 libras), y una resistividad promedio de 1 000 Ohm-cm, la corriente de salida del ánodo es:

$$I = \frac{150\,000(1)0.9}{1\,000} = 135 \text{ mA}$$

La vida del ánodo se estima mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{57\,W}{I} \qquad \text{Ecuación 5.4}$$

donde:

L = Vida útil o esperada (años)
W = Peso del ánodo, kg (libras)
I = Corriente de salida del ánodo (mA)

Un ánodo de magnesio de 8 kg (17 lbs) con una corriente de salida de 140 mA tiene una vida estimada de:

$$I = \frac{57(17)}{140} = 6.92$$

La resistencia de contacto de una varilla enterrada verticalmente se puede calcular de la siguiente manera:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L}\left(ln\frac{8L}{d} - 1\right) \qquad \text{Ecuación 5.5}$$

donde:

R = Resistencia a tierra (Ohms)
L = Longitud de la varilla a tierra (cm)
d = Diámetro de la varilla a tierra (cm)
ρ = Resistividad (Ohm-cm)

De esta manera, se puede observar que la varilla enterrada o la geometría del relleno químico pueden tener un gran efecto sobre la resistencia. La corriente de salida se relaciona a la resistencia de acuerdo con la Ley de Ohm.

Los factores anódicos desarrollados por Tefankjian son los resultados de los cálculos mencionados. Por ejemplo, existe un ánodo de magnesio Galvomag de 8 kg (17 libras) de 3x3x25.5 pulgadas, empacado en un relleno químico de dimensiones 6 por 28 pulgadas. También hay, un ánodo de magnesio de alta pureza, de dimensiones 4x4x17 pulgadas empacado en un relleno químico de dimensiones 6.5x19 pulgadas. El primero proporciona menor resistencia de contacto debido a su mayor longitud. Además, este tiene mayor voltaje. Por lo que de acuerdo con la Ley de Ohm, el primero proporcionará más corriente y por consiguiente mayor potencia de protección.

Ventajas de los ánodos galvánicos

- Son independientes de cualquier fuente de energía eléctrica
- Su instalación es relativamente sencilla, pudiéndose hacer modificaciones hasta obtener el efecto deseado
- No existe posibilidad de que dañen estructuras vecinas, debido a que la entrega de corriente en cualquier punto es baja
- La entrega de corriente no puede ser controlada. Sin embargo, existe una tendencia a que su corriente sea auto ajustable, ya que si las condiciones cambian de tal forma que el material a ser protegido se vuelva menos positivo, entonces la entrega de corriente del ánodo aumenta. Al seleccionar el material, es posible asegurar que el metal de la estructura no pueda llegar a un potencial lo suficientemente negativo como para dañar los recubrimientos
- Pueden ser unidos por pernos o soldados directamente a la superficie que va a ser protegida, evitando así la necesidad de perforar el metal, por ejemplo de los cascos de embarcaciones
- Sus conexiones se protegen catódicamente
- No puede haber error en la conexión

Desventajas de los ánodos galvánicos

- La corriente disponible es limitada, lo que ocasiona que su uso en instalaciones subterráneas pueda verse limitado a la protección de estructuras bien recubiertas o a proporcionar protección de tipo local
- Su uso puede resultar impráctico, excepto en suelos o en aguas con baja resistividad, debido a su limitada salida de corriente
- Su inspección involucra el llevar a cabo pruebas con instrumentos portátiles, en cada uno de los ánodos o entre pares adyacentes de ánodos
- Su vida útil varía con las condiciones ambientales, de tal forma que se pueden realizar reemplazos a intervalos de tiempo variables
- Su volumen puede bajar el flujo y/o causar turbulencia y disminuir el acceso en los sistemas de circulación para agua

Criterio para su aplicación y selección

a) Con este concepto se puede lograr una protección contra la corrosión causada por los pares galvánicos, al colocar barras de metal electroquímicamente activas (ánodos), a estructuras sumergidas o enterradas, que son menos activas (cátodos). Los ánodos descargan corriente, se corroen y protegen de la corrosión a la

estructura a la cual están conectados.

b) Los ánodos de sacrificio sirven esencialmente como fuente de energía eléctrica portátil. Se usan particularmente donde no se dispone fácilmente de fuerza eléctrica o en situaciones donde no es conveniente o económico instalar líneas de fuerza o en su defecto, cuando se desea proteger tramos de tuberías pequeños.
c) El voltaje bajo es algunas veces una ventaja sobre voltajes impresos más altos, ya que el peligro de sobreprotección hacia algunas porciones del sistema es menor, y siendo que la corriente total por ánodo es limitada, el peligro de daño por "corrientes vagabundas" o problemas de interferencia a estructuras metálicas unidas se reduce.
d) Este tipo de protección también se usa para proteger una tubería enterrada. En la Ilustración 5.4 se observa el dispositivo de protección catódica para una línea de tubería bajo tierra

5.1.2 Sistema por corriente impresa

Los sistemas de protección catódica en los cuales se forma una celda de corrosión electrolítica, se llaman sistemas por corriente impresa o sistemas de cama anódica con rectificador. Como se muestra en la Ilustración 5.6 e Ilustración 5.7 los sistemas por corriente impresa incluyen una unidad rectificadora para suministrar corriente eléctrica directa y una serie de ánodos o electrodos auxiliares de fierro o grafito, insertados en el suelo (llamados cama anódica).

A este método de protección se le conoce comúnmente como "protección catódica con una fuente externa de corriente eléctrica".

La corriente eléctrica se envía desde la terminal positiva del rectificador, a los ánodos cama tierra, de donde es enviada (impresa) dentro de la tierra. La corriente viaja a través de la tierra y entra a la estructura protegida. La estructura lleva la corriente hasta un cable conector, el cual la regresa a la terminal negativa del rectificador. Conforme la corriente fluye, la estructura que actúa como el cátodo de la celda electrolítica es protegida de la corrosión, mientras que el ánodo de la cama anódica, se corroe.

Diseño y construcción de sistemas

El diseño de un sistema por corriente impresa requiere que un ingeniero en el control de la corrosión evalúe los materiales anódicos y la configuración de la cama tierra, la unidad de suministro de corriente, la continuidad eléctrica de la estructura protegida, el potencial de corrosión por corrientes parásitas de estructuras contiguas, y las variables ambientales.

Los ánodos que forman la cama-tierra son regularmente de grafito, ferro silicio, o fragmentos de metal. Existen cuatro configuraciones básicas de instalación de la cama anódica:

1. Configuración horizontal remota, la cama tierra se coloca a cierta distancia de la estructura que se va a proteger, con el propósito de efectuar una distribución amplia de la corriente
2. Configuración de pozo profundo (remota vertical), los ánodos se colocan en agujeros profundos para expandir la corriente o para proteger estructuras profundas, tales como ademes de pozos

Ilustración 5.6 Protección catódica por corriente impresa de un tanque de almacenamiento enterrado (adaptado de AWWA M 27, 2013)

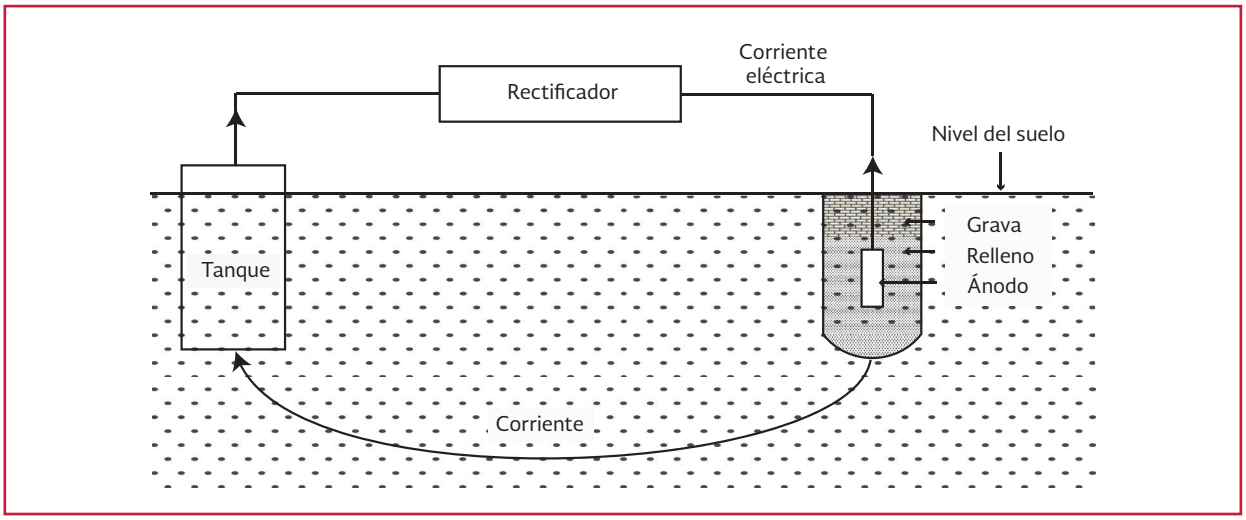


Ilustración 5.7 Rectificador de corrientes impresas



3. Configuración distribuida (Ilustración 5.8), los ánodos se colocan para proteger estructuras específicas, como tanques, o se distribuyen a lo largo de una línea de tubería; esta configuración reduce la interferencia con otras estructuras enterradas y reduce el efecto de escudo que una estructura puede tener para otra
4. Configuración horizontal, también llamada la configuración paralela, se instala un ánodo continuo paralelo a la línea de tubería protegida. Esta configuración proporciona una buena distribución de la corriente y reduce la interferencia con otras estructuras

La unidad de suministro de corriente, como la mostrada en la Ilustración 5.8, incluye una unidad de fuerza de 110 V, con corriente alterna, un medidor, un switch con interruptor para proteger al rectificador, un transformador reductor para reducir el voltaje y un elemento rectificador para cambiar la corriente alterna a corriente directa. Los elementos rectificadores son celdas de óxido de cobre, celdas de selenio o diodos de silicio.

La continuidad eléctrica de la estructura protegida es esencial, ya que actúa como parte de la trayectoria del retorno de corriente. Si existe una interrupción en la continuidad eléctrica, quizá en alguna junta de la tubería, entonces la potencia eléctrica del sistema forzará a la corriente hacia el suelo alrededor del área aislada.

La corrosión ocurrirá en el punto donde la corriente sale de la estructura protegida (ver Ilustración 5.9).

Las estructuras metálicas que yacen en el área de la estructura protegida, pero no tienen continuidad eléctrica con ella, pueden ser corroídas por las corrientes de la protección catódica (Ilustración 5.10 e Ilustración 5.11). El grado de corrosión por corrientes parásitas depende de la localización, tamaño y configuración de la estructura extraña . Las variables técnicas que deben considerarse cuando se diseña un sistema de protección catódica por corriente impresa incluyen:

- Detalles de la estructura a protegerse
- Resistividad promedio del suelo
- Requerimientos de corriente
- Localizaciones y tipos de estructuras extrañas
- Disponibilidad de suministro de corriente
- Consistencia de las propiedades

En el diseño de un sistema que sirva a una línea de tubería, se deben revisar los datos de la exploración del suelo y se escoge un área de baja resistividad para la cama anódica. Una vez que el área es seleccionada, es necesario realizar una prueba de corriente. Los resultados de esta prueba ayudan a seleccionar el equipo rectificador y a determinar como el potencial afecta a las estructuras extrañas. Con el requisito de corriente establecido, se diseña el sistema completo para que tenga una resistencia del circuito tan baja como sea posible. Entre más baja sea la resistencia del circuito, más bajos serán los costos iniciales y de energía eléctrica.

El rectificador, la tierra, la interfaz ánodo a tierra, la estructura a tierra, y los cables que conectan al rectificador con los ánodos y la estructura, hacen contribuciones significativas a la resistencia del circuito. La resistencia del ánodo a tierra depende de la colocación, número y espaciamiento de los ánodos; la resistencia puede ser reducida rodeando cada ánodo con carbón de coke (coke triturado). Existen ecuaciones para estimar la resistencia del ánodo a tierra. El número de ánodos también puede determinarse por medio de una ecuación,

Ilustración 5.8 Protección catódica por corriente impresa (adaptado de AWWA M 27, 2013)

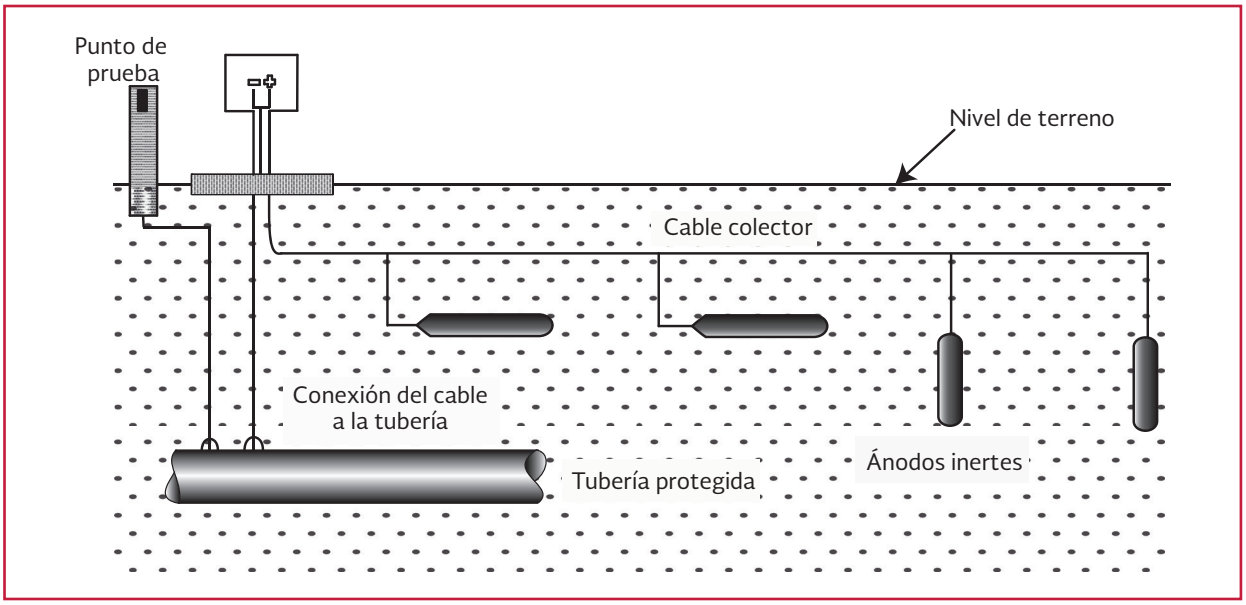


Ilustración 5.9 Corrosión debida a la falta de protección catódica por discontinuidad eléctrica (adaptado de AWWA M27, 2013)

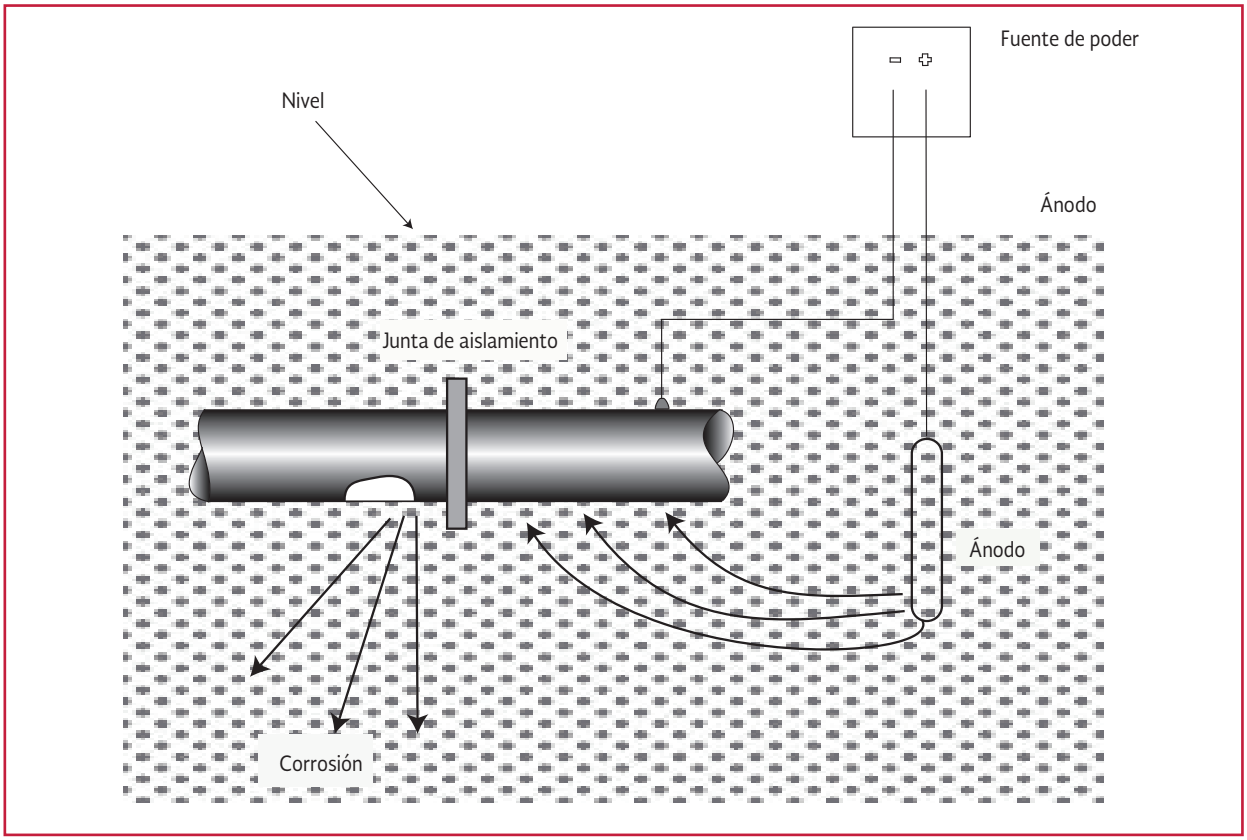


Ilustración 5.10 Corrosión por corrientes vagabundas provocadas por un sistema de protección catódica por corriente impresa (adaptado de AWWA M27, 2013)

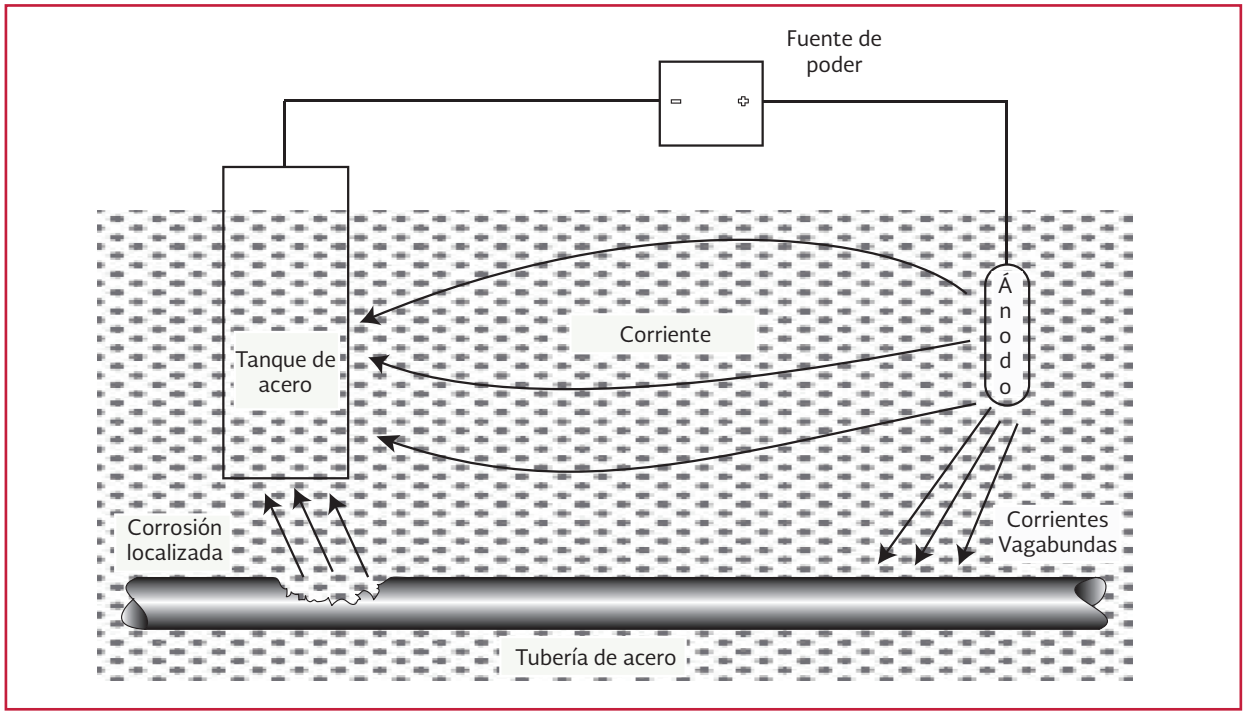
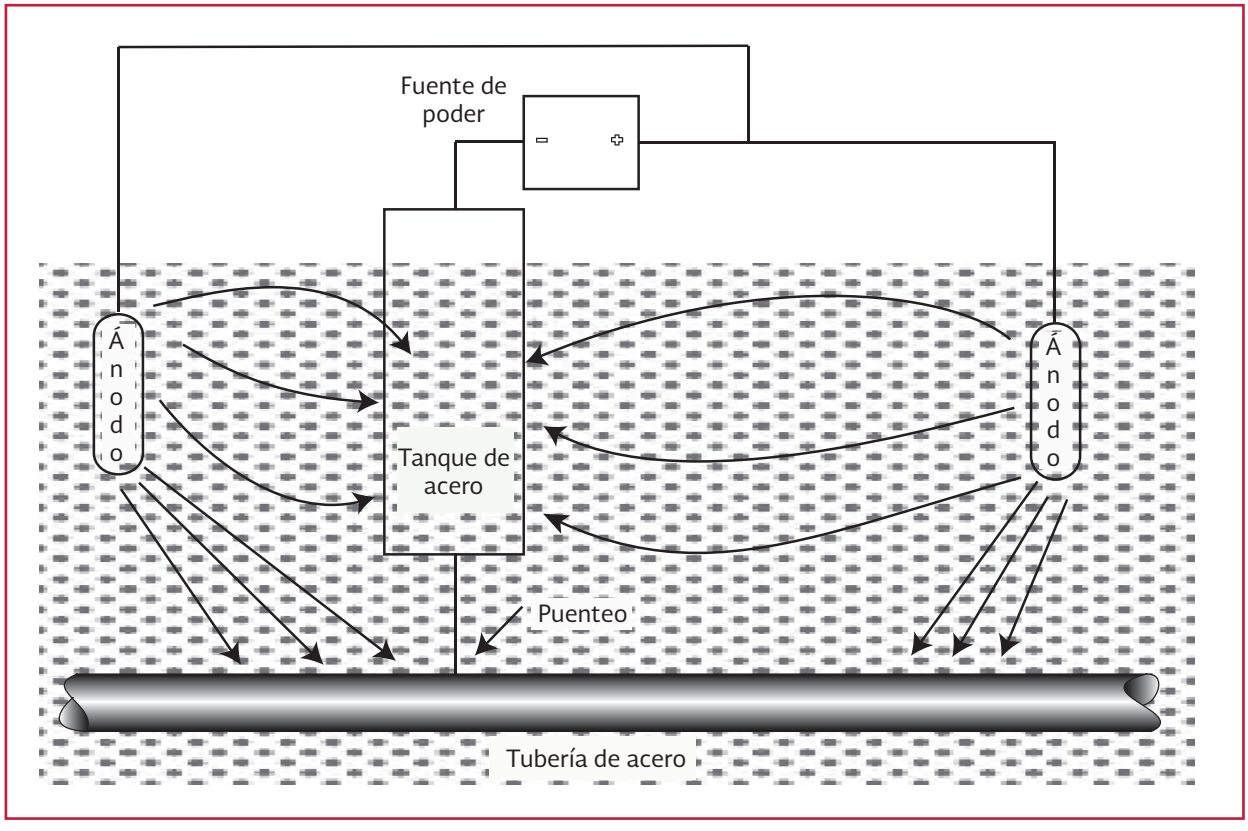


Ilustración 5.11 Protección catódica por corriente impresa para un tanque de acero, misma que ha sido utilizada para proteger una tubería aledaña mediante un puenteo (adaptado de AWWA M27, 2013)



si se conoce la resistencia del ánodo a tierra, la resistividad del suelo, el espaciamiento del ánodo, la longitud del ánodo y el radio del ánodo.

En la Ilustración 5.12 se ilustra un dispositivo típico de protección catódica por corriente impresa. Una fuente de corriente eléctrica se conecta con su polo negativo a un tanque enterrado que se quiere proteger, mientras que el polo positivo se conecta a un electrodo de grafito. Los conductores eléctricos hacia el tanque y hacia el electrodo inerte se aíslan para evitar pérdidas de corriente. Generalmente, el electrodo inerte se rodea con un relleno que puede ser carbón de coke, yeso, bentonita, o sulfato de sodio para mejorar el contacto eléctrico entre el ánodo y el suelo. La corriente entra desde el suelo hacia el tanque, eliminando así su corrosión.

La Tabla 5.5 muestra una variedad considerable de ánodos para voltaje o corriente aplicada, desde chatarra de acero con grandes pérdidas por corrosión, hasta el electrodo inerte de titanio recubierto de platino, caro pero muy efectivo. Los materiales más utilizados en la práctica como ánodos son: el acero, el grafito y el hierro de alto silicio, aunque el plomo y el titanio con recubrimiento de platino se usan cada vez más en medios marinos.

Interferencia por corrientes parásitas

Los sistemas de protección catódica a menudo provocan efectos adversos en estructuras aledañas por "corrientes vagabundas o corrientes parásitas", que son corrientes directas que se difunden a través de los suelos. Si se coloca un material metálico en un campo eléctrico fuerte, se desarrolla una diferencia de potencial sobre su superficie, lo que lleva a una corrosión acelerada en la zona por la cual sale la corriente eléctrica. La Ilustración 5.11 muestra las corrientes vagabundas resultantes de una protección catódica y la zona de una tubería atacada por corrosión acelerada (zona donde sale la corriente).

Ilustración 5.12 Detalle de la disposición de un ánodo inerte (grafito) para un sistema de protección catódica por corriente impresa (adaptado de AWWA M27, 2013)

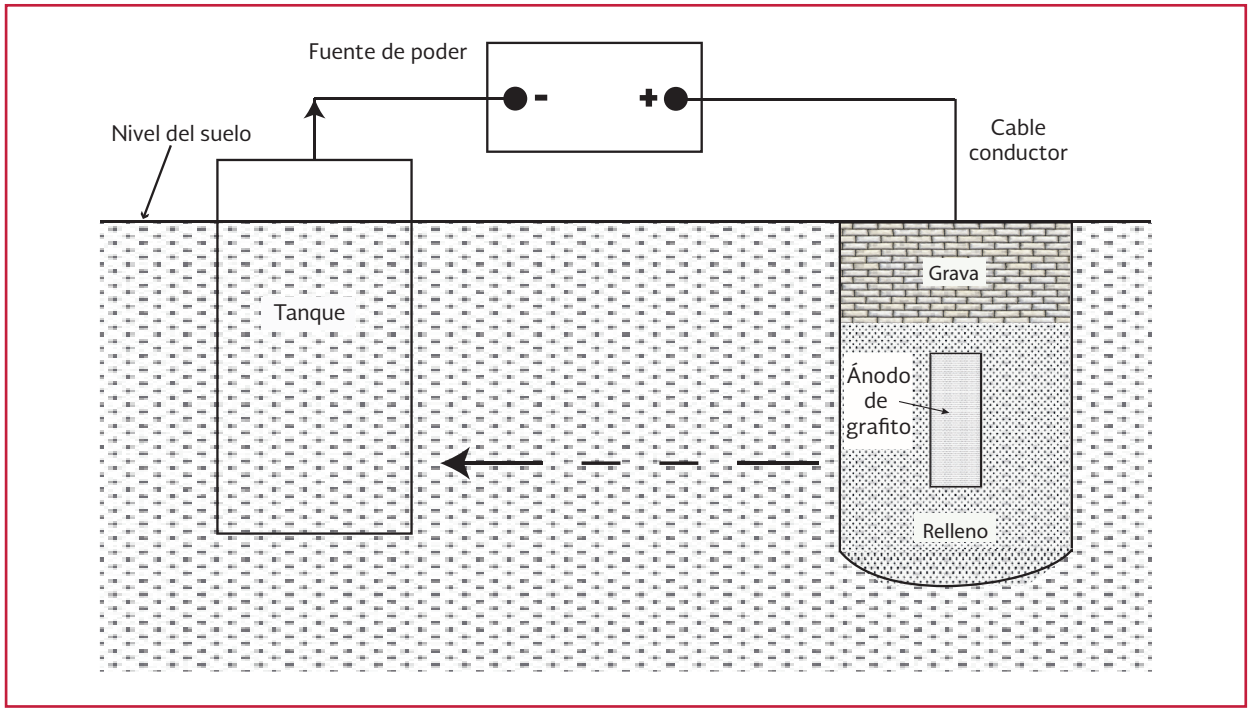


Tabla 5.5 Tipos de ánodo

Material	Aplicaciones típicas	Perdida típica lb/Amp-año
Chatarra de acero	Suelo, agua fresca y agua de mar	2.00
Aluminio	Suelo, agua fresca y agua de mar	10.0-12.0
Grafito	Suelo y agua fresca	0.25-5.00
Ferrosilicio y hierro silicio-cromo	Suelo, agua fresca y agua de mar	0.25-00
Plomo	Agua de mar	0.10-0.25

Si el sistema de agua que administra la tubería enterrada, que está siendo dañada, decide aplicar a la misma una protección catódica, se entraría a un círculo vicioso, con un escalonamiento de las corrientes parásitas. La solución a este problema se representa en la Ilustración 5.11. Se conecta el tanque a la tubería por medio de un conductor eléctrico bien aislado, el cual llevará la corriente de regreso a la fuente de energía. En esta forma, se eliminan los problemas de corrosión y se ahorra la adquisición de un equipo extra de protección catódica.

Ventajas del sistema por corriente impresa

- Es posible manejar grandes voltajes (mayores que en el método de ánodos galvánicos)
- Se dispone de niveles de corriente mayores (virtualmente ilimitados)
- El sistema es apropiado para suelos de alta resistividad

Se pueden proteger grandes estructuras y líneas de tubería largas.

Desventajas del sistema por corriente impresa

- Los costos de instalación son mayores que para el sistema de ánodos galvánicos
- El mantenimiento y los costos de operación son mayores que para el sistema de ánodos galvánicos
- Existe el peligro de daño por corrientes parásitas a otras estructuras

Criterio para su aplicación y selección

a) En muchos casos, no sería factible, ni económico, ni técnicamente posible instalar suficiente material de ánodo galvánico para proporcionar la corriente necesaria. Cuando esto ocurre, se utiliza el sistema de protección catódica por corriente impresa
b) El sistema por corriente impresa se usa para proteger grandes estructuras o líneas de tubería de longitudes muy grandes
c) La corrosión por corrientes parásitas, es el riesgo mayor del sistema de corriente impresa, el problema puede evitarse uniendo eléctricamente la estructura extraña a la estructura protegida, ver Ilustración 5.9

5.1.3 Protección catódica combinada con recubrimientos

La distribución de corriente en un tanque de acero para almacenar agua que ha sido protegido catódicamente no es la ideal, ya que puede fluir demasiada corriente hacia los lados y casi nada hacia el fondo o la tapa. Una mejor distribución de la corriente se logra aplicando al tanque un recubrimiento aislante, por ejemplo: un recubrimiento orgánico a temperatura ambiente o un

recubrimiento inorgánico a temperaturas elevadas (metalizados). El recubrimiento aislante no necesita estar libre de porosidad, ya que la corriente fluye preferentemente hacia las áreas expuestas del metal donde quiera que estén localizadas, y que son precisamente las que necesitan protección.

Los recubrimientos bien adheridos, además de proteger a las superficies como una barrera impermeable, contribuyen a distribuir perfectamente la corriente protectora y a reducir las necesidades totales de corriente. Como la corriente total requerida es menor para un tanque recubierto que para uno sin recubrir, el ánodo galvánico es más pequeño.

En la práctica, se acostumbra usar un recubrimiento aislante, con la aplicación de protección catódica, usando corriente impresa o ánodos galvánicos, ya que la distribución de corriente en una línea de tubería recubierta, es controlada mejor que en una línea de tubería desnuda; la corriente total y el número de ánodos requeridos son menores y la longitud total de tubería protegida por un solo ánodo es mucho mayor. Un ánodo de magnesio puede proteger tanto como 8 kilómetros de una línea de tubería recubierta, mientras que para una línea desprotegida, la distancia correspondiente podría ser de solo treinta metros. Usando una corriente impresa a voltajes más elevados, un ánodo podría proteger hasta 80 kilómetros de una línea de tubería recubierta.

El límite de la longitud de tubería protegida por un ánodo no está condicionado por la resistividad del suelo, sino, por la resistencia mecánica de la misma línea.

5.2. Recubrimientos anticorrosivos

5.2.1 Norma de recubrimientos

A continuación se mencionan algunas normas de recubrimientos actuales para la tubería de acero para agua que se cree que son los más confiables. La lista muestra su aplicación, alcances y limitaciones, rendimientos ya sea en planta, en campo o con proveedor:

AWWA C203, Standard for Coal-Tar Protective Coatings and Linings for Steel Water Pipelines—Enamel and Tape—Hot-Applied. AWWA C203 (última edición)

Describe las necesidades de material y de aplicaciones para proveedor de los revestimientos protectores de alquitrán de hulla y revestimientos para tuberías de agua de acero destinados a ser utilizados en condiciones normales. La norma describe el esmalte de alquitrán de hulla aplicado al exterior e interior de la tubería, secciones especiales, conexiones y accesorios. También cubre el alquitrán de hulla con aplicación en caliente para exteriores de las secciones especiales, conexiones y accesorios.

Internamente, el esmalte de alquitrán de hulla se utiliza sin refuerzo o blindaje. El esmalte caliente se hace girar en el tubo y proporciona un forro suave intrerno que tiene una baja resistencia a la fricción hidráulica.

La norma proporciona una guía rígida del fabricante pero razonable para la producción del revestimiento; requiere pruebas de material y su comportamiento para garantizar al comprador

que el producto tiene las cualidades deseadas; y proporciona instrucciones para la aplicación efectiva del revestimiento.

AWWA C205, Standard for Cement-Mortar Protective Lining and Coating for Steel Water Pipe—4 In. (100 mm) and Larger—Shop Applied

La AWWA C205 (última edición) describe las necesidades de material y de aplicaciones para proporcionar revestimientos protectores y recubrimientos para la tubería de agua de acero mediante la aplicación para proveedor de mortero de cemento.

El Mortero de cemento se compone de cemento Portland, arena y agua bien mezclado y de la consistencia adecuada para obtener densidad homogénea del recubrimiento o forro. Internamente el mortero de cemento se compacta por centrifugación para eliminar el exceso de agua y producir una superficie lisa y uniforme. Externamente el recubrimiento es un mortero de cemento armado, y se aplica neumáticamente o mecánicamente a la superficie de la tubería. El refuerzo consiste en alambre espiral, tela de alambre, malla o cinta. La norma proporciona una guía completa para la aplicación y el curado del revestimiento de mortero y forro de mortero. El mortero de cemento también puede ser usado como un escudo de roca para tubería flexible revestida.

AWWA C209, Standard for Cold-Applied Tape Coatings for the Exterior of Special Sections, Connections, and Fittings for Steel Water Pipelines

La AWWA C209 (última edición) describe el uso de un primario frío y aplicación de espesor en frio en el exterior de las secciones especiales, conexiones y accesorios para tuberías de agua de acero instalados bajo tierra en cualquier suelo en condiciones normales o promedio. Las capas para cloruro de polivinilo y polietileno de respaldo se enumeran. Los espesores de las capas varían; sin embargo, todas las capas pueden ser suficientemente superpuestas para satisfacer las cambiantes necesidades de rendimiento. Las capas de aplicación en frío proporcionan facilidad en su montaje sin el uso de equipo especial y se pueden aplicar en un amplio intervalo de temperaturas. Si existen condiciones severas de construcción o del suelo, donde se puede producir daño mecánico, puede ser necesaria una envoltura adecuada de un espesor extra de la capa u otra envoltura.

AWWA C210, Standard for Liquid Epoxy Coating Systems for the Interior and Exterior of Steel Water Pipelines

La AWWA C210 (última edición) describe un sistema de recubrimiento de líquidos epoxi, apto para el servicio de agua potable, que proporcionará protección contra la corrosión a las secciones interiores y exteriores de la tubería de agua de acero, accesorios y piezas especiales instalados bajo tierra o bajo el agua.

El sistema de recubrimiento consiste en una capa de dos partes químicas; curado de impresión epoxi inhibidora y una o más capas de un curado de acabado epoxi en dos partes. La capa de acabado puede ser un recubrimiento epoxi de alquitrán de hulla, o puede ser una capa de epoxi que no contiene alquitrán de hulla. El sistema de recubrimiento puede alternativamente consistir en una o más capas de epoxi sin el uso de un cebador separado, siempre que el sistema de recubrimiento cumpla los requisitos de rendimiento de AWWA C210.

AWWA C213, Standard for Fusion-Bonded Epoxy Coating for the Interior and Exterior of Steel Water Pipelines

La AWWA C213 (última edición) describe las necesidades de material y de aplicaciones para epoxi adherido por fusión de recubrimientos protectores para el inferior y el exterior de la tubería de agua de acero, secciones especiales, uniones soldadas, conexiones y accesorios de tuberías de agua de acero instalado bajo tierra o bajo el agua bajo condiciones normales de construcción. Los revestimientos epoxi adherido por fusión son sistemas de curados químicamente activados por calor. Los recubrimientos epoxi se suministran en forma de polvo. A excepción de las juntas soldadas, la aplicación puede ser en planta o por proveedor al tubo, secciones especiales, conexiones y accesorios con aire o pulverización electrostática.

AWWA C214, Standard for Tape Coating Systems for the Exterior of Steel Water Pipelines

La AWWA C214 (última edición) describe los materiales, los sistemas, los requisitos y aplicación para capas en frío prefabricadas para el exterior de todos los diámetros de tubería de agua de acero instalados mecánicamente. Para condiciones normales de construcción, las capas aplicadas en frío prefabricadas se aplican como un sistema de tres capas que consiste en:

1. Primario
2. La capa preventiva contra la corrosión (capa interna)
3. La capa de protección mecánica (capa externa)

El primario se suministra en forma líquida que consta de ingredientes sólidos transportados en un disolvente.

La cinta preventiva a la corrosión y la cinta de protección mecánica se suministran en espesores adecuados y en forma de rollo. La norma describe la aplicación para plantas de revestimiento.

AWWA C215, Standard for Extruded Polyolefin Coatings for the Exterior of Steel Water Pipelines

La AWWA C215 (última edición) describe los materiales, sistemas, requisitos y aplicación de los revestimientos para proveedor de poliolefina extruidos en el exterior de la tubería de agua de acero de hasta 120-in. (3 048 mm) de diámetro. La norma describe dos tipos de extrusión: cruceta y lateral y tres tipos de aplicaciones, como sigue:

a) Tipo A - Matiz de cruceta de extrusión, que consta de un adhesivo y una envoltura de poliolefina extruido para diámetros de tubo de ½ hasta 36 pulg (13 - 914 mm)
b) Tipo B - Extrusión lateral, que consiste en un adhesivo extruido y una vaina de poliolefina extruido para diámetros de tubo de 2 hasta 120 pulgadas (51 hasta 3 048 mm)
c) Tipo C - Capa y extrusión lateral, que consiste en una capa primaria/capa interna y una envoltura de poliolefina extruida para espiral y tubería soldada longitudinal con diámetros de tubo de 4 hasta 120 pulg. (100 hasta 3050 mm)

AWWA C216, Standard for Heat-Shrinkable Cross-Linked Polyolefin Coatings for the Exterior of Special Sections, Connections, and Fittings for Steel Water Pipelines

La AWWA C216 (última edición) establece los requisitos mínimos para los revestimientos ex-

teriores de protección que consisten en capas de poliolefinas reticuladas termocontraíbles y su aplicación a las secciones especiales, conexiones y accesorios que se utilizarán en las tuberías de agua de acero subterráneas y submarinas. Estos recubrimientos pueden ser aplicados por proveedor de conformidad con las disposiciones de la norma.

AWWA C217, Standard for Cold-Applied Petrolatum Tape and Petroleum Wax Tape Coatings for the Exterior of Special Sections, Connections, and Fittings for Buried Steel Water Pipelines

La AWWA C217 (última edición) describe revestimientos de capas exteriores que se componen de vaselina o cera de petróleo con aplicación de primario en frío y recubrimientos de vaselina o cera de petróleo en capas saturante y sus aplicaciones a secciones especiales, conexiones y accesorios que se utilizarán con las tuberías de agua de acero enterradas o sumergidas. Tales primarios y capas no están diseñados para su uso con las articulaciones o secciones de tubo de acero, donde los revestimientos de mortero de cemento o concreto han sido aplicados directamente sobre la tubería de acero desnudo.

AWWA C218, Standard for Coating the Exterior of Aboveground Steel Water Pipelines and Fittings

La AWWA C218 (última edición) describe varios sistemas de recubrimiento alternativa para la protección de las superficies exteriores de las tuberías de acero y accesorios correspondientes utilizados por la industria del suministro de agua en lugares por encima del suelo.

Los sistemas de recubrimiento descritos no son necesariamente equivalentes en términos de costo o rendimiento, pero se presentan de manera que el comprador puede seleccionar el sistema de recubrimiento que mejor cumpla los requisitos del proyecto específicos del sitio. Los sistemas de recubrimiento incluidos son: 1-91, un sistema de tres capas alquídicas; 2 - 91, un sistema cuatro capas alquídicas; 3-91, un sistema de tres capas alquídica/silicona alquídica; 4-91, un sistema de tres capas epoxi / uretano; 5-91, un sistema de tres capas inorgánico de zinc / epoxi / uretano; 6-91, un sistema de dos o tres capa epoxi / alquitrán de hulla epoxi; 7 a 91, un sistema de dos o tres-capa epoxi-poliamida reducible con agua ; 8 a 91, un sistema de tres capas de acrílico reducible con agua o emulsión acrílica modificada alquídica; y 9-95, un sistema de dos o tres capas de epoxi / alta construcción poliuretano alifático sobre el revestimiento de sustratos existentes.

AWWA C222, Standard for Polyurethane Coatings for the Interior and Exterior of Steel Water Pipe and Fittings

La AWWA C222 (última edición) describe los materiales y los procesos de aplicación para proveedor y en campo de poliuretano en recubrimientos inferiores y exteriores para tubería de agua de acero, secciones especiales, uniones soldadas, conexiones y accesorios instalados bajo tierra o bajo el agua.

AWWA C224, Standard for Two-Layer Nylon-11-Based Polyamid Coating System for the Interior and Exterior of Steel Water Pipe, Connections, Fittings, and Special Sections

La AWWA C224 (última edición) describe los sistemas de recubrimiento de dos capas de poliamida (basado Nylon-11-) instalados en los equipos de manejo de agua potable instalado

sobre el suelo, bajo el suelo o bajo el agua. Los sistemas de revestimientos de poliamida son termoplásticos y se aplican normalmente con los porveedores o en planta.

AWWA C225, Standard for Fused Polyolefin Coating Systems for the Exterior of Steel Water Pipelines

La AWWA C225 (última edición) describe los materiales y la aplicación de sistemas de recubrimiento de poliolefina fundida para servicio enterrado. Este sistema se aplica en planta, normalmente estos revestimientos prefabricados de poliolefina se aplican como un sistema de tres capas, que consta de un adhesivo líquido, una capa interna de protección contra la corrosión, y una capa externa de protección mecánica.

AWWA C602, Standard for Cement-Mortar Lining of Water Pipelines 4 In. (100 mm) and Larger In Place

La AWWA C602 (última edición) describe los materiales y procesos de aplicación para el revestimiento de mortero de cemento de tuberías en el lugar, describiendo ambas nuevas instalaciones de tubería y tuberías veijas. Se incluyen procedimientos detallados para la preparación de la superficie y aplicación, acabado de superficie, y el curado del mortero de cemento.

5.2.2 Tipo de recubrimientos

El control de la corrosión a base de recubrimientos anticorrosivos, mediante la creación de una barrera entre un metal y su medio ambiente, conocido como electrólito, es uno de los métodos más ampliamente usados por su gran versatilidad y fácil aplicación.

La efectividad de un recubrimiento depende de su grado de integración (que esté libre de poros o picaduras), de su facilidad para adherirse al metal base y de su propiedad para aislarse contra el flujo de corriente eléctrica. El material de recubrimiento también debe ser económicamente factible, ver Ilustración 5.13.

Los recubrimientos anticorrosivos pueden clasificarse atendiendo a su naturaleza, de la siguiente manera:

- Recubrimientos metálicos
- Recubrimientos no metálicos
- Recubrimientos líquidos

5.2.2.1. Recubrimientos metálicos

La mayoría de los recubrimientos metálicos se aplican por inmersión en caliente o por electrodeposición. También pueden aplicarse por aspersión, cementación y algunas veces por reacción en fase gaseosa en menor escala.

Los recubrimientos metálicos que se preparan comercialmente presentan cierto grado de porosidad y tienden a dañarse durante el embarque, al igual que los recubrimientos convencionales. Desde el punto de vista de la corrosión, los recubrimientos se clasifican en dos tipos: nobles y de sacrificio.

Los recubrimientos llamados nobles, emplean métales como níquel, plata, cobre, plomo o cromo, que son nobles en la serie galvánica con respecto a la base metálica. Para los recubrimientos de sacrificio, se emplean los metales como el zinc y cadmio, y en ciertos ambientes, aluminio y estaño.

Ilustración 5.13 Recubrimiento anticorrosivo en tubería de agua



5.2.2.2. Recubrimientos no metálicos

Entre los recubrimientos no metálicos que pueden emplearse en las redes de conducción, distribución y almacenamiento de agua potable, se puede mencionar a los siguientes:

Plásticos, hules naturales y sintéticos, cerámica, barro, porcelana, vidrio, concreto, carbono, grafito y madera, ver Ilustración 5.14.

5.2.2.3. Recubrimientos líquidos

Los recubrimientos líquidos, también llamados pinturas, representan una de las formas más versátiles para el control de la corrosión, debido a su gran facilidad de manejo y bajo costo. Por esta razón en este apartado, se incluye la metodología completa de la protección anticorrosiva con pinturas o recubrimientos líquidos, ver Ilustración 5.15.

Definición y composición

En términos generales un recubrimiento anticorrosivo puede definirse como una dispersión relativamente estable de uno o más pigmentos finamente divididos en una solución probada, tal que al ser aplicada la película y estar seca ésta, representa una barrera flexible, adherente y con la máxima eficiencia de protección contra la corrosión.

Estos componentes se mezclan íntimamente en un orden adecuado, claramente definido en la formulación y a través de métodos específicos para obtener el producto terminado.

La eficiencia de protección contra la corrosión y el buen comportamiento de un recubrimiento dependen, además de su buena calidad, de otros factores igualmente importantes tales como: la preparación de la superficie, la técnica de apli-

Ilustración 5.14 Recubrimiento de plástico



cación y de una adecuada selección del sistema de recubrimiento que va a ser aplicado, en base a la naturaleza del medio corrosivo.

A la fecha se han desarrollado una gran diversidad de recubrimientos cuya formulación o composición obedece a la resolución de un problema específico. Enunciar todos y cada uno de los recubrimientos existentes resulta impráctico, por lo que se resumirá la descripción de los recubrimientos de más uso en los sistemas de servicio para agua.

Propiedades generales

Los recubrimientos se usaron en los primeros intentos para el control de la corrosión por ejemplo, se usó alquitrán de hulla para recubrir tuberías de acero y de hierro fundido y pinturas para preservar estructuras de madera de una manera un tanto empírica, sin el conocimiento adecuado del problema específico que se presentaba. En la actualidad, aún con la gran cantidad de materiales de recubrimiento disponibles, y con los amplios desarrollos tecnológicos sobre el problema de la corrosión, es necesario hacer notar que el recubrimiento perfecto no existe.

No obstante que el uso de recubrimientos reduce substancialmente la corrosión en estructuras de sistemas para agua potable, el usuario debe estar consciente de la posibilidad de algunos defectos:

Ilustración 5.15 Recubrimiento por pintura



- Los recubrimientos aplicados en fábrica o taller se pueden dañar durante el embarque, el manejo, el embalaje o la construcción. Regularmente es posible reparar los recubrimientos en el campo
- Si existen huecos o picaduras en un recubrimiento orgánico ligado a un ambiente corrosivo, se puede desarrollar una celda de concentración que socavará al recubrimiento y causará una corrosión similar a la corrosión por hendidura
- Si un metal unido con un recubrimiento de tipo orgánico está bajo protección catódica, la corriente excesiva puede causar desprendimiento del recubrimiento

Por estas razones y como protección adicional, generalmente se acepta que los recubrimientos orgánicos ligados a los ambientes corrosivos se deben complementar con protección catódica.

En estos casos, las propiedades de los recubrimientos y de los sistemas de protección catódica son sinergísticos: los recubrimientos reducen en mucho los costos de los sistemas de protección catódica, mientras que la protección catódica extiende substancialmente la vida útil del recubrimiento. En la mayoría de los casos, los resultados son bajos costos de mantenimiento en el ciclo de vida de la infraestructura o instalaciones.

Propiedades específicas

En los siguientes párrafos se describen algunos de los materiales de recubrimiento usados comúnmente. Esta lista no incluye a todos los recubrimientos existentes, pero sí a los de mayor uso en sistemas para suministro de agua. Cabe aclarar que se han usado otros materiales y en el futuro se pueden desarrollar algunos más.

Asfalto

El ingrediente predominante del recubrimiento de asfalto es el bitumen. La mayor parte del asfalto es un destilado del petróleo; sin embargo, los asfaltos naturales como la gilsonita se usa algunas veces en combinación con asfaltos del petróleo, para resaltar algunas propiedades físicas. El empleo del asfalto como recubrimiento predominó hasta hace algunos años, y disminuyó con la aparición de nuevos productos más versátiles y con menos dificultades de manejo.

Alquitrán de hulla-epóxico y alquitrán de hulla-uretano

Los recubrimientos de alquitrán de hulla epóxico y uretano son una combinación de alquitrán de hulla y químicos, que producen un incremento sustancial en las cualidades de dureza, resistencia al intemperismo, envejecimiento y resistencia eléctrica. Estos materiales funcionan de manera excelente como recubrimientos anticorrosivos externos.

Alquitrán de hulla (termoplástico)

El ingrediente básico de los recubrimientos de alquitrán de hulla es la brea del alquitrán de hulla. Se dispone de recubrimientos aplicados en caliente o en frío. El alquitrán de hulla es un material de recubrimiento efectivo cuando se aplica correctamente y con un espesor adecuado. En la mayoría de las aplicaciones, se recomienda el uso de refuerzos mecánicos entre capas. Para una mejor comprensión de las características y propiedades de este tipo de productos se recomienda leer la norma AWWA C210-07.

Mortero de concreto y cemento

Los morteros de cemento y concreto se usan efectivamente para el recubrimiento de tanques y tuberías. El concreto tiene la ventaja de un menor agrietamiento al curarse con exposiciones en agua.

Resinas epóxicas

Se dispone de una amplia gama de resinas epóxicas para recubrimientos, con una gran variedad de propiedades físicas, dependiendo de la formulación. En general, forman recubrimientos continuos y funcionales que ofrecen buena resistencia a los álcalis, sales, aceites, a la abrasión, al intemperismo y el envejecimiento y tienen alta capacidad de aislamiento eléctrico.

La adhesión es buena en el metal y en el concreto. Los epóxicos de altos sólidos han sido especialmente útiles en la protección del equipamiento de las plantas de tratamiento de agua y pozos. El tipo de recubrimiento epóxico empleado en operaciones de protección anticorrosiva, es el denominado epóxico catalizado, el cual se surte en dos envases separados, uno de los cuales contiene la resina epóxica y el otro al agente curante.

El contenido de los dos envases se mezcla perfectamente en el momento mismo de su aplicación.

El agente de curado por entrecruzamiento, denominado erróneamente catalizador, está cons-

tituido por una solución de resinas amínicas o poliamídicas, lo que significa que los productos pueden diferir grandemente entre sí; sin embargo, sus propiedades físicas lo ubican dentro de un área general.

En términos generales, el nivel de adherencia, dureza, flexibilidad y resistencia a la mayoría de los medios corrosivos de los recubrimientos epóxicos no es superado por ningún otro tipo de los recubrimientos existentes.

Por su alto grado de impermeabilidad (permanecen inalterables a la exposición e inmersión en agua dulce, salada y vapor de agua) los recubrimientos epóxicos representan el mayor porcentaje en uso dentro de la industria del agua.

Fluorocarbonos

Son usados frecuentemente como recubrimientos de película delgada; los fluorocarbonos ofrecen resistencia al cloro, bromo y lodo, pero en las exposiciones prolongadas pueden ser vulnerables al flúor. Pueden utilizarse en exposiciones atmosféricas, en plantas de tratamiento de agua, donde el cloro libre está presente. Las aplicaciones de este tipo de recubrimientos requieren destreza y experiencia y el costo es elevado.

Vidrio (cerámica)

Los recubrimientos de vidrio aplicados correctamente, ofrecen excelente servicio en exposiciones con agua. El recubrimiento con vidrio, es un procedimiento de fábrica que requiere de temperaturas muy altas del metal que se recubre. La temperatura es tan alta, que se debe tener cuidado en no alterar las propiedades metalúrgicas del metal o la aleación. Los recubrimientos de vidrio son caros, pero pueden justificar su costo para aplicaciones especiales.

Recubrimientos metálicos

El zinc, níquel, estaño y cadmio son ejemplos de recubrimientos metálicos de uso generalizado en sistemas de manejo y distribución de agua. Con la excepción del zinc y del cadmio, que son metales de sacrificio, su función primordial es servir como barreras físicas entre el metal protegido y el medio ambiente y a diferencia de los recubrimientos orgánicos, no actúan como dieléctricos.

Los recubrimientos metálicos se aplican por electrodepositación o electroplástica, flama rociadora, inmersión en caliente o deposición con vapor. La tubería galvanizada (recubierta de zinc), se usa ampliamente en sistemas de agua, especialmente en redes de servicio de agua caseras. Si se desarrolla una celda de corrosión en una tubería galvanizada, el zinc, debido a su posición en la serie galvánica, se hace anódico y tiende a crear condiciones catódicas (no corrosivas) en el sitio de ataque. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que la protección proporcionada, es en el mejor de los casos a corto plazo.

Poliésteres

Aun cuando los poliésteres son materiales resistentes a muchos agentes químicos y a la humedad, deben usarse regularmente con un refuerzo mecánico, debido a su naturaleza frágil. La adherencia a los metales no es buena, a menos que la superficie metálica sea tratada con chorro de abrasivo o decapada con ácidos. Los recubrimientos de poliéster no tienen la expectativa de encontrar aplicaciones importantes en el campo del abastecimiento de agua.

Alquidálicos

Son recubrimientos económicos, los cuales en los últimos 30 años se han convertido en el "caballito de batalla", de los recubrimientos para conservación o mantenimiento industrial en condiciones de exposición normales, ya que su durabilidad es buena en exposiciones de intemperismo moderado. Estos recubrimientos tienen buena retención del brillo, buena resistencia a medios ambientes secos o húmedos sin salinidad o gases corrosivos, presentan buena adherencia y poder humectante, por lo que pueden tolerar cierto grado de impurezas sobre la superficie donde van a ser aplicados, que por lo general es preparada por limpieza manual o limpieza con herramientas mecánicas o neumáticas. Los recubrimientos secan por evaporación de disolventes e interacción con el aire (oxidación).

Los recubrimientos alquidálicos no se recomiendan para inmersión continua, su resistencia química es pobre y especialmente mala en condiciones alcalinas, ante las cuales se saponifica y destruye. No resisten los productos alcalinos de la corrosión, por lo que una vez iniciada la corrosión interpelicular, disminuye su adherencia. Por éstas razones no se recomienda la aplicación de un recubrimiento alquidálico sobre concreto, acero galvanizado o recubrimientos inorgánicos ricos en zinc. Tampoco se recomienda para exposiciones superiores a los 60 a 65 grados centígrados.

La industria del agua emplea los recubrimientos alquidálicos en gran escala para aplicaciones sobre superficies externas con todo y las limitaciones ya mencionadas.

Vinílicos

Estos productos están hechos a base de resinas que son copolímeros de cloruro y acetato de vinilo. Son recubrimientos no tóxicos y durables, superando a los recubrimientos alquidálicos en conservación del brillo y en duración. Son muy resistentes a la abrasión y a la inmersión continua en agua dulce o salada, resisten soluciones diluidas de la mayor parte de los ácidos orgánicos e inorgánicos, incluyendo los ácidos clorhídrico, nítrico, fosfórico, cítrico, entre otros, no se afectan con los derivados del petróleo, tales como gasolina, diésel, petróleo crudo, por mencionar algunos. A temperatura ambiente resisten soluciones de hidróxido de sodio hasta el 40 por ciento, carbonato de sodio, hidróxido de calcio y amoniaco hasta el 10 por ciento.

Los recubrimientos vinílicos proporcionan una superficie que va desde mate (sin brillo) hasta semi brillante, con una alta resistencia a la intemperie, aún en condiciones altamente húmedas y corrosivas. Como su resistencia al agua es excelente, pueden usarse para servicio de inmersión continua en agua (interior de tuberías y tanques de almacenamiento).

Las resinas vinílicas de base solvente, son termoplásticas y se descomponen a temperaturas elevadas, por lo que se recomienda que la máxima temperatura de exposición de este tipo de recubrimientos sea de 65 grados centígrados para servicio permanente. La película de estos materiales seca por evaporación de disolventes, y como su secado es rápido, se recomienda aplicarlos por aspersión.

Hule colorado

Los recubrimientos de este tipo tienen como base resinas que se obtienen por cloración del hule natural. Estas resinas proporcionan una película inerte, transparente y resistente a las bacterias; modificadas con plastificantes clorados, y proporcionan recubrimientos impermeables y resistentes a los ataques corrosivos en casi todos los medios de exposición. Por su alta impermeabilidad se recomiendan para aplicarse en el interior de líneas de conducción de agua potable y tanques de almacenamiento. Debido a su secado rápido, se recomienda aplicarlos por aspersión convencional.

Fenólicos

Son recubrimientos duros, brillantes y muy adherentes; en términos generales su resistencia a los disolventes, medios ácidos y alcalinos va de buena a excelente, por lo que se recomiendan para inmersiones continuas. Su eficiencia de protección contra la corrosión es superior a la de los epóxicos.

Este tipo de recubrimientos se recomienda para estar en contacto con medios ácidos a bajas concentraciones y con medios básicos hasta muy altas concentraciones. Su estabilidad al calor, dureza y resistencia a la abrasión son excelentes. Su uso en sistemas de agua ha estado muy limitado debido a la falta de conocimiento sobre las propiedades de este tipo de productos.

Silicón

Este tipo de recubrimientos es especial, y su aplicación está reservada para situaciones donde se requiere una alta estabilidad térmica hasta de 850 grados centígrados, la película de recubrimiento es muy resistente a la intemperie y atmósferas contaminadas.

Las resinas de silicón empleadas en este tipo de recubrimientos se han desarrollado debido al interés en encontrar productos intermedios, con propiedades mecánicas y de resistencia al calor entre el vidrio y las resinas orgánicas.

Acrílicos

Son productos que secan por simple evaporación de disolventes. Poseen una muy buena retención del brillo y el color y una excelente resistencia al caleo, no se recomiendan para exposiciones en atmósferas industriales, donde se produzcan salpicaduras y derrames de compuestos industriales como ácidos, álcalis, agentes oxidantes y disolventes. Tampoco se recomiendan para inmersión en agua.

Su resistencia a la abrasión es buena, al igual que su dureza, su estabilidad al calor es limitada, pero mejor que la de los alquidálicos. Estos productos pueden usarse sin problemas en ambientes húmedos y lluviosos. Su aplicación en sistemas de agua se recomienda para exteriores únicamente.

Recubrimientos orgánicos ricos en zinc

Están constituidos por un pigmento y un vehículo. Son ricos en pigmento, específicamente polvo de zinc y pobres en vehículo, el cual puede ser del tipo epoxi, fenoxi, acrílico o hule clorado. Las películas finales de estos recubrimientos contienen carbón, por lo que se queman y destruyen por combustión.

Entre las ventajas de estos recubrimientos se puede mencionar su gran facilidad de aplicación y su rápido acabado; sus necesidades de preparación de superficie no son tan críticas como en el caso de los inorgánicos ricos en zinc.

Recubrimientos inorgánicos ricos en zinc

La película ya curada no contiene carbón, por lo que no se quema o destruye por combustión, al igual que los anteriores, estos recubrimientos son ricos en pigmento (zinc) y pobres en vehículo, que puede ser del tipo alquil silicato y álcali silicato. Entre sus ventajas se puede mencionar su gran resistencia a la temperatura, hasta un límite de 400°C, su gran resistencia a la abrasión y a la mayoría de los disolventes, lo que les permite ser usados como recubrimiento interior en tanques de almacenamiento de disolventes.

Sus desventajas más notables consideran su tendencia a producir brisado (*dry spray*), su gran sensibilidad a las condiciones atmosféricas durante la aplicación, su necesidad de una mejor preparación de superficie, que la de los recubrimientos orgánicos y que son más difíciles de recubrir con los acabados subsecuentes.

Los recubrimientos formulados con alquil silicatos curan por reacción con el agua (hidrólisis) , curan muy lentamente en condiciones de baja humedad (abajo de 50 por ciento), resisten la lluvia después de 15 min. de aplicados. Los formados con álcali silicatos son básicamente de dos tipos: uno de ellos es de base acuosa, autocurante, no inflamable, y el otro también es base acuosa que cura por la aplicación sobre la película, una vez aplicada una solución o agente curante y que se denomina postcurado. De los dos tipos de recubrimiento mencionados, los 100 por ciento inorgánicos son los más versátiles y consecuentemente los más usados.

En cierta forma estos recubrimientos se consideran una especie de galvanizado en frío, en el cual la película se forma por la aplicación de una mezcla homogénea de polvo de zinc y una solución acuosa de silicato orgánico o inorgánico. La eliminación de agua y disolvente junto con la interacción de los componentes antes mencionados permite obtener una película de silicato de zinc con oclusiones de zinc en polvo, por lo que su naturaleza es finalmente inorgánica.

El mecanismo de protección de este tipo de recubrimientos difiere totalmente del correspondiente a los otros tipos de recubrimientos. En lugar de presentar una barrera impermeable al medio corrosivo, antepone a ésta una película de zinc con alta conductividad eléctrica, capaz de sacrificarse anódicamente para proteger al acero, es decir, lo protege a partir del principio del par galvánico.

Dado que el espesor recomendado de película y por tanto la cantidad de material disponible para el sacrificio es muy pequeña, 2.0 a 3.0 milésimas de pulgada, es necesario recubrirlo posteriormente con un adecuado recubrimiento de acabado, a fin de que la película de inorgánico de zinc, sólo actúe en presencia de posibles discontinuidades, grietas o raspaduras.

Estos revestimientos son únicos en cuanto a resistencia al agua salada y a disolventes orgánicos, son poco flexibles y muy adherentes. No se recomiendan para inmersiones en ácidos o álcalis. Los recubrimientos inorgánicos ricos en zinc se distribuyen en dos envases (vehículo y polvo), para el caso del tipo autocurante, y en tres envases (vehículo, polvo y solución curadora) para el postcurado.

Recubrimientos antivegetativos

Son recubrimientos desarrollados para prevenir el crecimiento de organismos en superficies sumer-

gidas por largos períodos. En su formulación intervienen resinas vinílicas, brea y óxido cuproso o tóxico órganometálicos que permiten esta acción de inhibición.

Estos recubrimientos requieren de una formulación muy cuidadosa a fin de que el tóxico abandone el recubrimiento paulatinamente en cantidad suficiente para inhibir el crecimiento de organismos.

Recubrimiento de poliuretano

Estos recubrimientos poseen muchas cualidades deseables que pueden ser aprovechadas para mejorar las características de la protección anticorrosiva. Las resinas usadas para este tipo de recubrimientos, son por lo general poliésteres saturados de bajo índice de acidez y acrílicas hidroxiladas que se endurecen por la adición de un isocianato, en una proporción de mezcla adecuada a las características finales que se desean.

Estos recubrimientos pueden ser aplicados por cualquiera de los métodos usados regularmente para aplicar recubrimientos, esto es: brocha, rodillo, aspersión, inmersión, entre otros; secan y curan a temperatura ambiente, a una velocidad que depende del tipo de resina e isocianato usados; se estima que el secado al tacto se lleva a cabo en un periodo de 4 horas como máximo y el tiempo necesario para curar totalmente a temperatura ambiente es por lo general de 7 días. Su curado puede acelerarse con altas temperaturas, siendo las más comunes entre 100° C y 120° C, lo que permite obtener un curado completo en un tiempo de 30 a 60 minutos.

Otra de las ventajas de los acabados de poliuretano es su adaptación en comportamientos físicos a las condiciones de las superficies, por ejemplo: dureza y elasticidad. Por un lado se logra a través de la selección de los polisocianatos y por el otro, por medio de la selección de la combinación adecuada del componente que contiene los radicales hidroxilo (resina poliéster o acrílica).

Los recubrimientos de poliuretano poseen en general propiedades de resistencia excelentes a una amplia gama de productos químicos soluciones salinas, aceites vegetales y minerales y muchos disolventes. También resisten el ozono y poseen buenas características de resistencia de la abrasión y a temperaturas elevadas hasta de 175°C. Sus propiedades de retención de color y el brillo al ser expuestas a la luz solar o a la luz ultravioleta son superiores en comparación con otros recubrimientos.

Poliéteres

Los requisitos de aplicación limitan el uso de los poliéteres clorados en los sistemas de agua potable. La resina base es resistente al envejecimiento, abrasión, intemperismo y muchos agentes químicos. El material debe aplicarse a temperatura elevada y posteriormente templada en agua fría. No hay disolventes disponibles que permitan la aplicación a temperatura ambiente.

Polietileno

Existen en el mercado resinas de polietileno de baja y alta densidad. Aun cuando la resina base es más económica que otros materiales de recubrimiento, los procedimientos de aplicación y las limitantes en el servicio pueden compensar los costos más elevados de otros recubrimientos. En general, los mejores resultados se obtienen cuando la resina se aplica sobre un metal o aleación a temperaturas elevadas o con flama rociadora.

El recubrimiento final no es homogéneo, por eso, sus propiedades de resistencia no son precisas. Como se trató en la última sección, el polietileno también se usa como un material de envoltura para tuberías en ambientes de suelos corrosivos. Tanto su resistencia dieléctrica, como su resistencia al envejecimiento son excelentes.

Concretos poliméricos

Los polímeros de concreto proporcionan resistencia dieléctrica y alta resistencia a la penetración de los cloruros. La dureza de estos materiales se puede incrementar por la adición de fibras de vidrio.

Cloruro de polivinilo (PVC)

Los recubrimientos de cloruro de polivinilo son un grupo versátil de materiales que ofrecen buenas propiedades de resistencia mecánica y dieléctrica. Se aplican por inmersión, aspersión (rociado), cepillado o con rodillo, pero normalmente es necesario que el metal se limpie con chorro de arena y se le aplique un primario adecuado. El PVC también se usa para recubrimientos con cinta, los cuales ofrecen buena resistencia al envejecimiento y tienen buena resistencia dieléctrica.

5.2.3 Sistemas de recubrimiento

Los recubrimientos poseen una permeabilidad natural en menor o mayor grado, que permite el paso de una cantidad suficiente de agua y oxígeno, que ocasionan corrosión ininterrumpida de la superficie, por tal motivo y para efectos de protección anticorrosiva deben aplicarse a un espesor tal que la película seca nunca sea inferior a las seis milésimas de pulgada.

En principio puede pensarse en cubrir este espesor con una sola capa de un recubrimiento, que incluya un tipo de resina adecuado y un porcentaje determinado de pigmentos inhibidores, pero tomando en cuenta factores de tipo económico, se ha dado lugar a la utilización de diferentes formulaciones para cubrir el espesor antes mencionado. Dependiendo de su posición dentro de una serie de películas de recubrimiento aplicadas sobre un substrato, estas formulaciones se denominan respectivamente primario, enlace o intermedio y acabado o capa final.

Al conjunto de los tres tipos de recubrimiento se le conoce como sistema de recubrimiento. Una característica fundamental de los sistemas de recubrimiento es que todas las partes constitutivas del mismo posean buena adhesión al sustrato, para evitar que elementos como la humedad y el oxígeno penetren la película, desplacen a las moléculas del recubrimiento y provoquen herrumbramiento (oxidación) en la interfaz.

Al hablar de operaciones para protección anticorrosiva por aplicación de recubrimientos se debe hacer hincapié que no es conveniente comentar y mucho menos recomendar un recubrimiento como una unidad individual, sino que se debe siempre referir a un conjunto, conocido como sistema, del cual forma parte importantísima el grado de preparación de la superficie a recubrir. En general se puede comentar de dos tipos de sistemas de protección anticorrosiva por aplicación de recubrimientos:

5.2.3.1. Sistema convencional

Emplea recubrimientos de uso común, como pinturas aplicadas en su medio correcto. El tipo de sistema convencional constituye las aplicaciones más frecuentes, con todos sus inconvenientes. Por ejemplo: alquidálicas y alquidal acrílicas.

5.2.3.2. Sistema de alto rendimiento

Emplea recubrimientos de buena calidad, denominados de alto rendimiento, como son los hules clorados, epóxico, vinílicos, entre otros. Al examinar cada uno de los dos tipos de sistemas se puede observar que en el sistema convencional resulta más costosa la mano de obra que los materiales de recubrimiento, mientras que en los sistemas de alto rendimiento sucede exactamente lo contrario (ver Ilustración 5.16).

Considerando los incrementos sucedidos en los costos de los materiales de recubrimiento durante los últimos años (aproximadamente 102 por ciento), así como los altos salarios del personal especializado, se llega a la conclusión de que no es costeable abusar de la mano de obra o sea recubrir las superficies periódicamente. Esto se logra haciendo un esfuerzo inicial, con una inversión un poco mayor que la que se haría por el empleo de un sistema de protección con recubrimientos convencionales y emplear definitivamente recubrimientos más sofisticados, constituyendo un sistema de alto rendimiento.

Un sistema de recubrimiento de alto rendimiento está constituido por las siguientes partes:

- Método y grado de preparación de superficie
- Preparación de la superficie
- Primarios
- Intermedios o enlaces
- Acabados finales

Todos y cada uno de los puntos anteriores están íntimamente ligados unos con otros, y la correcta observancia de todos ellos permitirá obtener sistemas de recubrimiento óptimos.

Recubrimientos primarios

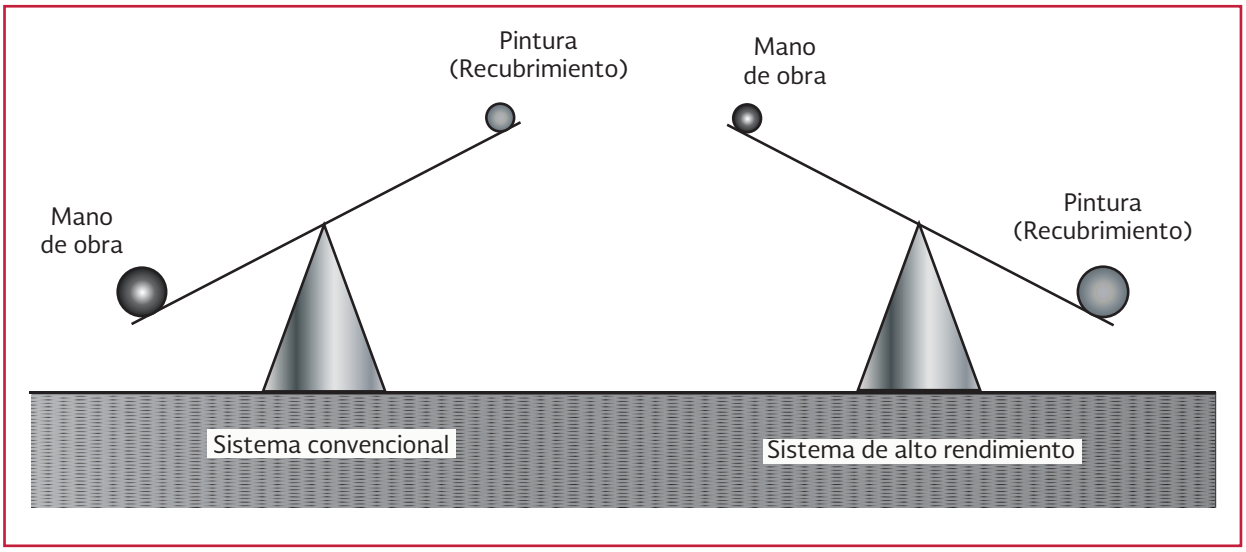
Las características básicas de todo recubrimiento para mantenimiento son entre otras, su facilidad de aplicación, buena adhesión, rapidez de secado, facilidad de reparación, buena durabilidad, buena resistencia química, buena resistencia a la luz solar, rayos ultravioleta y buena resistencia al intemperismo.

Como es perfectamente conocido, los primarios son recubrimientos que se aplican como primera mano sobre la superficie a ser recubierta. Son recubrimientos cuya formulación está constituida fundamentalmente con base en la preparación de la superficie, tipo de recubrimiento que será aplicado sobre él, medio de exposición a que va a estar sometido el sistema, y a consideraciones económicas.

Un buen primario que deba formar parte de un sistema de recubrimiento debe llenar los siguientes requisitos:

a) Inhibición de la corrosión. Capacidad de sofocar y retardar cualquier reacción de corrosión de la superficie expuesta; en las grietas, bordes o bajo la película continua del primario
b) Adherencia buena y uniforme. Capacidad de adherirse al metal en superficies preparadas, aun cuando la preparación en las mismas no sea la ideal, con cierto margen de tolerancia para impurezas, tales como escamas, herrumbre, sales, entre otros
c) Buena impermeabilidad y resistencia al agua, el oxígeno y los iones, para evitar en lo posible la corrosión bajo la película
d) Buena resistencia a la humedad y a la intemperie a fin de garantizar la protección

Ilustración 5.16 Representación gráfica de un sistema de recubrimiento convencional y de alto rendimiento



de la superficie, aún en el caso de que ésta tenga temporalmente sólo la capa o película del primario

e) Resistencia general a los agentes químicos, la cual debe ser semejante a la de los recubrimientos aplicados sobre él, a fin de que todo el sistema no sufra deterioro si se encuentra expuesto a ambientes químicos severos

Recubrimientos intermedios o enlaces

El término recubrimiento intermedio o enlace se refiere a aquellos materiales que se aplican entre el primario y el recubrimiento de acabado. En ciertos casos particulares no es posible tener el mismo tipo de resina en el primario y en el acabado, presentándose problemas de incompatibilidad o de adherencia, por lo que se requiere de una capa intermedia denominada enlace, capaz de adherirse perfectamente tanto al primario como al acabado.

Esto significa que un recubrimiento de enlace, debe también ser intermedio en sus propiedades, entre las deseadas para el primario y el acabado.

Los enlaces contienen una mezcla de resinas, parte de las cuales promueven la adherencia con el primario y el resto con el acabado. Generalmente, los pigmentos inhibidores están ausentes, aunque no necesariamente, sobre todo cuando el primario fue aplicado defectuosamente y quedan sobre la superficie rayones y poros o cráteres. También es indispensable la aplicación de un intermedio inhibidor de herrumbre, donde el primario es aplicado a un espesor muy bajo, lo que permite disminuir la permeabilidad hacia los agentes de la corrosión. Debe también pigmentarse adecuadamente para proveer resistencia a ciertos tipos de atmósferas, particularmente corrosivas.

El recubrimiento intermedio debe pigmentarse para contrastar en color con el primario y con el acabado y uno de los fines es poder identificarlos en el momento de la inspección. El costo de un intermedio o enlace es semejante al de un primario, de tal manera que en un sistema de tres capas, es preferible que las dos primeras sean de primario, para asegurar una máxima protección de la superficie, siempre y cuando no se presuman problemas de incompatibilidad o adherencia entre el primario y el acabado. El resultado de este proce-

dimiento es obtener una mayor adhesión por capa debido al mayor porcentaje de sólidos asociado con los recubrimientos primarios. Además, con este procedimiento se mantiene una mayor cantidad de pigmento inhibidor de herrumbre cerca de la superficie y cualquier imperfección accidental en una capa de primario es susceptible a ser cubierta fácilmente por la segunda capa.

El empleo de un recubrimiento intermedio o enlace, sólo debe ser recomendado cuando se anticipen posibles problemas de incompatibilidad o de adherencia de un primario y un acabado.

Recubrimientos de acabado

Estos productos representan la capa exterior en contacto con el medio ambiente y se formulan para proveer protección a las capas internas del sistema de recubrimiento.

Para proteger las capas primarias de recubrimiento y la superficie metálica, la capa final debe ser de baja permeabilidad y tener buena resistencia al medio ambiente. En este tipo de recubrimientos es frecuente el uso de pigmentos entonadores y el contenido de pigmentos inhibidores es inferior al de un primario. Donde el color es esencial, la selección de los pigmentos para las capas de acabado debe considerar el medio ambiente, al cual estarán expuestos.

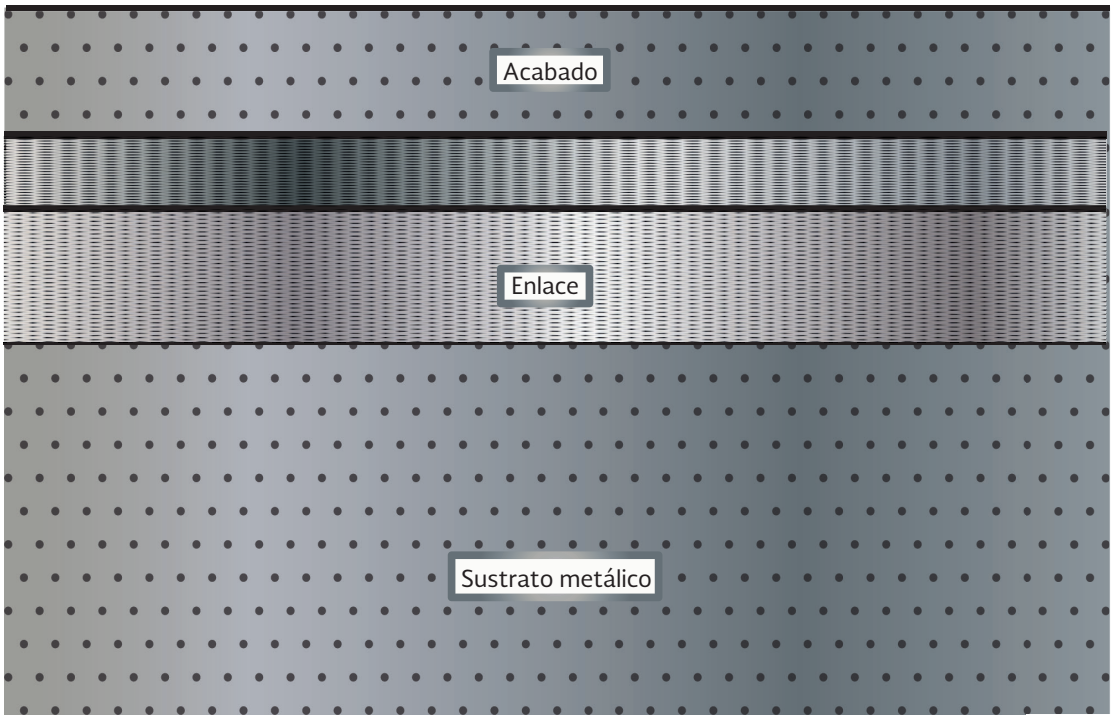
En la elección del tipo de acabado, es de capital importancia asegurar su total compatibilidad y adherencia con el tipo de primario utilizado; en términos generales, el uso del mismo tipo de resina en estos dos componentes del sistema, asegura una buena compatibilidad y adherencia, aun cuando hay casos como el de los recubrimientos epóxicos, capaces de lograr una adherencia, si no excelente, cuando menos aceptable sobre la mayoría de los otros recubrimientos.

Con fines de identificación y control de espesores, es conveniente que el primario, enlace y acabado en un sistema sean de diferente color y como se mencionó anteriormente, la suma total de espesores de estas componentes debe ser superior a las 6.0 milésimas de pulgada (0.15 mm), a fin de que el sistema sea efectivo en su protección contra la corrosión. En la Ilustración 5.17 se muestra un sistema de recubrimiento completo.

Se debe hacer hincapié que el éxito de un sistema de protección anticorrosiva, a base de recubrimientos, depende principalmente de factores tales como la preparación de la superficie, la adecuada aplicación de los recubrimientos y de la elección del tipo de sistema adecuado al medio corrosivo a que va a estar expuesto; pero considerando que en la formulación de un recubrimiento se involucran aproximadamente 10 o 12 componentes en una mezcla o dispersión, otro factor importante es la certificación del recubrimiento, es decir, que se encuentre dentro de las características, propiedades y composición correspondientes a su formulación, para que satisfaga los requisitos contenidos en una especificación. Esto significa que los materiales que se usan en operaciones de protección anticorrosiva deben estar sujetos a pruebas de calidad constantes, para poder garantizar su máxima eficiencia.

En términos generales las desviaciones en la calidad (valores de las propiedades indicadas en una especificación) de un recubrimiento son atribuibles a variaciones en la calidad de las materias primas utilizadas, o bien a errores en el proceso de fabricación, siendo tal su efecto sobre el comportamiento del recubrimiento, que

Ilustración 5.17 Sistema anticorrosivo de tres recubrimientos



en ocasiones es capaz de reducir drásticamente su durabilidad o eficiencia contra la corrosión.

Considerando los tipos de recubrimientos existentes en el mercado y conociendo la importancia de la calidad de los mismos, se han establecido una serie de pruebas y características consideradas como mínimas y obligatorias para todos los recubrimientos. Las pruebas mínimas a que deben someterse todos los recubrimientos son:

- Tiempo de secado al tacto, entre capas y duro
- Estabilidad en almacenaje
- Flexibilidad o elongación
- Resistencia al intemperismo acelerado
- Resistencia a la cámara salina
- Peso específico
- Viscosidad
- Color
- Finura
- Apariencia y facilidad de aplicación
- Poder cubriente
- Análisis de composición
- Pruebas químicas de inmersión
- Retenido en malla 325

Si un recubrimiento satisface los valores y limitaciones de las pruebas mencionadas en la especificación correspondiente, cabe esperar una alta probabilidad de que se comporte adecuadamente, suponiendo una buena preparación de la superficie.

Los recubrimientos incluyen el esmalte de alquitrán de hulla, recubrimientos de cemento - mortero aplicado en taller, cintas aplicadas en frío, recubrimientos epoxi alquitrán de hulla, recubrimientos epoxi unidos por fusión, y sistemas de recubrimiento con cinta.

5.2.4 Rendimientos de recubrimiento

En la Tabla 5.6 se muestran algunos rendimientos, cabe mencionar que estos datos son de fabricantes y que dependiendo del diseño del proyecto, se deben consideraran el tipo de ambiente o buscar alternativas con más proveedores que cumplan con la proyección que se requiera.

5.3. Limpieza y Preparación de superficies

Para que la aplicación de un recubrimiento sea correcta y éste cumpla perfectamente su función de proteger y evitar la corrosión, se debe poner especial interés en un aspecto poco conocido y casi olvidado, pero que es vital y sobre el cual

Tabla 5.6 Hoja técnica del producto

Producto	Rendimiento teórico
Imprimante Inorgánico de Zinc	90 m²/galón a 25.4 micrones (1.0 mil) El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento metálico a recubrir, exceso de espesores de película aplicada, etcétera
Epóxico Interior de Tanques	82 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils) El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera
Epoxifenólico	82 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils) El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera
Autoimprimante Epóxico	126 m²/gl a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils)
Permacor Hi-Build	150 m²/gl a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils).
Barrera Epóxica	90 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils) El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera
Esmalte 3133	50 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils). El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera
Esmalte Alquídico	63 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils) Nota: Para el Esmalte Alquídico Aluminio favor consultar hoja técnica específica. El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera

Producto	Rendimiento teórico
Esmalte Alquídico Color Aluminio	57 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils) Se recomienda que el espesor de película húmeda no sea mayor a 3 mils: si se requieren capas sucesivas de este producto, se debe dejar mínimo un tiempo de 48 horas a 25°C entre la aplicación de capas. El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera
Esmalte Acrílico	63 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils) El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera
Esmalte Epóxico	78 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils). El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, etcétera
Esmalte Epóxico Aluminio	72 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils)
Esmalte Vinílico	45 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils). El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera
Esmalte Uretano	90m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils). Nota: rendimiento teórico del: Esmalte Uretano Transparente: 51 m²/gall a 1.0 mil Esmalte Uretano Negro: 70 m²/gall a 1.0 mil El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de an-claje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera
Esmalte Uretano Aluminio	81 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils). El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera"
Polisiloxano	130 m²/glón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils)
resinas epóxicas y alquitrán de hulla y curador tipo amina alifática	111 m²/galón a un espesor de película seca de 25.4 micrones (1.0 mils). El rendimiento práctico puede sufrir modificaciones debido a perfiles de anclaje mayores que los especificados, corrientes de aire, alta porosidad de la superficie, equipo de aplicación utilizado, diseño y forma del elemento a recubrir y mayores espesores de película aplicada, etcétera
Equipos de aplicación	
Brocha	65 m²/día
Rodillo	(120 a 260) m²/día
Equipo de aire convencional	(400 a 800) m²/día
Equipo sin aire	(600 a 1 000) m²/día

descansa un 90 por ciento del éxito de la aplicación de un sistema de recubrimiento; éste aspecto se refiere a la preparación de la superficie.

El conocimiento de las condiciones finales precisas que debe tener la interfaz del metal para producir la mayor adhesión y unión mecánica del recubrimiento, es absolutamente primordial; de aquí que antes de aplicar cualquier recubrimiento protector es conveniente inspeccionar las superficies y llevar a cabo en ellas un proceso de preparación, que generalmente consiste de dos pasos: corrección de las imperfecciones de la superficie y limpieza.

5.3.1 Corrección de las imperfecciones de la superficie

Consiste en eliminar las áreas donde existen las condiciones físicas que tienden a producir rápida corrosión local. Dentro de estas áreas se deben considerar las aristas o bordes filosos, las soldaduras discontinuas, las soldaduras rugosas, las salpicaduras de soldadura, las cabezas de remaches mal ajustados, hendiduras, huecos y picaduras. Cualquiera de estos puntos puede ocasionar una rápida corrosión y ser el camino para una prematura falla del recubrimiento y con ella tal vez la pérdida del contenido de algún tanque de almacenamiento y hasta un accidente.

De manera semejante las imperfecciones del concreto tales como los huecos producidos por el agua o el aire deben repararse y la superficie debe prepararse de acuerdo con las necesidades del uso particular y el tipo de recubrimiento que se utilice para evitar la penetración de los reactivos químicos o el medio ambiente circundante.

El mejor de los recubrimientos protectores no puede adherirse firmemente a una superficie si materias extrañas tales como óxido, escoria de laminación, pintura vieja, o depósitos de sales y suciedad quedan debajo del recubrimiento. Esto trae como consecuencia un fenómeno muy importante que a menudo pasa desapercibido y que es el hecho de que estas materias extrañas crean también una presión osmótica que atrae vapores de humedad a través de la película de recubrimiento, lo que da por resultado una grave corrosión bajo la película. En consecuencia debe considerarse de primera importancia la correcta limpieza de la superficie, si se desea que el recubrimiento proporcione la máxima protección, a más largo plazo, ver Ilustración 5.18.

5.3.2 Métodos de preparación de superficie

Existen varios métodos de preparación de superficie, los cuales pueden agruparse en dos grandes grupos: preparación mecánica, y preparación química. El de la preparación mecánica de superficie tiene la mayor aplicación, tanto en campo como en taller.

Ambos métodos de limpieza son ampliamente usados y la selección de uno u otro depende del problema de limpieza que se tenga, de las facilidades de aplicación del método seleccionado, de la calidad de la limpieza que se desee obtener (perfil de limpieza), del factor económico o sea el presupuesto que se tenga para llevar a cabo la operación de limpieza de la superficie y del tipo de recubrimiento que se va a aplicar, ya que para cada recubrimiento existe un tipo de preparación que resulta más adecuada y con el cual desarrolla al máximo su capacidad de protección anticorrosiva.

Ilustración 5.18 Limpieza de superficie



5.3.3 Aspectos prácticos en la preparación de las superficies

Cuando se hace una selección del tipo y grado de preparación de superficie que se va a recubrir, se debe considerar el tipo de recubrimiento que será aplicado, y conocer el límite de contaminantes (herrumbre, aceite, suciedad, entre otros) que pueden ser tolerados por el recubrimiento, sin afectar de una manera seria su comportamiento y período de vida útil. Por esta razón, el tipo y grado de preparación de superficie nunca debe ser escogido al azar; pero si debe ser especificado como parte de un sistema.

El grado de preparación de la superficie debe estar balanceado contra el incremento en la vida de un sistema de recubrimiento y se debe seleccionar la combinación más económica. Se encuentra que para una estructura de acero expuesta a un medio ambiente moderadamente corrosivo, no es necesario ni económico llevar a cabo un grado de limpieza donde se remueva completamente toda la herrumbre y la escoria de laminación, con métodos tales como el sopleteo con abrasivos (chorro de arena), hasta un acabado a metal blanco.

Este método de limpieza es caro y debe ser reservado solamente para las exposiciones corrosivas muy severas, donde absolutamente nada

de herrumbre, escoria de laminación o materia extraña puede ser tolerada sobre la superficie.

Se ha encontrado que para el ejemplo citado arriba es suficiente con remover hasta donde sea posible la herrumbre y la escoria de laminación sueltas o mal adheridas, el aceite y grasa y la suciedad existente sobre la superficie. El grado de limpieza seleccionado debe ser tal que resulte económico para el tipo de exposición deseado.

A la elección de un método específico de preparación de superficie debe preceder la determinación del tipo de ambiente al que va a estar expuesto la misma (el grado de corrosividad del ambiente), el tipo de recubrimiento que se va a aplicar y el conocimiento del costo del trabajo terminado. Lo más recomendable es producir la mejor condición de superficie posible, pero es conveniente aclarar que algunas condiciones de servicio no requieren una preparación exhaustiva o sea que no requieren la remoción total de toda la materia extraña a la superficie.

En el aspecto de la preparación de superficies se debe tener presente que el hecho de querer economizar durante esta operación puede resultar contraproducente, de tal manera que si una operación requiere trabajo preparatorio considerable, tal como andamiaje antes de la limpieza, debe ser aceptado, ya que origina un gasto inicial más, pero prevé que la operación de limpieza se lleve a cabo adecuadamente, lo que resultará en un incremento de la vida útil del sistema de recubrimiento.

5.3.4 Preparación mecánica

En todo trabajo de preparación de superficie existe un factor importante que siempre debe tenerse en mente y que se refiere al patrón o perfil de anclaje producido por el método de limpieza, el cual tiene un efecto significativo sobre el comportamiento del recubrimiento una vez aplicado.

El punto medular de este factor es evitar la formación de un perfil de anclaje demasiado profundo, o sea un picado excesivo de la superficie, ya que obviamente, es difícil proteger tal superficie con los espesores de recubrimiento que se manejan normalmente, lo que ocasionará un gasto excesivo de material y de trabajo de aplicación e inspección, que se traduce en una mayor erogación monetaria.

Así como un perfil de anclaje demasiado pronunciado no es recomendable, tampoco lo es un perfil poco definido, o sea una superficie pulida o tersa, la cual desarrollará una pobre adherencia del recubrimiento, ocasionando el desprendimiento del mismo, con la consecuente destrucción del sistema de recubrimiento y el ataque corrosivo a la base metálica.

Los métodos mecánicos de preparación de superficie son muchos y muy variados, en este capítulo únicamente se mencionarán de una manera general, revisando los de mayor aplicación en sus procedimientos y herramientas empleadas. Al mismo tiempo, en cada uno de ellos será tratado el uso específico, su velocidad de limpieza y las características de las superficies producidas.

5.3.4.1. Limpieza manual de superficies

Este tipo de limpieza constituye el procedimiento más antiguo que se ha venido empleando para preparar y limpiar superficies antes de recubrirse. La limpieza manual es un método aceptable de preparación de superficie, en donde no se requiere un grado de limpieza muy exhaustivo, ya que el sistema de recubrimiento que se va a

usar vencerá parcial o completamente la interferencia de los productos o impurezas que generalmente quedan detrás de la limpieza. Es un método recomendado para preparar superficies que al recubrirse van a estar expuestas a condiciones normales de corrosión.

Se debe hacer notar que el método de limpieza manual es caro y limitado, por lo que sólo es recomendable para áreas pequeñas o de difícil acceso, en donde algún otro método de limpieza no puede ser usado. Como una regla general, la limpieza manual se emplea solamente cuando no se cuenta con equipo operado por fuerza (mecánica, neumática o de algún otro tipo), donde el área es inaccesible para trabajar con cualquier otro tipo de herramienta o donde el trabajo sea tan pequeño como para justificar (por su costo) el transporte de equipo pesado.

La limpieza manual remueve la herrumbre y la escoria de laminación sueltas y mal adheridas, así como pintura vieja desprendida de la superficie. Los métodos manuales empleados son: cepillado con alambre, lijado, raspado, picado o empleando otras herramientas manuales de impacto (martillos, picos, entre otros), así como la combinación de los mismos. De lo anterior se desprende que la limpieza manual es un método limitado, que origina un enorme esfuerzo humano, lo que lo hace un proceso lento e impráctico, además de antieconómico por el tiempo que involucra, por tanto, sólo es recomendable para áreas pequeñas (reparaciones).

5.3.4.2. Limpieza con herramientas eléctricas y neumáticas

Este tipo de limpieza es muy similar al proceso de limpieza con herramientas manuales, el trabajo a realizar es básicamente el mismo, aunque los resultados (perfil de limpieza) son mejores. La única diferencia entre ambos métodos es el tiempo, ya que con el empleo de las herramientas mecánicas el trabajo de limpieza se hace más rápido (hasta en un 50 por ciento) y como es lógico suponer los acabados son mejores que los que se obtienen con las herramientas de mano.

Este método de limpieza está íntimamente ligado al proceso de limpieza manual, se puede decir que se complementan el uno al otro, ya que si por determinadas circunstancias un método no puede ser usado, se emplea el otro.

5.3.4.3. Limpieza con flamas

Este método de limpieza consiste en hacer pasar sobre las superficies flamas oxiacetilénicas a alta velocidad. Cuando se introdujo éste método se pensó que era una solución satisfactoria a los problemas de limpieza de superficies metálicas y que resultaría la más económica y práctica. Pero los resultados hasta la fecha han fracasado en su intento por justificar ese optimismo.

El método depende del alto calor generado en la superficie, el cual remueve algo de la escoria de laminación y de la herrumbre. Esta remoción se hace ya sea por medio de diferencia térmica causando un gradiente en la velocidad de expansión entre el metal base y la escoria de laminación o por la acción explosiva del vapor de agua generado debajo de la escoria o por una combinación de estos métodos.

El método de limpieza a la flama es recomendable para talleres o localizaciones donde es imposible limpiar con chorro de abrasivo, pero se desea que la preparación de la superficie sea mejor que la ob-

tenida por el método manual y con herramientas de fuerza.

Este método presenta una severa limitante ya que, para que el método resulte efectivo se necesita llevar a cabo una completa operación de cepillado con alambre y la aplicación del recubrimiento cuando la superficie esté aún caliente.

5.3.4.4. Limpieza con chorro de abrasivo

La limpieza con chorro de abrasivo es el mejor método para limpiar superficies por su eficacia para quitar herrumbre, escoria de laminación, pintura vieja y todo tipo de contaminantes y también porque deja una superficie áspera que contribuye a una mayor adherencia del recubrimiento. La limpieza por sopleteo consiste en impulsar partículas abrasivas por medio de aire comprimido o una fuerza centrífuga contra una superficie, dichas partículas golpean la superficie a muy alta velocidad, provocando un efecto de picado, desconchado y desgaste por rozamiento, es decir, se remueve junto con los contaminantes algo de la base metálica, ver Ilustración 5.19.

La limpieza por sopleteo con abrasivos provee un perfil de anclaje o terminado de superficie que permite una óptima adherencia del recubrimiento. La Tabla 5.7 muestra algunos de los abrasivos con su tamaño de partícula y el perfil de anclaje máximo. Teniendo en cuenta que muchos de los recubrimientos protectores son películas delgadas, es importante que en el proceso de limpieza se utilicen abrasivos con un tamaño de partícula especifico, con una presión de aire adecuada y el equipo en óptimas condiciones, para obtener superficies satisfactorias:

a) ***Condición No. 1 Acabado de superficie a metal blanco.*** Esta condición final constituye la mejor preparación de superficie posible que pueda producirse. La superficie aparecerá de un color grisáceo, blanco metálico, muy uniforme, ligeramente áspera de acuerdo a los abrasivos usados. Constituye un patrón de anclaje apropiado para cualquier tipo de recubrimiento. La superficie se encuentra libre de escoria de laminación, herrumbre, óxidos, productos de la corrosión, pinturas viejas y cualquier materia extraña. Cuando menos el 99.9 por ciento de la superficie debe estar totalmente limpia
b) ***Condición No. 2 Acabado de superficie cercana a metal blanco.*** El acabado final de una superficie limpiada a un grado casi blanco se define como aquel en el cual todo aceite, grasa, suciedad, escoria de laminación, herrumbre, productos de corrosión, pinturas y otras materias extrañas han sido completamente removidas de la superficie, excepto ligeras sombras, rayas o decoloraciones causadas por manchas de herrumbre, ligeras escorias de laminación y muy finos residuos de pintura. Por lo menos un 95 por ciento de cada metro cuadrado de superficie debe estar libre de residuos visibles y el resto limitarse a las mínimas decoloraciones antes mencionadas
c) ***Condición No. 3 Acabado de superficie tipo comercial.*** En este acabado todo el aceite, grasa, suciedad, escoria de laminación, pintura y toda materia extraña no encajada en agujeros y grietas debe removerse completamente, excepto por ligeras rayas de decoloraciones. Si la su-

Ilustración 5.19 Limpieza por chorro de arena



Tabla 5.7 Abrasivos y perfil de anclaje

Abrasivo	Tamaño máximo de las partículas	Profundidad del perfil	
		(milésimas de pulgada)	(mm)
Arena muy fina	malla 80	1.5	0.0381
Arena fina	malla 40	1.9	0.04826
Arena mediana	malla 18	2.5	0.0635
Arena gruesa	malla 12	2.8	0.07112
Gravilla de acero G-50	malla 25	3.3	0.08382
Gravilla de acero G-40	malla 18	3.6	0.09144
Perdigón de hierro S-230	malla 18	3.0	0.0762
Perdigón de hierro S-330	malla 16	3.3	0.08382
Escoria de metales triturados	malla 80	aprox. 1.3	0.03302

perficie es rugosa, se permiten pequeños residuos de pintura, herrumbre o escoria de laminación en la parte de los valles. Cuando menos las 2/3 partes (67 por ciento) de cada metro cuadrado de superficie debe aparecer con un color blanco grisáceo uniforme, libre de todo residuo visible, y el resto debe estar limitado a las ligeras decoloraciones, manchas y residuos descritos anteriormente

d) ***Condición No. 4 Acabado de superficie tipo ráfaga.*** Se le conoce también como limpieza tipo y en ella se remueven todo el aceite, grasa, suciedad, escoria de laminación suelta, herrumbre suelto, pinturas y recubrimientos sueltos o mal adheridos. La superficie puede retener la escoria, herrumbre, pintura o recubrimiento que estén fuertemente adheridos. Es un grado de limpieza ligeramente superior a una limpieza mecánica bien realizada. Se debe reconocer que el tiempo y el costo para producir los cuatro grados de limpieza se incrementan geométricamente, desde los grados más bajos a los más altos la relación de producción sobre trabajo normal entre estas cuatro condiciones finales puede estar como sigue:

- 1.00 para metal blanco
- 1.25 para metal casi blanco
- 2.50 para acabado comercial
- 6.00 para el acabado tipo ráfaga

5.3.4.5. Limpieza de uniones

Un punto particularmente importante en las operaciones de limpieza lo constituye la limpieza de las uniones, costuras o juntas. La limpieza de los cordones de soldadura de arco eléctrico es importante, ya que sobre las juntas o adyacente a ellas están presentes cuatro depósitos de productos específicos que deben ser removidos o neutralizados, para mantenerlos inofensivos bajo la película de recubrimiento. Estos cuatro productos son:

- Escoria de soldadura derretida (fundida)
- Gases o emanaciones de soldadura fundida
- Óxidos de soldadura calientes
- Salpicaduras de soldadura metálica

La escoria de soldadura fundida es una solidificación dura y quebradiza de soldadura derretida. El material fundido rápidamente llena los espacios y depresiones sobre los cordones soldados a mano y se extiende hasta el metal inmediatamente adyacente a las uniones de soldadura. La escoria es fuertemente alcalina en naturaleza y reacciona bajo la película de recubrimiento, particularmente en un medio húmedo. Hay también una fuerte posibilidad de separación de una junta de soldadura después que el recubrimiento ha sido aplicado, causando así una exposición completa del metal al medio ambiente.

Todos los depósitos de productos mencionados deben removerse completamente durante el proceso de preparación de superficie. Prácticamente cualquiera de los métodos descritos son capaces de remover estos depósitos, si se llevan a cabo a conciencia.

5.3.4.6. Seguridad

La preparación mecánica de las superficies constituye una fuente de muchos riesgos a individuos y propiedades, a menos que sea conducida cuidadosamente con el propósito de eliminarlos.

En este tipo de trabajo la seguridad de protección debe estar centrada en la protección de la cabeza, ojos y órganos respiratorios, aunque las otras partes del cuerpo no son menos importantes y deben, también, ser protegidos satisfactoriamente.

En cualquier tipo de operación de limpieza, si la operación es conducida en una atmósfera que contiene vapores volátiles, puede resultar una explosión o fuego cuando la concentración del vapor se encuentra dentro de la región explosiva. En tales casos, deben usarse herramientas de seguridad antichispa. El sopleteo con abrasivos bajo tales condiciones no debe realizarse a menos que se usen perdigones de cobre y aun así, el peligro de chispas está latente.

La limpieza por sopleteo es una operación particularmente riesgosa a menos que se mantengan las precauciones pertinentes para prevenir accidentes. En cuanto al aspecto de la silicosis, no existe riesgo si se toman las precauciones necesarias, entre las que se pueden mencionar el empleo de abrasivos libres de sílica o el suministro de cascos de seguridad con alimentación forzada de aire. Para la limpieza por sopleteo en interiores es extremadamente importante el empleo de equipo de ventilación y extracción.

Las consideraciones de seguridad no deben estar limitadas a riesgos al personal. Debe tenerse cuidado de proteger la propiedad adyacente, maquinaria, equipo eléctrico y pintura. El resguardo por envoltura es el método más común.

5.3.4.7. Preparación química

Toda superficie metálica que se va a recubrir tiene varios contaminantes, los cuales interfieren con la adhesión de la película de recubrimiento subsecuentemente aplicada o permiten la corrosión bajo la película (recubrimiento), provocando fallas prematuras de los sistemas. Los contaminantes de superficie pueden agruparse en tres grupos:

- Grasas, aceite, polvo, provenientes del rolado, forjado, estirado y manejo de materiales
- Herrumbre y escoria de laminación
- Estimulantes de herrumbre visible e invisible

Para que la pintura se adhiera al metal, debe ser capaz de humectar la superficie. La presencia de grasa, aceite y otras suciedades en la superficie reduce esta acción humectante y por tanto interfiere con la adhesión de la película del recubrimiento al metal.

Las superficies metálicas generalmente están cubiertas con escoria de laminación, la cual es necesario remover antes de la aplicación del recubrimiento para garantizar al máximo la vida del mismo. La herrumbre puede ser clasificada con la escoria como un contaminante de superficie y su eliminación total es esencial para garantizar la vida útil de un recubrimiento. Los métodos de limpieza química más usados son:

Enjuague y desengrasado con disolventes

La limpieza con disolventes se lleva a cabo con el fin de remover aceites, grasa y suciedad, antes de eliminar el resto de los contaminantes por cualquiera de los métodos de limpieza conocidos. Constituye una limpieza auxiliar previa o complementaria, que se efectúa en combinación con otros sistemas de preparación de superficies.

Este tipo de limpieza regularmente no se realiza y es posible que sea más perjudicial que benéfica, si la operación no se lleva a cabo cuidadosamente. Este punto se refiere al hecho de que el disolvente empleado en la limpieza de la superficie pronto llega a estar contaminado con la suciedad removida y así, después de un tiempo corto, solamente redeposita aceite y grasa sobre la superficie. Por tanto, para que el método sea efectivo, debe emplearse constantemente disolvente limpio; esto implica el uso de grandes cantidades de materiales, lo que significa un costo elevado de limpieza.

Limpieza con vapor

Se usa para limpiar superficies impregnadas de suciedad muy densa, combinando la temperatura y la velocidad del vapor húmedo con la acción del detergente de un álcali. Proporciona un grado de limpieza aceptable, que normalmente se combina con un cepillado final de la superficie, para eliminar toda la materia suelta o mal adherida, seguido de un enjuague con agua corriente para eliminar los residuos.

Limpieza alcalina

La limpieza con álcali es más eficiente, más barata y menos peligrosa que la limpieza con disolventes. Se puede llevar a cabo por inmersión, espreado o restregado con cepillo. Su capacidad de limpieza se basa en su pH alto, por encima de 8.5.

Los álcalis son limpiadores altamente efectivos. Remueven rápidamente aceites, grasa y todo tipo de suciedad. Su desventaja la representa la necesidad de realizar un enjuague acidulado al final de la operación y los altos costos que pueden alcanzar.

Limpieza ácida

Este procedimiento está totalmente probado por años de experiencia, limpia el metal tratándolo con soluciones ácidas que contienen algunos disolventes tales como alcoholes, éteres, cetonas, entre otros. La limpieza con ácidos remueve de una manera efectiva grasas, aceites, suciedad y otros contaminantes de superficies. Además, promueve el grabado o anclaje de las superficies, mejorando sus propiedades de adhesión a la pintura.

Limpieza con disolventes emulsificables

Los disolventes emulsificables remueven efectivamente películas pesadas de aceite, grasa, parafinas y otras substancias no deseadas. Los disolventes se pueden usar concentrados o diluidos en gas nafta o alguna otra fracción del petróleo y se aplican por aspersión o fregado. Requiere de un enjuague final con agua corriente para eliminar los residuos de los disolventes emulsificables.

Limpieza por inmersión en soluciones ácidas

Es por definición la inmersión de objetos en ácidos diluidos. Es el proceso en el cual, los métales se sumergen en soluciones ácidas con el propósito de remover óxidos, escorias y cualquier contaminante de superficie. Los ácidos usados en el pickling comercial son: fosfórico, clorhídrico, nítrico, sulfúrico, fluorhídrico y mezclas de los mismos.

Los procedimientos anteriores tienen utilidad práctica únicamente a nivel de taller y generalmente para piezas pequeñas y medianas. En el campo el único método de limpieza química que tiene que tiene utilidad, es el de la limpieza con disolventes, el cual se acostumbra antes de aplicar cualquier otro método de limpieza mecánico.

5.3.5 Aplicación de recubrimientos

5.3.5.1. Mezclado y adelgazamiento de recubrimientos

Este tema resulta de suma importancia porque ha sido demostrado por infinidad de pruebas, que cualquier anomalía en alguno de los procesos arriba mencionados puede desembocar en fallas que alteran negativamente la vida útil de los recubrimientos.

Una vez que el recubrimiento ha sido elaborado y aprobado por la compañía fabricante, generalmente no se entrega inmediatamente a los consumidores, sino que pasa por un corto periodo de almacenamiento. Una vez que el material se surte al cliente, en muchas ocasiones se almacena durante un periodo de tiempo antes de ser usado en aplicaciones para protección anticorrosiva. El tiempo transcurrido entre la manufactura del recubrimiento y su aplicación se denomina tiempo de almacenaje, el cual es importante, ya que tiene un efecto considerable en el comportamiento del recubrimiento a la hora de su aplicación.

Todos los recubrimientos para protección anticorrosiva emplean en su formulación materias primas conocidas como pigmentos, los cuales con el tiempo tienden a precipitarse en menor o mayor grado, formando asentamientos, los cuales en el momento de la aplicación de los recubrimientos deben ser nuevamente mezclados cuidadosamente, hasta obtener un material homogéneo, con las mismas propiedades que presentaba el producto en el instante mismo de su fabricación.

Un procedimiento adecuado de almacenamiento puede consistir en el cumplimiento de las siguientes recomendaciones:

Los recubrimientos no deben almacenarse a la intemperie, ni en lugares excesivamente fríos, sobre todo si se trata de productos susceptibles a ser dañados por el frío, como es el caso de las emulsiones.

Todos los recubrimientos deben estar almacenados preferentemente en lugares protegidos del intemperismo, pero bien ventilados y libres de calor excesivo, chispas, flamas y de los rayos directos del sol.

Los envases que contienen el recubrimiento deben permanecer cerrados hasta el momento de su uso. Si por algún motivo alguno de los envases ha tenido que ser abierto (remover parte de su contenido o por inspección), el producto deberá usarse tan pronto como sea posible y con preferencia sobre el producto de los envases que han permanecido cerrados durante todo el tiempo.

Los envases deben almacenarse de tal forma que puedan ser volteados periódicamente sin ningún problema. Los intervalos de tiempo en que los envases deben voltearse, depende de la tendencia que presente el recubrimiento al asentamiento. Generalmente, se recomienda como buena práctica realizar la maniobra cada uno, dos o hasta tres meses. Esta operación tiene por objeto ayudar a la preservación de] pigmento en suspensión.

Nunca permitir que un lote determinado de producto vaya siendo relegado por la presencia de nuevas remesas del mismo material, sino que dichas remesas deben almacenarse en forma tal que permitan que las antiguas existencias sean usadas primero.

Los recubrimientos almacenados por largos periodos de tiempo deben ser examinados y pro-

bados antes de su uso para determinar si no han sufrido deterioro durante el almacenaje.

Operaciones de mezclado

El mezclado es una operación importante e incluso fundamental en casi todos los procesos químicos, que implica la íntima interposición de dos o más componentes separados para formar un producto uniforme. En el caso específico de la industria de los recubrimientos, el mezclado es una operación necesaria ya que para una aplicación apropiada es necesario que el recubrimiento sea una mezcla homogénea, como lo era cuando fueron completados los procesos de su manufactura. En este estado, la consistencia de la formulación es uniforme y los pigmentos están igualmente dispersados.

Una vez que los pigmentos han sido completamente incorporados y el recubrimiento perfectamente mezclado, se pasa a través de un colador o malla fina, con el objeto de eliminar cualquier nata, grumo o materia extraña presente. En esta forma, el recubrimiento queda listo para ser adelgazado y posteriormente aplicado. El mezclado de los recubrimientos puede realizarse por medio de dos métodos:

Manual. Se realiza introduciendo en el recipiente no mayor de 20 litros, una paleta o remo de madera (pueden utilizarse remos de otros materiales, pero por razones de seguridad la madera es el material más usado) que se oscila vigorosamente sobre el borde del recipiente para producir la turbulencia necesaria para un buen mezclado. Este método presenta una desventaja en el tiempo y labor involucrados y se presenta la posibilidad de un mezclado deficiente.

Mezclado mecánico. Emplea agitadores eléctricos y neumáticos y está reservado para recipientes grandes, donde se mueven volúmenes considerables de material. El empleo de este método asegura una buena homogeneización y disminuye considerablemente la posibilidad de un mezclado deficiente.

Operaciones de adelgazamiento

Una vez que el recubrimiento está adecuadamente mezclado, el adelgazamiento o ajuste de viscosidad del mismo se convierte en la parte medular del procedimiento de acondicionamiento del material para su aplicación.

El adelgazamiento de los recubrimientos es muy importante y debe ser llevado a cabo de acuerdo a las instrucciones proporcionadas por los fabricantes de los mismos. Lo deben realizar personas capacitadas y no deberá ser relegado a personal sin experiencia.

Al ajustar la viscosidad de un recubrimiento se deben tener en mente dos factores de vital importancia:

El empleo del adelgazador apropiado

La adición de la cantidad adecuada de adelgazador, con base en el método de aplicación a ser usado.

Los adelgazadores pueden no ser añadidos, a menos que sea necesario para la adecuada aplicación del recubrimiento. La mayor parte de los materiales surtidos hoy en día son adelgazados. La cantidad de adelgazador necesaria depende del método de aplicación seleccionado, siendo mayor el porcentaje de adelgazamiento en las aplicaciones por aspersión.

En la aplicación de un recubrimiento existe un factor muy importante que es vigilado y contro-

lado por la persona encargada de las operaciones de aplicación, la cual se requiere sea de mucha experiencia y tenga buenos conocimientos sobre recubrimientos anticorrosivos. Este factor se refiere al espesor óptimo de película que deberá ser aplicado sobre la superficie, para asegurar una protección óptima y duradera contra los problemas de corrosión y deterioro prematuro. Si el recubrimiento se adelgaza excesivamente, los requerimientos de espesor de película aplicada por capa no se cumplen, lo que origina que la superficie recubierta no quede lo suficientemente protegida, a menos que se depositen un mayor número de capas o manos de recubrimiento sobre ella. Este factor se denomina "construcción de película por capa".

Generalmente, la cantidad de adelgazador necesaria para lograr la consistencia (viscosidad) óptima de aplicación no excede de 25 por ciento de la cantidad de recubrimiento, a menos que se trate de una formulación tipo laca, la cual se formula intencionalmente para aceptar una gran cantidad de adelgazador.

Para aplicación con brocha o rodillo, la viscosidad de recubrimiento debe ser equivalente a 50-60 segundos en copa Ford No. 4; para aplicación por aspersión con aire, la consistencia debe ser equivalente a 22-28 segundos en copa Ford No. 4. En trabajos de campo, la viscosidad de aplicación se obtiene con base en la experiencia en el trabajo.

5.3.5.2. Métodos de aplicación de recubrimientos

La aplicación adecuada de un recubrimiento es una operación delicada, que debe llevarse a cabo con mucho cuidado, ya que en ella descansa gran parte del éxito de un sistema de recubrimiento para protección anticorrosiva. Esta aplicación puede llevarse a cabo a través de varios métodos específicos, cada uno de los cuales requiere de técnicas y cuidados diferentes, pero todos tienen como finalidad depositar sobre una superficie una cierta cantidad de recubrimiento en forma de película, que servirá como aislante entre la superficie y el medio ambiente, evitando así el deterioro o destrucción prematura de la misma por la acción corrosiva desarrollada por el medio.

Para obtener una vida satisfactoria del sistema de recubrimiento, es estrictamente necesario observar cuidadosamente una serie de reglas antes, durante y después de la aplicación del recubrimiento. Entre las más importantes y que requieren atención especial se tienen las siguientes:

- Una vez que se ha comprobado que el recubrimiento a ser aplicado es el adecuado y corresponde a la especificación establecida para ese medio de exposición, tipo de servicio y que el tipo de preparación de superficie es el adecuado, se debe vigilar que el recubrimiento esté debidamente mezclado y adelgazado con las recomendaciones del fabricante
- Se debe tener cuidado que las superficies estén perfectamente secas
- No se debe aplicar ningún tipo de recubrimiento en presencia de lluvia, humedad excesiva o cuando la temperatura ambiente sea menor de 10 grados centígrados
- Se debe verificar cuidadosamente el equipo de aplicación para asegurarse que esté completamente limpio y libre de contaminación
- En ambientes donde la humedad relativa está por debajo del 80 por ciento las con-

diciones se consideran satisfactorias para las operaciones de pintura. Cuando la humedad relativa es alta, es muy probable que se presente condensación si la temperatura de la superficie metálica está ligeramente abajo de la temperatura del aire

- La aplicación del recubrimiento debe hacerse de manera uniforme, de tal forma que la capa de recubrimiento depositada sobre la superficie tenga el mismo espesor y esté libre de poros. Si la superficie es rugosa, picada o pobremente preparada, se recomienda la aplicación con brocha de un recubrimiento primario
- Si la superficie está perfectamente preparada se recomienda la aplicación del recubrimiento primario por aspersión, lo cual dará exactamente el mismo resultado que la aplicación con brocha, con la ventaja adicional de que la aplicación resulta uniforme en el espesor de película depositada sobre la superficie; además las marcas o surcos dejados por la brocha se evitan eliminando así un riesgo muy común en la aplicación de recubrimientos con brocha, ya que se ha comprobado que el agotamiento del recubrimiento ocurre precisamente en el fondo de los surcos o marcas de la brocha debido a que representan la parte más delgada de la película de recubrimiento
- Debe tenerse siempre presente una relación del tiempo de secado entre capas, de tal forma que la película de recubrimiento aplicada tenga un período de endurecimiento apropiado antes de que se aplique sobre ella otra capa del mismo recubrimiento o de otro tipo
- Cuando se termina un trabajo de aplicación de recubrimientos anticorrosivos, se debe permitir al sistema secar tanto como sea posible antes de su exposición al tipo de servicio al que va a estar destinado. La exposición del recubrimiento fresco a un ambiente severo tiene un efecto deteriorante sobre su vida útil, lo cual no puede remediarse en las operaciones desarrolladas en el campo bajo condiciones prácticamente severas
- Si la superficie fue preparada con chorro de abrasivo (arena) el recubrimiento no deberá aplicarse después de 3 horas de efectuada la limpieza, debido a los posibles efectos de corrosión en la superficie. Si las condiciones ambientales son críticas, este tiempo es menor y deberá establecerse en la localidad

Aplicación con brocha de pelo

La aplicación con brocha es un procedimiento que ha sido utilizado durante muchos años, no obstante, es necesario puntualizar algunos aspectos. En comparación con otros métodos resulta excesivamente lento, por lo que debe preferirse para áreas pequeñas o de conformación difícil; además, presenta dificultad para un eficiente control de espesores de película. Entre sus ventajas más sobresalientes se pueden mencionar las pérdidas mínimas de material y la fácil humectación, aún en áreas difíciles, además que los costos por equipo son mínimos.

Selección de la brocha: El tamaño de la brocha dependerá del área por recubrir; las de tamaños reducidos se utilizan en áreas pequeñas o intrincadas (de difícil acceso), las más anchas se utilizan en áreas extensas, preferentemente planas. En la selección de una brocha es también importante conocer el tipo de material de que están hechas las cerdas; la máxima eficiencia

de aplicación se obtiene con brochas de pelo de caballo, aun cuando en ciertos casos se puede utilizar una combinación de esta cerda natural y fibra sintética, con la consecuente disminución en la eficiencia de aplicación.

Aplicación con rodillo

Los rodillos son dispositivos que reducen considerablemente el tiempo de aplicación en superficies planas. En el mercado existe gran variedad de formas y tamaños. Los rodillos generalmente se construyen de lana natural, aunque con frecuencia se le combina con fibras sintéticas.

Aplicación por aspersión

Este método de aplicación se desarrolló ante la necesidad imperiosa de incrementar las velocidades de aplicación y mejorar el control de espesores y la eficiencia en general. El principio fundamental de la aplicación por aspersión está basado en la fina atomización del recubrimiento, proyectando la niebla resultante hacia el objeto por recubrir.

Los primeros equipos de aspersión utilizaron aire comprimido como medio de atomización y no obstante que a la fecha es el procedimiento más utilizado, se han desarrollado otros métodos de aspersión, tales como la aspersión por vapor y la aspersión sin aire (airless), pero en algunos de ellos su alto costo o dificultad de manejo han limitado su popularización.

Aplicación con aspersión con aire: Este método de aplicación es el más usado. El manejo del equipo necesario no es problemático, aunque si requiere de una serie de cuidados básicos que deben tenerse siempre en mente y que se mencionarán a continuación.

El equipo de aplicación por aspersión con aire considera los siguientes componentes: pistola de aspersión, recipiente para material (olla o vaso), mangueras (para aire y material), filtro de aire, reguladores de presión de aire con manómetro, compresor de aire, accesorios (conexiones, entre otras) y equipo de seguridad.

En la Ilustración 5.20 se ilustran los principales componentes de una pistola de aplicación por aspersión convencional con aire.

Recomendaciones para la aplicación por aspersión con aire: Dado el número de variables que se manejan durante la aplicación de un recubrimiento por aspersión con aire, como son la presión del aire de atomización, la presión y el gasto de fluido, la consistencia o viscosidad del mismo, la rapidez en el movimiento de la pistola, la distancia de la pistola a la superficie, por mencionar algunos, el obtener espesores uniformes, correctamente aplicados, dependerá fundamentalmente de la experiencia.

Para la aplicación con equipo de alimentación por succión, el suministro de aire debe ajustarse a una presión de atomización adecuada, que para la mayoría de los recubrimientos es del orden de 40 a 50 lbs/pulg^2. Girando los tornillos de regulación de aire y fluido se ajustan los suministros hasta obtener un patrón de aplicación que coincida con el que se muestra en la Ilustración 5.21.

A pesar de que la aplicación de recubrimientos anticorrosivos por aspersión requiere de una mayor cantidad de equipo y un mayor control y experiencia, la aspersión representa el método más rápido y eficiente y por lo tanto el más usado.

Aplicación por aspersión sin aire: El método de aplicación por atomización sin aire se originó

Ilustración 5.20 Pistola para la atomización convencional con aire, sin aire o mediante presión hidráulica de recubrimientos

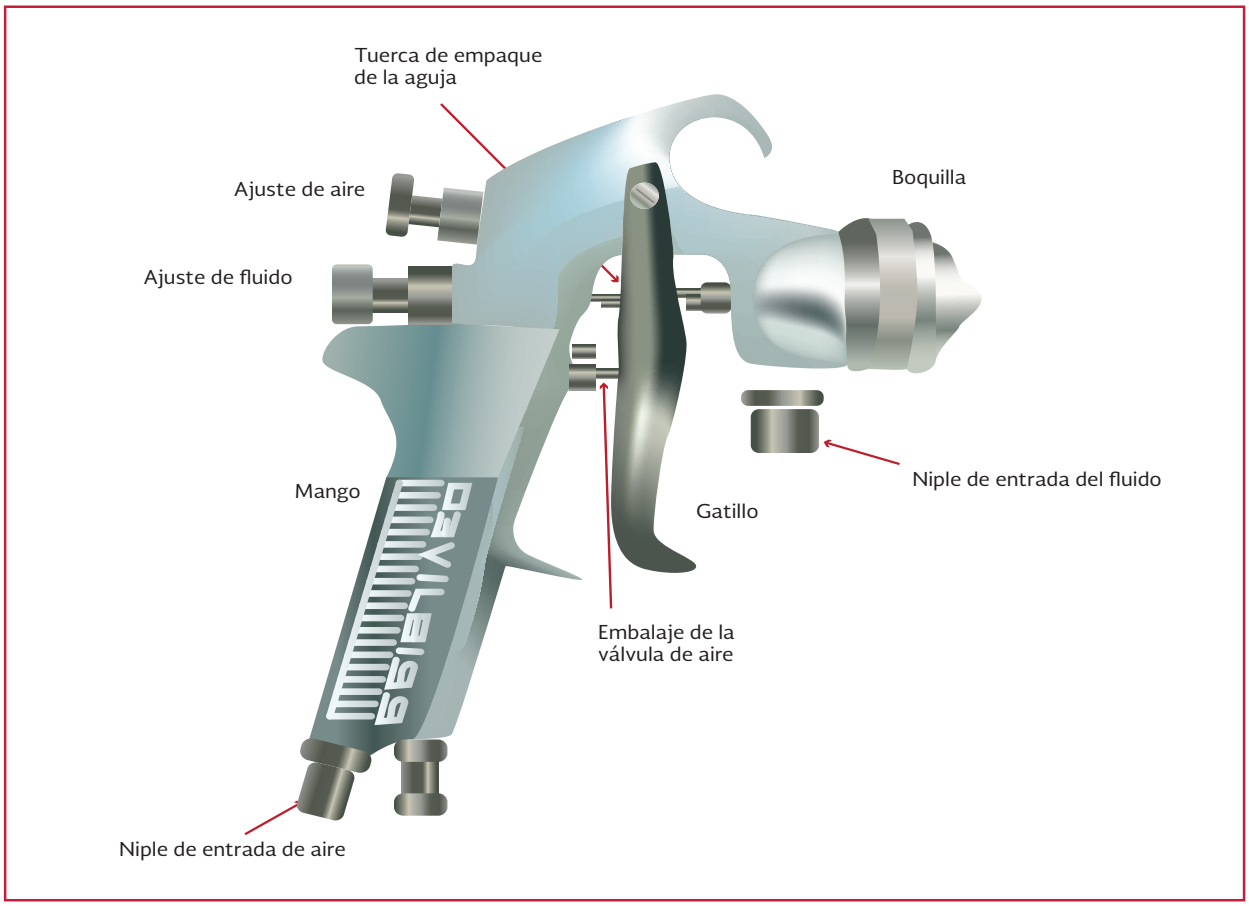
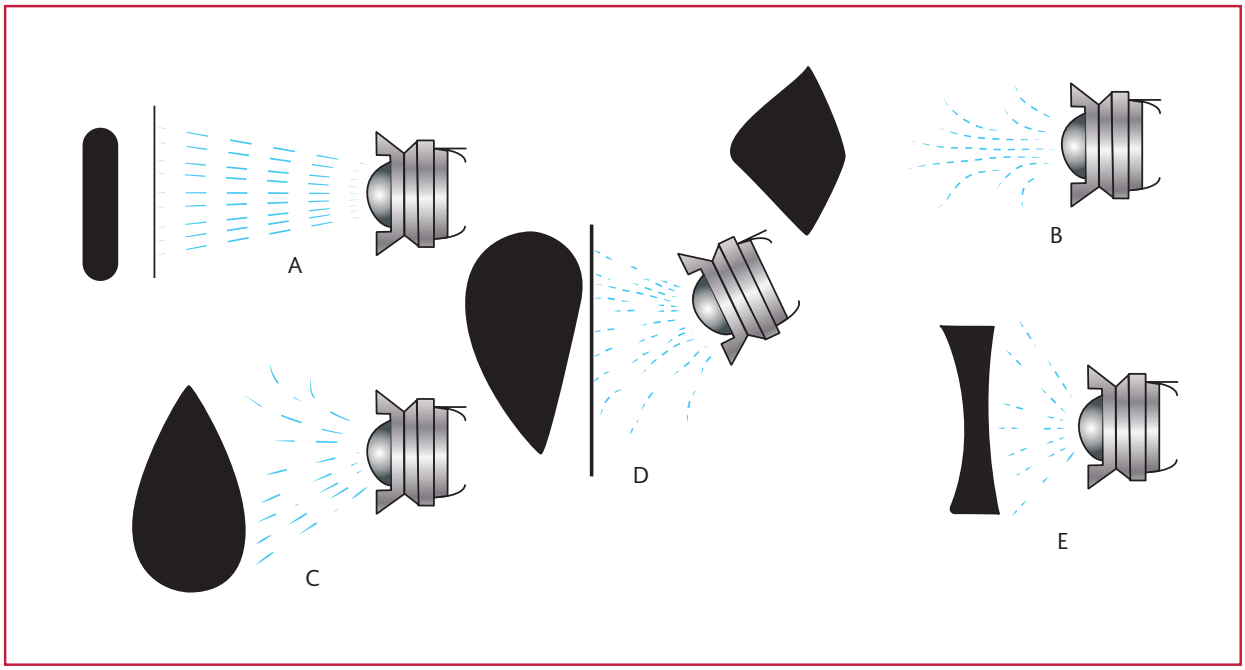


Ilustración 5.21 Patrones de atomización: A) normal; B) con poros; C) desigual; D) boquilla en ángulo produciendo sobreatomización y E) sobreatomización



como consecuencia de la necesidad de depositar sobre las superficies espesores de película lo suficientemente gruesos, mediante una sola pasada o mano de recubrimiento. Además, en este método de aplicación sobresale la característica de la limpieza con la que se llevan a cabo las operaciones de aplicación, gracias al mínimo de rocío o rebote que se origina, lo que ocasiona también un mínimo de pérdidas por desperdicio de material. Este tipo de aplicación se recomienda para acabados en interiores o espacios cerrados.

En el proceso de rociado con aire comprimido, algo del material de recubrimiento es llevado por el aire a una cierta distancia dentro de la atmósfera, con la consecuente pérdida de material de recubrimiento. El método de rociado sin aire no requiere aire comprimido para la atomización (se elimina el aire como elemento de presión), en cambio utiliza las fuerzas producidas al forzar el material a presión a través de un orificio muy fino.

La aplicación con equipo sin aire ofrece un medio rápido de recubrir grandes superficies con un mínimo de exceso de rocío o rebote, lo que significa un trabajo limpio y con menos pérdidas. Como no emplea chorros de aire, tiene la ventaja de simplificar el sistema de extracción de gases y la renovación de aire en la caseta de aplicación, si se toma en cuenta que en los sistemas convencionales una parte de recubrimiento se atomiza con 99 partes de aire. La atomización producida tiene un patrón húmedo completo para la formación rápida de la película y una mayor penetración de la superficie, lo que asegura su adherencia al sustrato.

Otra ventaja muy importante es la sencillez del equipo de aplicación, el cual consiste únicamente en una bomba operada ya sea por aire o eléctrico/hidráulica, la cual pasa el fluido a la pistola por medio de una sola manguera, que siendo única y de diámetro pequeño, facilita la manipulación de la pistola y provee maniobrabilidad y una operación descansada.

Aplicación por aspersión electrostática: En los últimos años el empleo de los métodos de aplicación por el sistema electrostático ha ido en aumento, particularmente en los casos de producción en serie, debido en primer lugar al ahorro considerable de recubrimiento, comparado con los métodos tradicionales de aplicación por aspersión, en los cuales se puede decir que de cada tres partículas de recubrimiento atomizadas, dos van hacia el objeto a recubrir y la otra se pierde.

El sistema electrostático consiste básicamente en atraer eléctricamente las pequeñas partículas de recubrimiento, tal como los imanes atraen a las partículas de fierro, lo cual se logra mediante la creación de un campo electrostático de alto voltaje entre el atomizador y las piezas por recubrir.

Otras de las ventajas de este método de aplicación son la reducción del costo de mano de obra y la facilidad de aplicación sobre objetos con superficie discontinua, tales como rejillas, en las cuales la aplicación por pistola de aire arrojaría fácilmente pérdidas hasta de un 80 por ciento, mientras que con este método se reducen a un 10 por ciento máximo.

Otros métodos de aplicación

Existen otros métodos de aplicación de recubrimientos que serán mencionados como informa-

ción, pero no se describen. Sin embargo, cabe hacer notar que algunos de estos métodos se usan en buena escala para aplicaciones en taller o fábrica y de entre ellos sobresalen los electrostáticos, para aplicar tanto recubrimientos líquidos, como en polvo y la aplicación por inmersión:

- Aplicación por aspersión en caliente
- Aplicación por aspersión de doble alimentación
- Aplicación por inmersión
- Aplicación por sistema de flujo
- Aplicación por rodillos
- Aplicación por el sistema de cortina
- Aplicación por baño giratorio
- Aplicación por el método del lecho fluidizado
- Aplicación por el método de pulverización electrostática
- Aplicación por el método del lecho fluidizado electrostático

Los tres últimos métodos corresponden a la aplicación de recubrimientos en polvo.

5.3.5.3. Procedimientos de inspección de recubrimientos

Considerando la gran diversidad de factores y condiciones involucradas en un trabajo de pintura, desde la preparación de la superficie, hasta la obtención del sistema de recubrimiento en condiciones de operación, es absolutamente indispensable llevar un control estricto y adecuado en cada una de las actividades. El propósito de la inspección es asegurarse que ciertas especificaciones previamente establecidas para todos y cada uno de los pasos involucrados se cumplan satisfactoriamente.

El trabajo de inspección es muy solicitado por el comprador del servicio, para asegurarse que no recibe menos de lo que él ha especificado. El recubrimiento, el mezclado y adelgazamiento del mismo, la preparación de la superficie, las condiciones ambientales y el manejo de las superficies recubiertas son algunas de las variables que deben ser cuidadosamente controladas si se quieren obtener recubrimientos duraderos.

Desafortunadamente para el comprador, la apariencia final de un trabajo pobre puede ser aproximadamente la misma que la de un trabajo ejecutado con el máximo cuidado.

Una vez que el recubrimiento está aplicado sobre la superficie y se verifica que el espesor de película depositado concuerda con lo establecido en las especificaciones, se procede a verificar sus propiedades finales. En esta inspección es importante considerar las siguientes características:

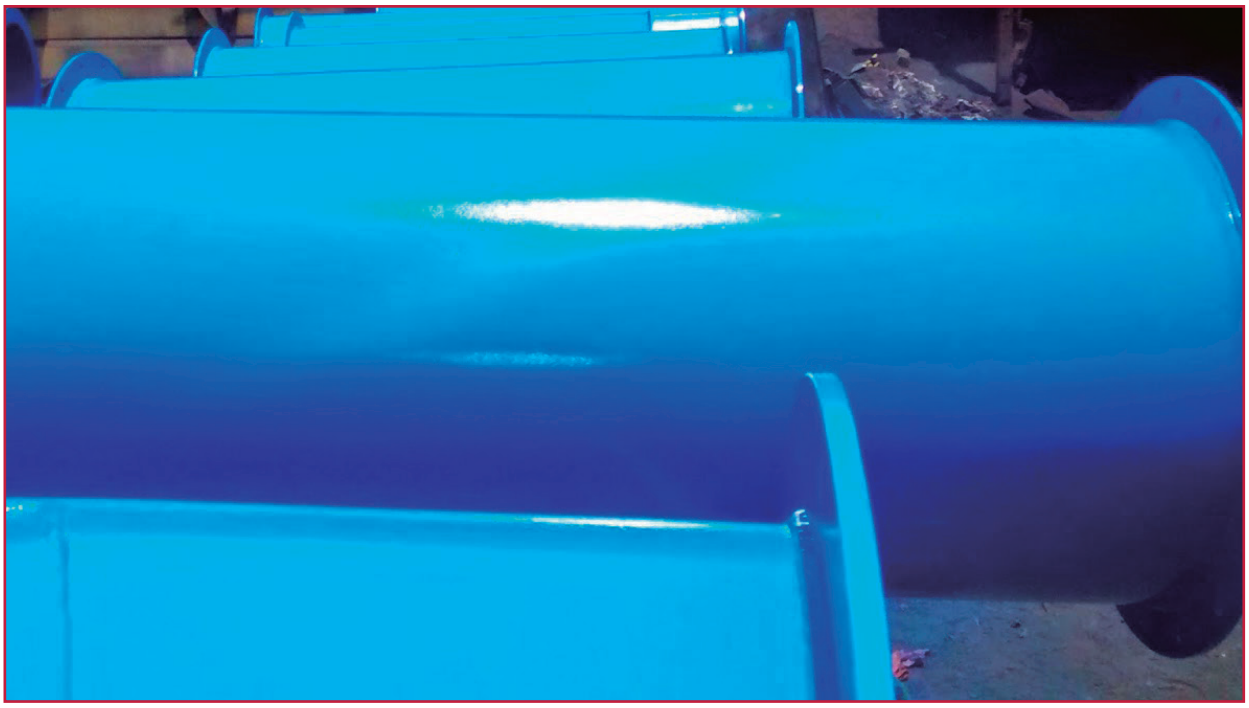
Tiempo de secado. Una vez transcurrido el tiempo de secado establecido en la especificación correspondiente, la película debe soportar la máxima presión del dedo pulgar sin presentar deformaciones, huellas o desprendimientos. Además, no se deben detectar reblandecimientos u olores a disolvente.

Apariencia final. La superficie debe lucir uniforme, libre de grumos, pliegues o deformaciones ver Ilustración 5.22.

Espesor de película seca. El espesor de película seca se determina nuevamente durante la inspección. Dicha determinación se hace con ayuda de medidores de película seca del tipo microtest, electrómetro o digitales.

Adherencia. Esta característica se refiere a la capacidad que tienen los recubrimientos para adherirse y permanecer sobre la superficie una

Ilustración 5.22 Terminación de la superficie



vez que se aplicaron. El procedimiento más común y efectivo para determinar la adherencia de un recubrimiento, consiste en cuadricular la superficie del recubrimiento en varios puntos al azar, con la ayuda de una cuchilla fina, procurando llegar con las incisiones hasta el sustrato metálico.

Posteriormente, se cubre el cuadriculado con cinta adhesiva, procurando un contacto íntimo entre la cinta y el recubrimiento. Enseguida se desprende la cinta súbitamente y se observa la cantidad de material removido. Si el área que ocupa la película removida excede del 5 por ciento, se considera que el material no pasa la prueba.

Continuidad de película. Si se considera que una mayor continuidad o ausencia de poros en una película de recubrimiento representa una barrera más eficiente contra los agentes de la corrosión, es conveniente verificar esta característica con la ayuda de equipos especiales, los equipos usados son del tipo Tinker and Razor, modelo M-1.

Esta característica se determina aplicando una diferencia de potencial entre el sustrato metálico y la superficie del recubrimiento, dado que este último es un material dieléctrico la corriente pasará únicamente cuando existan poros, fallas y discontinuidades en el mismo.

Inspección a largo plazo. Se debe establecer un programa de inspección periódica, con la finalidad de contar con un control estadístico de los sistemas de recubrimiento. Para ello, es conveniente que con una periodicidad de un mes, se inspeccionen las áreas recubiertas, en lo referente a posibles efectos de corrosión, pérdida de adherencia, ampollamiento, caleo y comportamiento general.

6

Operación de la conducción

6.1. Vaciado accidental a gasto nulo

Este tipo de vaciado ocurre en tramos de la conducción que presentan curva vertical ubicada en puntos más altos que el tanque de descarga (ver Ilustración 6.1), cuando la operación es interrumpida por un paro accidental (corte de energía, daños en la conducción, entre otros), generándose por efecto de la gravedad y la topografía la división de la columna de agua a partir de la válvula de admisión y expulsión de aire.

El aire introducido al retroceder el agua, hace necesario un llenado cuidadoso de la conducción cuando se reinicie la operación, razón por la cual deberán evitarse vaciados accidentales, lo cual se logra con la colocación de válvulas de no retorno controladas, una después de la bomba y la otra aguas abajo del punto A, esta última ubicada a un nivel inferior al nivel de superficie libre del tanque de entrega (ver Ilustración 6.2).

Los tiempos de cierre de las válvulas de no retorno están relacionados con fenómenos transitorios en la conducción ante los cambios del gasto, problemática que deberá ser considerada en el diseño.

Otro problema que puede generarse a partir de la solución propuesta para el vaciado accidental, es la sobrepresión a gasto nulo, que ocurre cuando la válvula de control aguas abajo del punto A no abre

Ilustración 6.1 Vaciado accidental a gasto nulo (adaptado de Guarga *et al.* 1985)

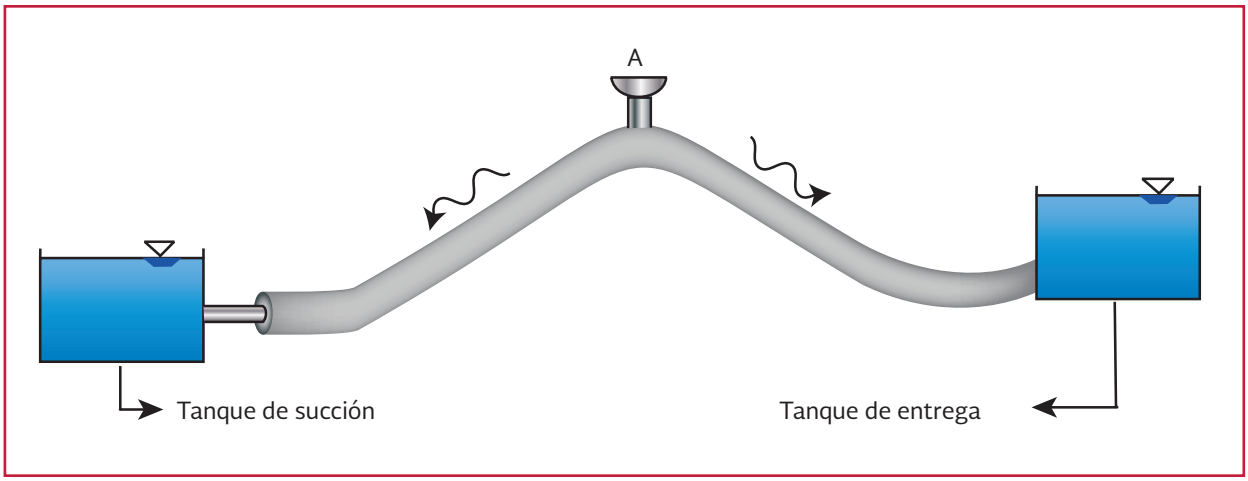
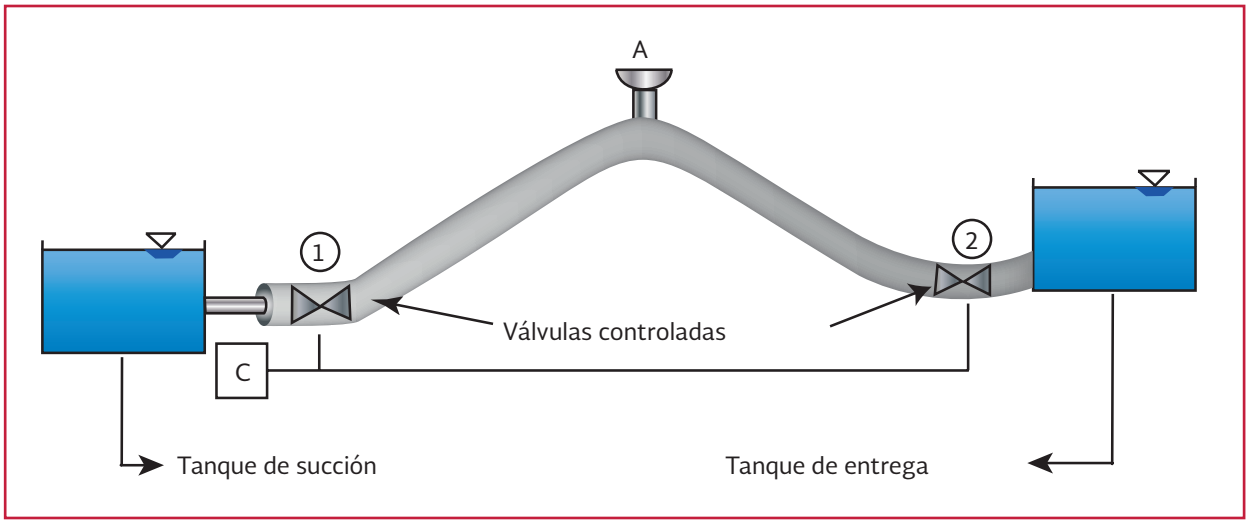


Ilustración 6.2 Ubicación de válvulas para controlar el vaciado accidental a gasto nulo (adaptado de Guarga *et al.* 1985)



cuando las bombas entren en operación. En consecuencia, las presiones en la conducción podrían ser mucho más altas que las de trabajo, con el riesgo de producir un accidente de gran magnitud.

La anterior situación puede solucionarse con la implementación de sistemas de vertido en la conducción, tales como, cajas vertedoras o válvulas de alivio (ver Ilustración 6.3). Los sistemas de vertido controlan la sobrepresión y evitan vertidos accidentales al hacer un vertido programado cuando la presión en la línea supere un valor preestablecido en un punto determinado.

6.2. Vaciado accidental de gasto parcial

La necesidad de operar la conducción con gastos menores al de diseño Q y el arranque uno por uno de los equipos de bombeo en plantas con bombas en paralelo, son las principales causas que inducen el vaciado accidental a gasto parcial Q'.

La operación del acueducto a gasto parcial Q' puede presentar una piezométrica que corte el perfil de la conducción (ver Ilustración 6.4), en cuyo caso queda un tramo en depresión que

Ilustración 6.3 Estructura vertedora (adaptado de Guarga *et al.* 1985)

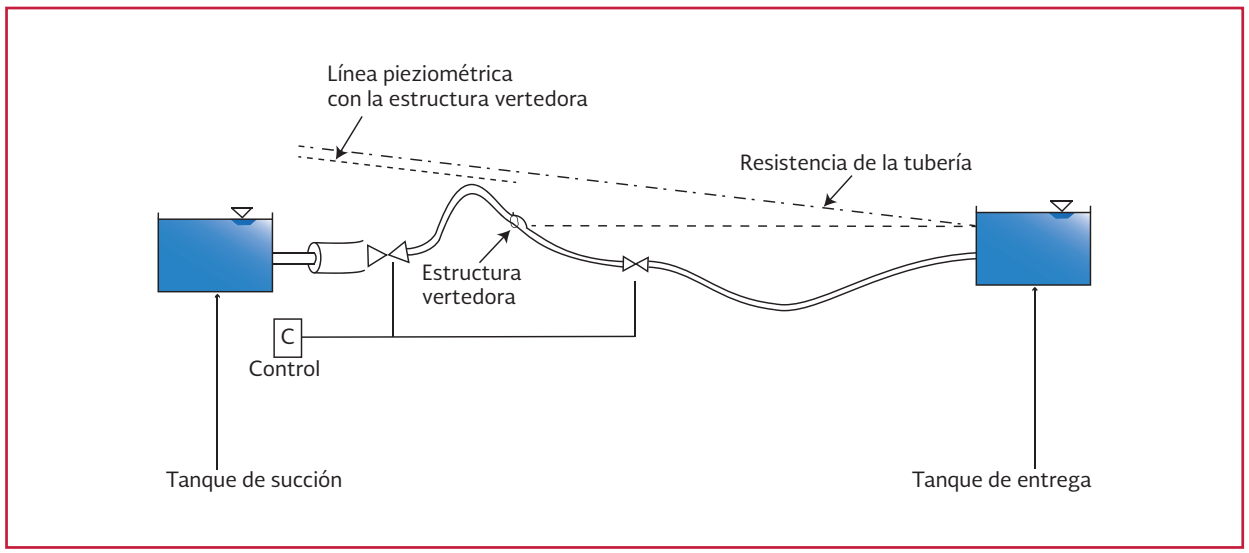
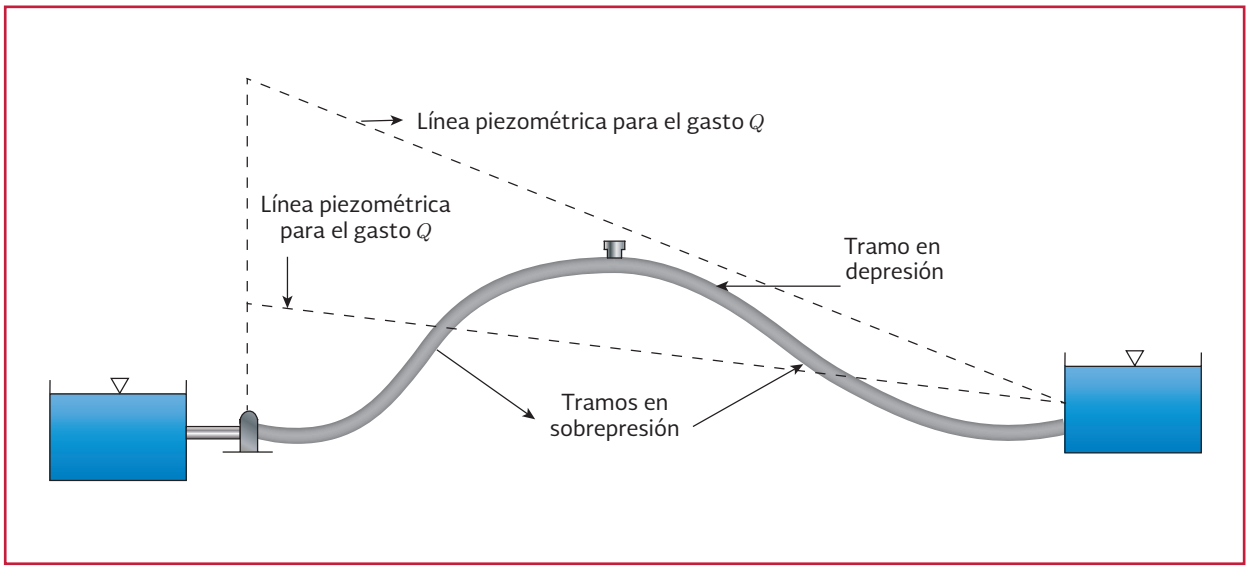


Ilustración 6.4 Vaciado accidental a gasto parcial (adaptado de Guarga *et al.* 1985)



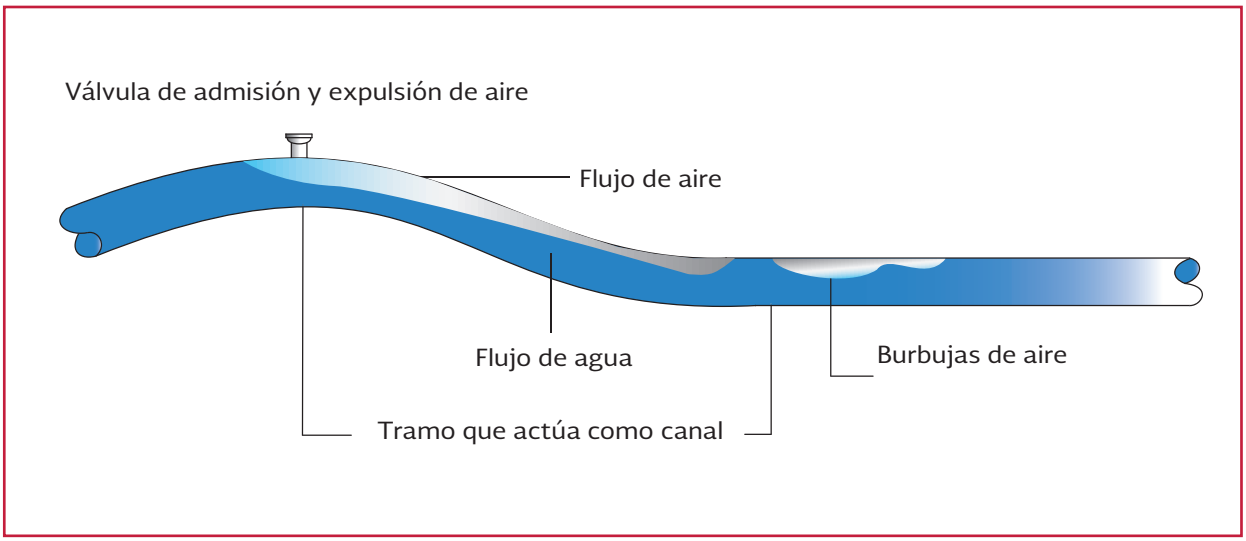
hace necesaria la entrada de aire por las válvulas de admisión y expulsión.

Lo anterior genera que el tramo inmediato aguas abajo de la válvula de admisión y expulsión de aire, opere como canal (ver Ilustración 6.5) induciendo un flujo de aire por arrastre en la parte superior del conducto.

El aire introducido, al pasar a la zona de sobrepresión se transforma en burbujas que generarán perturbación en la conducción, hasta ser expulsadas por las válvulas de admisión y expulsión. Estas perturbaciones no presentan mayores problemas, si el gasto parcial Q' es menor que el gasto máximo de llenado Q_{max} (Guarga *et al.* 1985), en caso contrario pueden presentarse fuertes ondas de sobrepresión que se propagarán en la conducción.

La operación del sistema a gasto parcial es necesaria por diversas razones. No obstante, por la nocividad de sus efectos deberá evitarse desde el diseño el vaciado accidental a gasto parcial.

Ilustración 6.5 Operación como canal de una sección (adaptado de Guarga *et al.* 1985)



Una solución a este problema es la implementación de orificios disipadores de energía, que al sobreelevar la piezométrica eliminan los tramos en depresión evitando así el vaciado accidental (ver Ilustración 6.6). El cálculo de la pérdida de carga para un orificio en la practica se calculan conforme a la Norma ISO 5167-1, el proyectista se debe apegar a esta normatividad.

La implementación de los orificios para cada gasto parcial se hace sobre ramales paralelos al eje del acueducto.

6.3. Operación de bombas

En la operación de las bombas, la energía entregada al fluido bombeado por unidad de peso es H_B se denomina carga dinámica total con unidades mca. Esta carga H_B es función del gasto Q que se bombea y de la velocidad angular N del rotor del equipo.

$$H_B = H_B(Q, N) \qquad \text{Ecuación 6.1}$$

La operación estacionaria de una bomba puede ser descrita a partir de las curvas de: carga dinámica total H_B, eficiencia η y carga neta positiva en la succión CNPS (ver Ilustración 6.7).

La operación en paralelo de varias bombas puede representarse a partir de las curvas características de ellas en un diagrama H_B-Q; el cual se obtiene al trazar las curvas características en forma consecutiva multiplicando las abscisas por un factor igual al número de equipos en paralelo, ver Ilustración 6.8. Para representar la operación de las bombas en serie se multiplican las ordenadas, ver Ilustración 6.9.

En una línea de conducción, la carga dinámica total H_B integrada por h_f carga de fricción y H_e carga de elevación, da origen a la denominada curva característica de la conducción, que de forma aproximada puede ser expresada como:

$$H_B = H_e + KQ^2 \qquad \text{Ecuación 6.2}$$

donde:

K = Valor para cada conducción, en función de geometría y Re

Ilustración 6.6 Ubicación de orificios disipadores en flujos con gasto parcial (adaptado de Guarga *et al.* 1985)

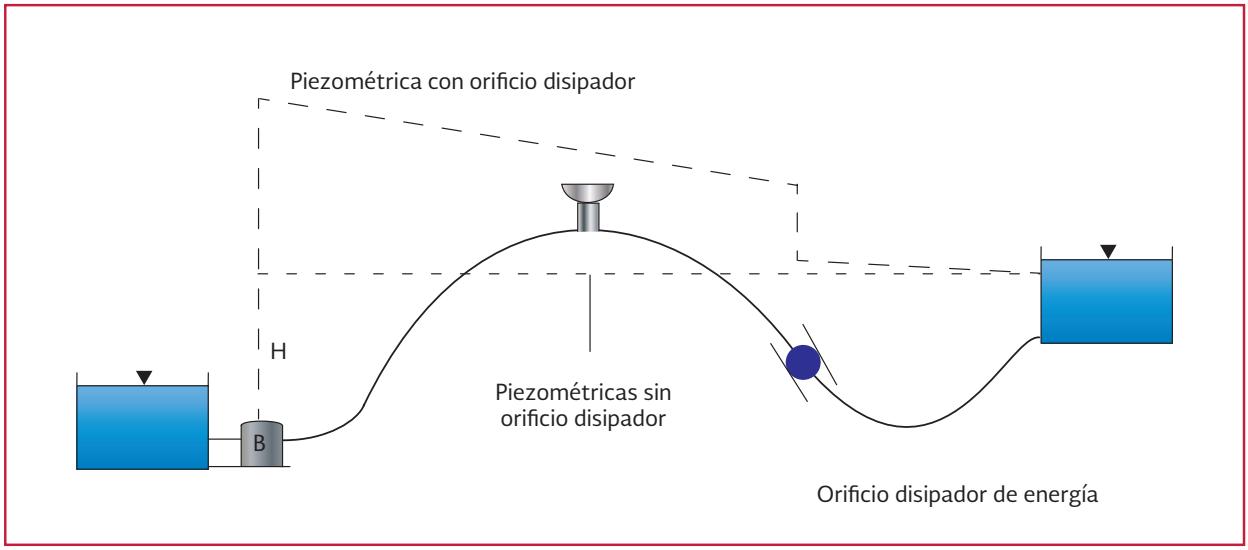


Ilustración 6.7 Curvas descriptivas de la operación de la bomba (adaptado de Mays, 2000)

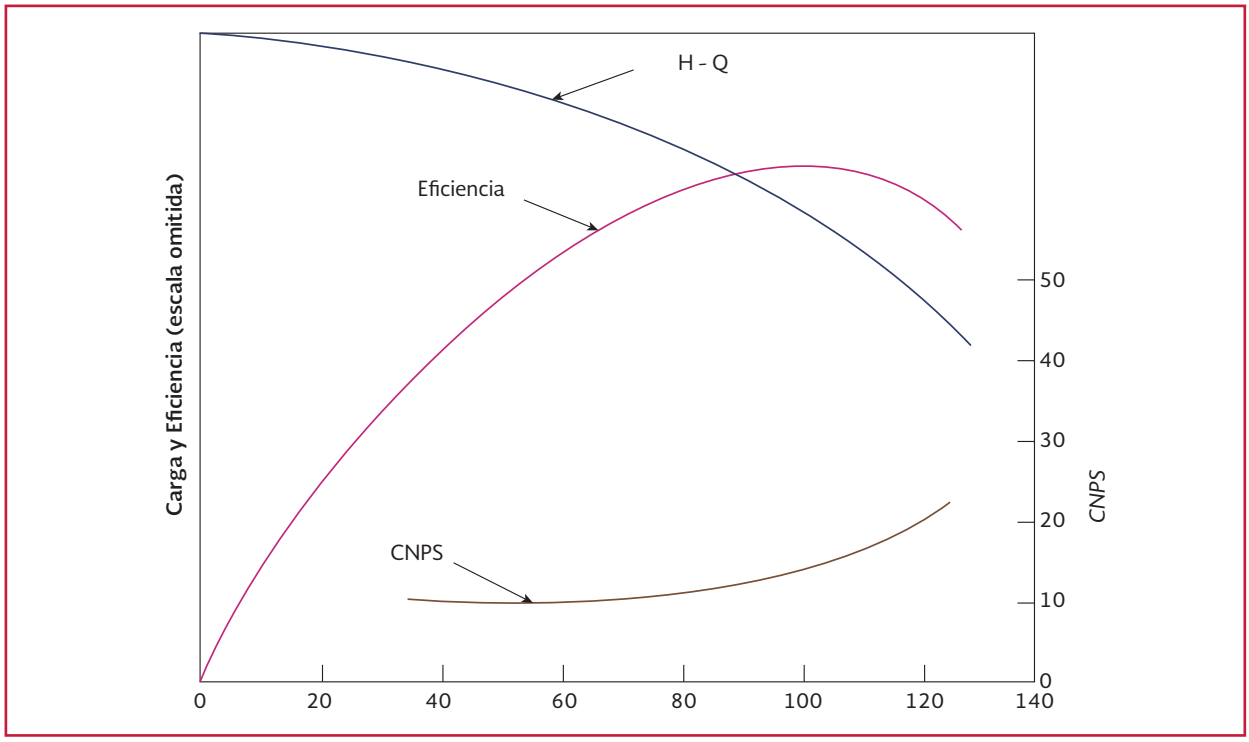


Ilustración 6.8 Bombas operando en paralelo (Mays, 2000)

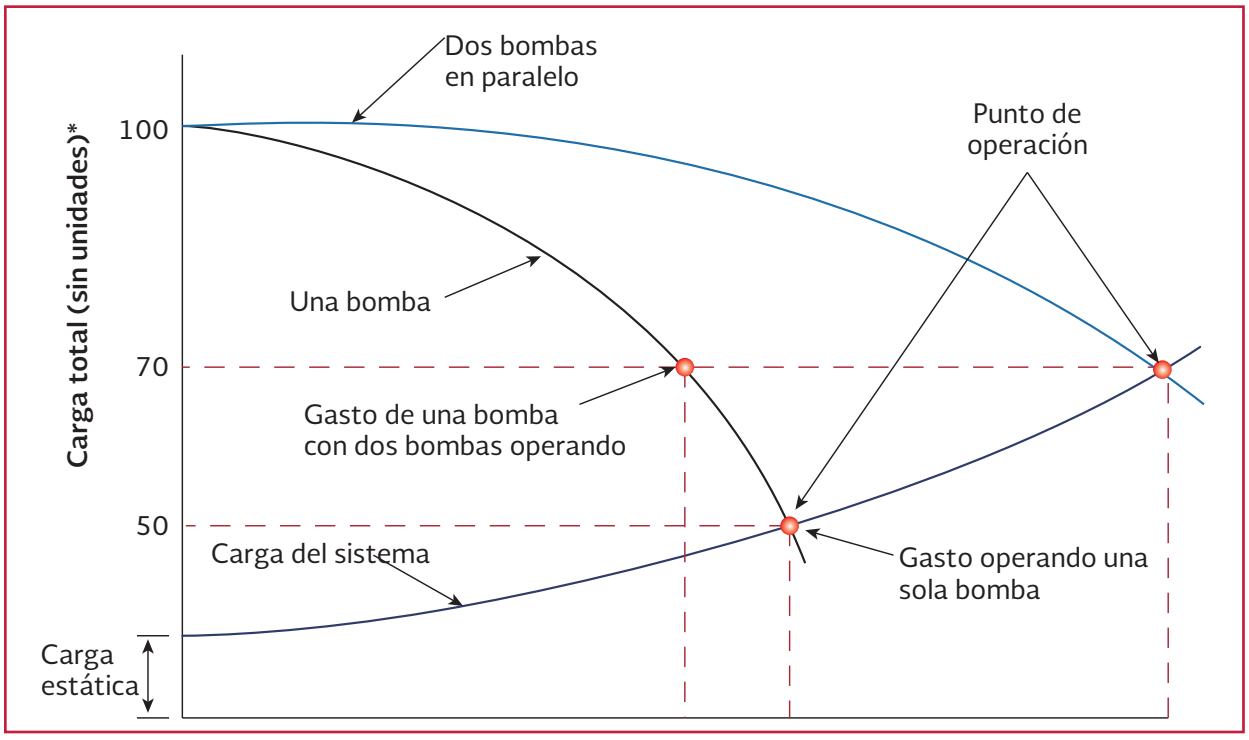
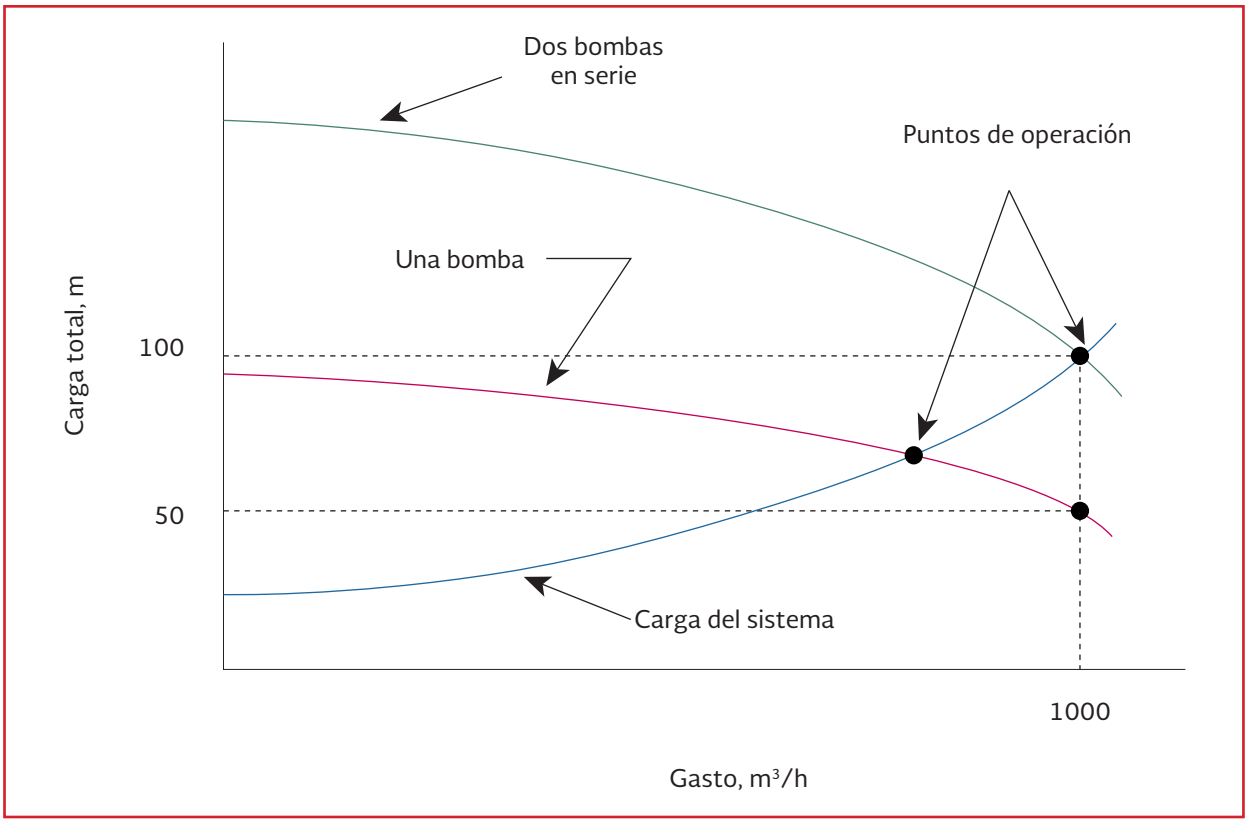


Ilustración 6.9 Curva característica de dos bombas en serie (ANSI/HI 1.3)



H_e = Carga de elevación (m)

Q = Gasto que transporta la conducción (m^3/s)

En la Ilustración 6.10 se muestra una curva típica de descarga en función de la velocidad de rotación.

La maniobra de arranque para acueductos grandes con operación de bombas en paralelo se realiza una a una, lo que implica gastos parciales, donde la eficiencia real de trabajo para una bomba o dos es significativamente menor que la eficiencia para gasto máximo de diseño.

Una situación similar se tiene al comparar las curvas de eficiencia, carga neta positiva en la succión y característica de una bomba contra la curva característica de la conducción (ver Ilustración 6.11). Se observa por ejemplo, que la CNPS requerida aumenta mientras que la eficiencia η disminuye con relación al punto de máxima eficiencia de la bomba. Esta situación puede dejar fuera de rango a la CNPS imposibilitando el arranque de la bomba.

Para solucionar esta problemática, desde el diseño se procede de manera conveniente, en principio, con equipos de bombeo bien seleccionados que cubran todas las condiciones que imponga la conducción.

Una segunda solución, dada la imposibilidad de la anterior, sería un aumento en el diámetro de la tubería, lo que disminuye la relación h_f/H_B y en consecuencia K, teniendo así menor separación de los puntos de operación a gasto parcial.

La implementación de orificios disipadores de energía o válvulas de regulación de gasto, permiten el control total de K y la posibilidad de trabajar en los puntos de máxima eficiencia con cada gasto

Ilustración 6.10 Curva típica para una bomba de velocidad variable (adaptado de Mays, 2000)

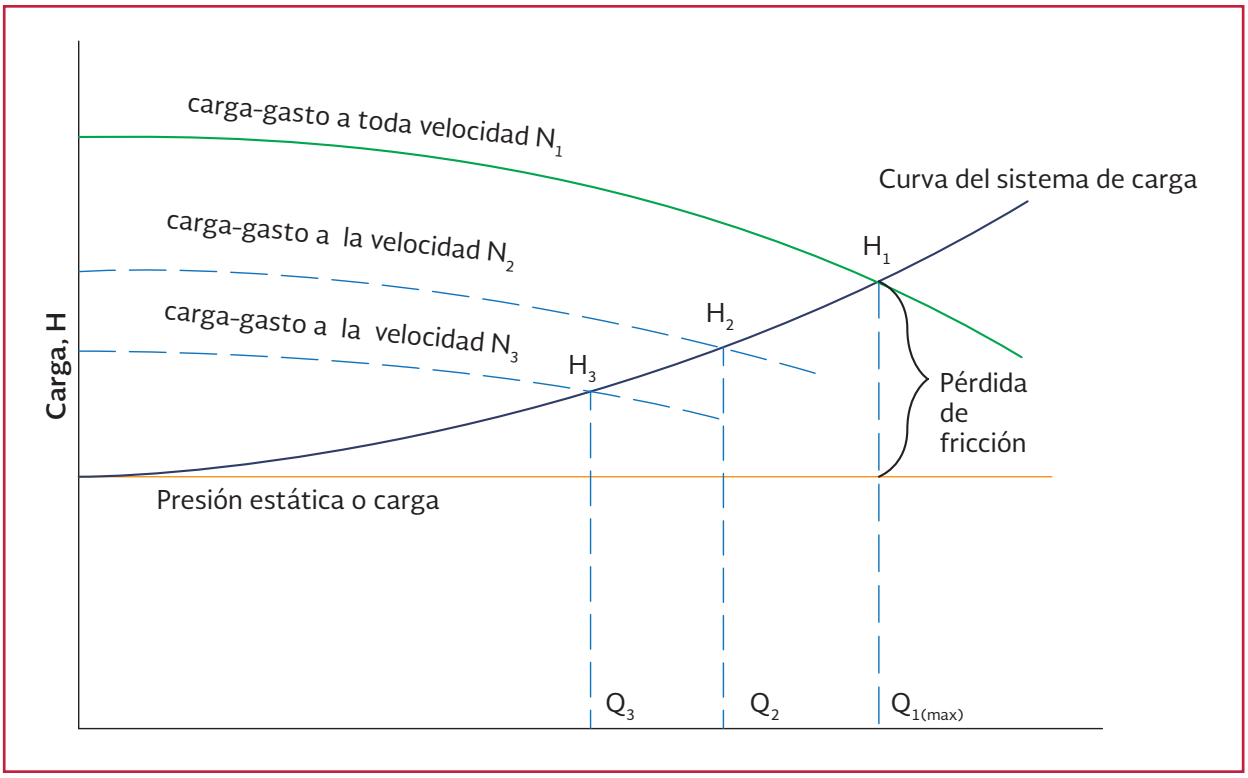
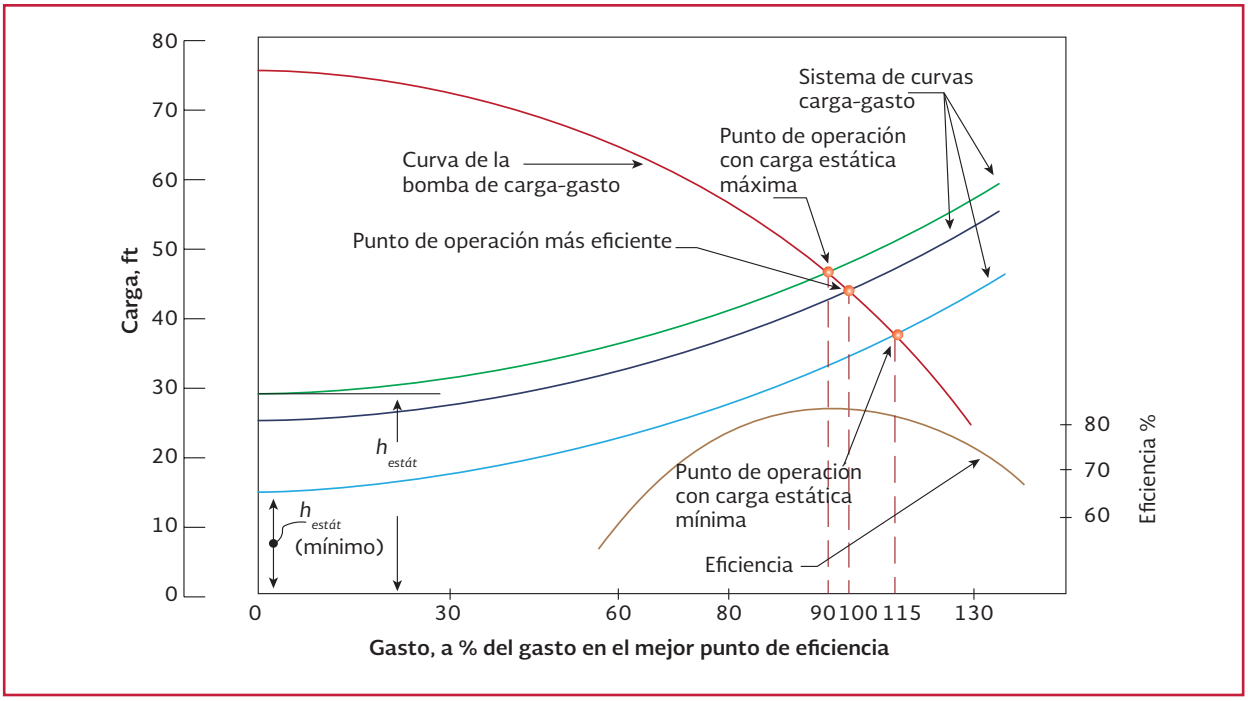


Ilustración 6.11 Determinación de los puntos de operación para una sola velocidad de la bomba con variación de los valores de h_{stat} (Mays, 2000)



parcial, en consecuencia disminuya el rendimiento global del sistema que sería lo menos deseable.

El uso de orificios debe determinarse fehacientemente, lográndose a través de la relación de consumo de energía *RCE*:

$$RCE = \frac{\frac{\gamma_s H_s Q_s t_s}{\eta_s}}{\frac{\gamma_d H_d Q_d t_d}{\eta_d}} \qquad \text{Ecuación 6.3}$$

donde el subíndice *s*, corresponde a la carga *H*, el gasto *Q*, al tiempo *t* y a la eficiencia mecánica η de la energía consumida sin disipación adicional. Por su parte el subíndice *d* corresponde a los componentes de la energía con disipación ocasionada por el uso de orificios o válvulas de regulación.

El producto $\gamma_s Q_s t_s = \gamma_d Q_d t_d$ por lo que estas variables se eliminan y resulta

$$RCE = \frac{H_s \eta_d}{H_d \eta_s} \qquad \text{Ecuación 6.4}$$

Un dispositivo disipador de energía sólo se justifica cuando *RCE* > 1, dicho de otra manera cuando:

$$\frac{\eta_d}{\eta_s} > \frac{H_d}{H_s} \qquad \text{Ecuación 6.5}$$

7

Válvulas

En este apartado se mostrarán de manera general las particularidades que se deben tomar en cuenta para la consideración de las diversas válvulas existentes cambien se puede consultar el libro de *Cálculo y diseño de instalaciones electromecánicas y Selección de equipo y materiales electromecánicos del MAPAS*.

Debido a la diversidad de los elementos que existentes en el mercado, se recomienda verificar que cumplan con la normatividad aplicable vigente.

7.1. Generalidades

Entre otros los servicios que ofrecen las válvulas son: regulación de flujo y presión, evitar el retroceso del flujo a través de las bombas, control del aire por medio de la admisión o eliminación, protección por sobrepresiones en tuberías y bombas, y ayudar en la prevención de transitorios (Tullis, 1989).

Existe una amplia variedad de tipos de válvulas para ser usadas con diferentes propósitos, la Tabla 7.1 divide a las válvulas en cuatro categorías:

1. Válvulas de control
2. Válvulas reguladoras de presión
3. Válvulas de no retorno
4. Válvulas de admisión y expulsión de aire

7.2. Válvulas de control

Estas válvulas tienen la función de controlar las velocidades y presiones del flujo en las conducciones; dentro de este grupo existen válvulas para aislar, regular o seccionar tramos de la conducción. El control del flujo que proveen se debe hacer sin generar transitorios, cavitación excesiva y grandes pérdidas de carga.

Dentro de la clasificación se encuentran válvulas de: mariposa, cono, tapón, globo y compuerta. La Tabla 7.1 hace una breve descripción de éstas.

En la selección y dimensionamiento de las válvulas de control, deberán observarse los siguientes razonamientos:

a) Especificar un programa de operación, incluyendo un tiempo de cierre que no produzca transitorios peligrosos para la línea
b) Seleccionar el tipo y tamaño que no produzca pérdidas excesivas cuando opere totalmente abierta
c) Evitar cavitación excesiva, diseñándose la válvula para que resista la cavitación
d) No operar las válvulas con aberturas in-

Tabla 7.1 Descripición de válvulas de uso frecuente (adaptado de Tullis, 1989)

Tipo de válvula	Función
Válvulas de control	
Disipación de energía y control de cavitación	Controlan el flujo y disipan los excesos de energía, además de limitar la cavitación a niveles aceptables
Seccionamiento	Para aislar bombas o secciones de tubería para mantenimiento
Válvulas reguladoras de presión	
Aliviadora de presión	Protegen a la tubería de presiones excesivas
Reductora o sostenedora de presión	Mantienen constante la presión en la conducción, se activa hidráulicamente
Anticipadora de transitorio	Protege anticipadamente de sobrepresiones generadas por el transitorio, al activarse cuando se inicia éste
Válvulas de no retorno	Impiden el retroceso del flujo
Válvulas de aire	
Válvulas de admisión y expulsión	Admiten y expulsan aire durante el vaciado y llenado respectivamente
Válvula eliminadora de aire	Eliminan el aire que contiene el agua en solución y que al separarse se acumula en los puntos altos del perfil

feriores a 10 por ciento para cualquier tipo de válvula, en el caso de válvulas de mariposa se recomienda hasta 30° de apertura o cierre

En general se recomienda revisar las especificaciones de los mismos fabricantes para verificar la operación y manejo de las válvulas seleccionadas.

7.2.1. Características hidráulicas de las válvulas de control

Coeficiente de flujo. La presión actuante en la válvula es proporcional al cuadrado de la velocidad de descarga, la única diferencia entre las pérdidas por válvula y otras locales es que los coeficientes de pérdidas en las válvulas varían con la abertura de éstas. En algunas válvulas principalmente pequeñas, se tiene una variación con el número de Reynolds. No obstante, sólo para situaciones en las cuales las pérdidas de carga en la válvula deban ser cuidadosamente determinadas esto tendría importancia.

La relación entre el flujo y la presión actuante puede ser expresada como un coeficiente de flujo. En seguida se dan los más comunes:

$$K_l = \frac{2g\,\Delta H}{V^2} \qquad \text{Ecuación 7.1}$$

$$C_v = \frac{Q}{\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}} \qquad \text{Ecuación 7.2}$$

$$C_d = \frac{V}{(2g\Delta H + V^2)^{0.5}} \qquad \text{Ecuación 7.3}$$

$$C_{d1} = \frac{V}{(2g\,\Delta H)^{0.5}} \qquad \text{Ecuación 7.4}$$

$$C_{df} = \frac{V}{(2g\,H_u)^{0.5}} \qquad \text{Ecuación 7.5}$$

donde:

ρ	=	Gravedad específica del fluido
$\Delta H = \Delta P$	=	Incremento de presión
H_u	=	Carga de presión aguas arriba de la válvula
V	=	Velocidad del flujo

Con excepción de la Ecuación 7.1, las demás son dimensionales, las unidades en SI son: g=9.81 m/s^2, ΔH en m, V en m/s y Q en m^3/s. En la Ecuación 7.2 el gasto Q está dado en gpm y ΔP en psi.

En la comparación de coeficientes de flujo de válvulas idénticas de diferentes tamaños, K_l, C_d y C_{dl} serán iguales para fines prácticos. C_v puede ser escalada de una válvula con diámetro d_2 a una con d_1 utilizando.

$$C_{v1} = C_{v2}\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \qquad \text{Ecuación 7.6}$$

Los coeficientes de flujo de las válvulas varían con el tipo de válvula, así también, dentro del mismo tipo por cambios menores en el diseño. Por lo tanto es importante tener información específica de la válvula a través de los fabricantes.

Válvula en función del sistema de pérdidas

Al seleccionar una válvula de control, es necesario analizar su comportamiento como parte del sistema y no como un dispositivo aislado, pues la misma válvula instalada en diferentes sistemas tendría porcentajes totalmente diferentes de flujo contra aperturas de la válvula.

7.2.2. Válvulas de mariposa

Una válvula de mariposa (Ilustración 7.1a), consiste básicamente de un disco que gira sobre un eje 90 grados para pasar de totalmente abierta a totalmente cerrada. Existen discos de diseños variados; entre otros están los simétricos, asimétricos, excéntricos y de flujo libre. La forma del disco influye en la capacidad del flujo y en el par requerido para accionar la válvula.

El uso de esta válvula se ha incrementado en la actualidad debido a su funcionamiento adecuado, tamaño compacto, ligereza y bajo costo. Es adecuada para regular el flujo por estrangulamiento, así como, para trabajar totalmente cerrada o abierta. Con discos diseñados para aumentar la capacidad de flujo la válvula mariposa se acerca a la de compuerta en la posición totalmente abierta. La cavitación y el par pueden ser controlados por medio del diseño del disco.

En su fabricación se utilizan diversos materiales para el cuerpo, el disco o la base, con la finalidad de adecuarse a cualquier líquido. El diseño de la mayoría de las válvulas de mariposa no es adecuado para estrangulamiento severo (superior al 70 por ciento) del flujo en la conducción. El uso más frecuente de éstas es para agua y aire, sin embargo no son adecuadas para aguas residuales o aguas con arenas, porque la parte inferior del eje que soporta el disco acumula arena y genera excesiva abrasión.

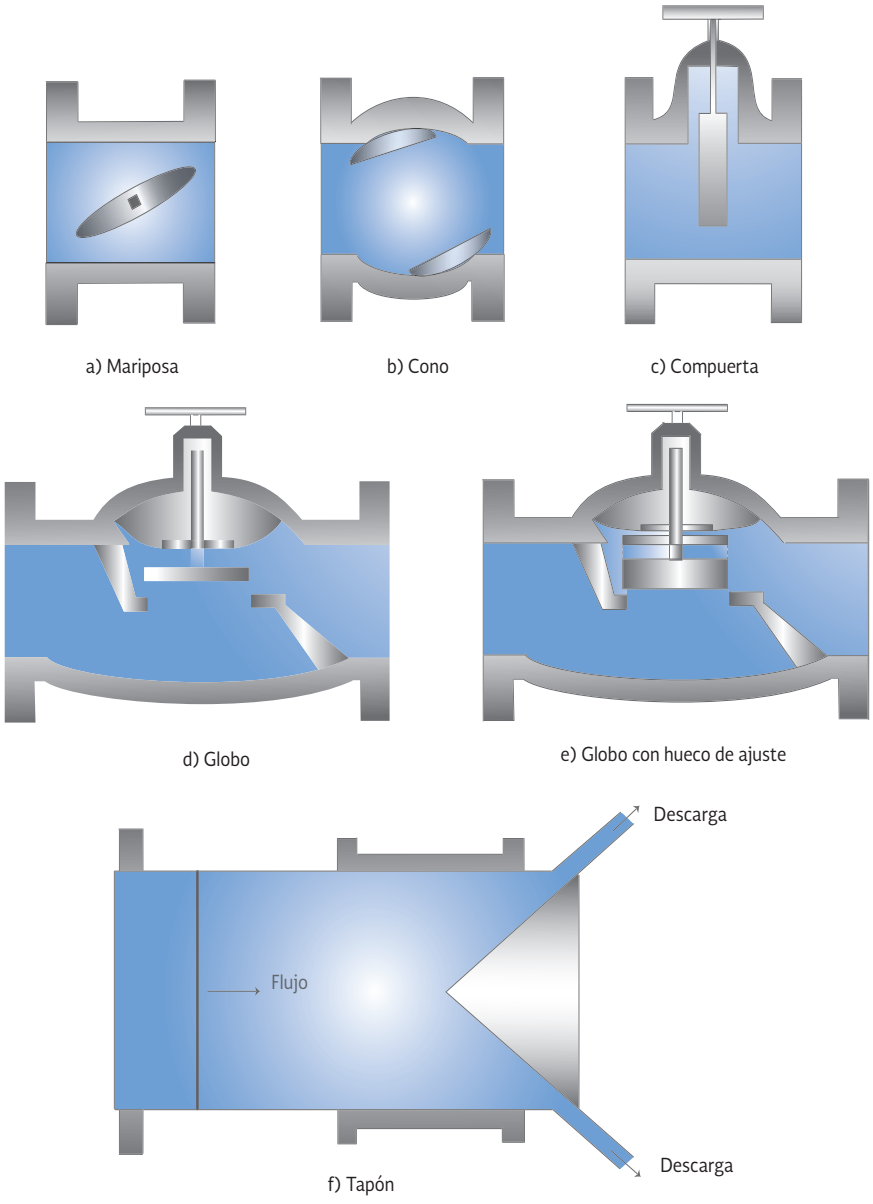
7.2.3. Válvula de cono

En las válvulas de cono el obturador es un tapón de forma cónica, el cual es elevado al principio, posteriormente el mecanismo lo mueve a una nueva posición hasta alcanzarla, en ese momento el tapón es reacomodado para generar un sello (ver Ilustración 7.1 b).

Esta válvula tiene excelentes características en el control de energía para el buen funcionamiento de las bombas.

En la versión de flujo en orificio libre, éste pasa por un diámetro igual al de la tubería, cuando

Ilustración 7.1 Válvulas de control (adaptado de Tullis, 1989)



la válvula está totalmente abierta, lo que permite que no haya pérdidas ocasionadas por ésta. Para aberturas intermedias hay dos orificios de estrangulamiento uno en la entrada y el otro en la salida del tapón, lo que da a la válvula de cono mejores características contra la cavitación que las de compuerta o mariposa. Sin embargo su mecanismo de operación requiere mantenimiento especializado.

7.2.4. Válvula de tapón

Las válvulas de tapón contienen un tapón cilíndrico con un cortador en éste. Se requiere un giro de 90 grados para que el tapón pase de totalmente abierto a totalmente cerrado. El diseño de la base del tapón no permite la acumulación de arena, evitando de esta manera el desgaste. Las válvulas de tapón pueden obtenerse con tapón de orificio libre o con orificios de áreas reducidas.

Estas válvulas pueden ser del tipo lubricadas o no lubricadas, la más utilizada es del tipo no lubricada con orificio rectangular o redondo. En las válvulas lubricadas el lubricante utilizado deberá cumplir con las normas nacionales e internacionales para abastecimiento de agua. El sistema de lubricación inyecta a presión un lubricante semisólido en la parte superior del tapón y a través de ranuras en la parte inferior, para que de esta manera queden lubricadas las superficies del tapón y la base (Ilustración 7.1 f).

Una válvula de tapón provee un fuerte sello, esta característica la hace adecuada para usarse donde exista gran presión del orden de 1 000 kPa y donde la válvula permanezca cerrada por grandes períodos de tiempo.

7.2.5. Válvula de globo

La válvula de globo es adecuada para una gran variedad de aplicaciones en sus versiones automática y manual. Tiene un disco o tapón que se mueve verticalmente dentro de una protuberancia del cuerpo. La dirección normal del flujo es de izquierda a derecha a través de la válvula, por la acción de dos giros de 90 grados, el primero ascendente y el segundo hacia afuera, de manera que el flujo es controlado por el disco o tapón (Ilustración 7.1d y e).

Las pérdidas de carga y las presiones en este tipo de válvula son mayores que en las válvulas mariposa o las de compuerta, debido a la amplitud de posiciones de apertura en que puede trabajar.

El control puede ser manual o automático. Las válvulas de diámetro pequeño se operan manualmente. Una válvula de globo puede ser adaptada para mantener constante: la presión de entrada, la presión de salida, el porcentaje del flujo y el nivel del tanque de almacenamiento, actúa como una válvula de anticipación a ondas transitorias o una aliviadora de presión.

Esta válvula presenta en la posición totalmente abierta pérdidas más grandes que las de compuerta, cono y mariposa, porque el paso del flujo es complicado; si se adiciona un dispositivo supresor de cavitación, que consiste en uno o más cilindros que contienen muchos orificios pequeños que disipan energía y suprimen la cavitación, mejora el comportamiento al respecto pero las pérdidas para la posición totalmente abierta se incrementan en forma considerable.

El uso más frecuente es donde se requiere estrangulamiento del flujo, tal como, en el control de la presión o flujo.

Las válvulas de globo deben ser utilizadas en aguas claras, nunca deben usarse en agua residual porque sufrirían taponamiento por sólidos.

7.2.6. Válvula de compuerta

Las válvulas de compuerta presentan un cuerpo totalmente hermético donde un disco circular, rectangular o compuerta se desliza perpendicular a la dirección del flujo (Ilustración 8.1c). Los principales subtipos de estas válvulas son: doble disco y de base flexible.

Este tipo de válvulas en la posición totalmente abierta permite el paso de un gasto sólo ligeramente menor que el de la tubería sin válvula instalada, esto debido a que la base y las guías se proyectan hacia dentro del flujo. Por lo anterior estas válvulas tienen gran capacidad de descarga, pequeña presión actuante y pérdidas moderadas.

Las válvulas de compuerta son adecuadas únicamente para aislamiento, es decir, para posiciones totalmente abierta o cerrada. Si se usan para estrangular o regular el flujo pueden ser considerablemente dañadas, ya que una pequeña abertura permite una alta capacidad de flujo que genera a su vez grandes vibraciones.

La válvula de compuerta de doble disco es una de las más utilizadas en conducciones de agua limpia. Cuando la línea es presurizada con valores que exceden 1 700 kPa y la válvula está cerrada, los discos son presionados hacia afuera por dispositivos de ésta, logrando un cierre a prueba de fugas. El uso de estas válvulas para aguas con gran cantidad de sólidos en suspensión es inadecuado.

Las válvulas de compuerta presentan un desnivel en la base, en éste se acumulan sólidos que impiden que la válvula sea completamente cerrada. La válvula de compuerta de base flexible reduce en forma importante este problema porque su base no presenta el desnivel. En este caso el disco tiene un borde de caucho que es directamente apoyado en el cuerpo de la válvula, esta característica la hace adecuada para trabajar con agua que tenga arena, agua residual, así como agua limpia.

Cabe mencionar que su uso está restringido a tuberías cercanas a la horizontal. Estas válvulas pueden cerrar en forma hermética contra presiones de trabajo de 1 380 kPa.

7.3. Válvulas reguladoras de Presión

7.3.1. Válvula aliviadora de presión

Las válvulas aliviadoras de presión son frecuentemente de globo, activadas automáticamente por la presión de la conducción. El objetivo de estas válvulas es abrir rápidamente si la presión excede un valor predeterminado y hacer un cierre lento. Estas válvulas podrían generar serios problemas si no son adecuadamente seleccionadas y operadas.

Si una válvula es sobredimensionada y por esa razón presenta un cierre rápido, generará una elevación transitoria de la presión con la cual se abrirá nuevamente, lo anterior pone en riesgo la propia válvula y las tuberías.

El tiempo de cierre depende de la longitud de la tubería y de la velocidad de la onda. Para predecir en forma segura el transitorio con el cual se determine el tiempo de cierre y apertura de la válvula, deberá utilizarse un programa de cómputo para transitorios.

7.3.2. Válvula reductora de presión

Normalmente es tipo globo, siendo meramente una válvula de control especial; por lo que se aplican los mismos principios de dimensionamiento definidos para las válvulas de control. Se utilizan para mantener una presión constante en la línea.

7.3.3. Válvula anticipadora de onda

Es una válvula con una solenoide que permite detectar en forma anticipada un transitorio, para que ésta abra o cierre automáticamente, evitando así las sobrepresiones que pudieran generarse. Auxilia de manera importante cuando una bomba es parada por la falla de energía eléctrica, en cuyo caso la onda inicial de baja presión actuante en la descarga de la bomba abre la válvula y el dispositivo de alivio de presión, anticipadamente a la subsecuente onda de alta presión, pudiendo reducir significativamente la presión de la onda.

7.4. Válvulas de no retorno

7.4.1. Válvulas de no retorno de giro simple

Es diseñada con un pivote en la parte superior de la periferia del disco (ver Ilustración 7.2e) el cual cierra por gravedad cuando el peso del disco es más grande que las fuerzas dinámicas del flujo. Las características de abertura y cerrado pueden cambiar por rotación del eje, el peso del disco o por adición de contrapesos.

Las válvulas de no retorno de aleta de caucho y de doble compuerta (ver Ilustración 7.2b y c) son diseños alternativos de las de giro simple. En la primera la aleta no pivotea de un perno porque es flexible, además la base presenta un ángulo que permite un giro corto. En la de doble puerta, el disco es dividido en dos de manera que se tienen giros más cortos para cada puerta.

7.4.2. Válvula de no retorno de disco inclinado

También depende de la gravedad para cerrar (Ilustración 8.2f), aunque en ésta el disco tiene un giro más corto, ya que el eje de rotación se encuentra justamente por arriba del centro del disco.

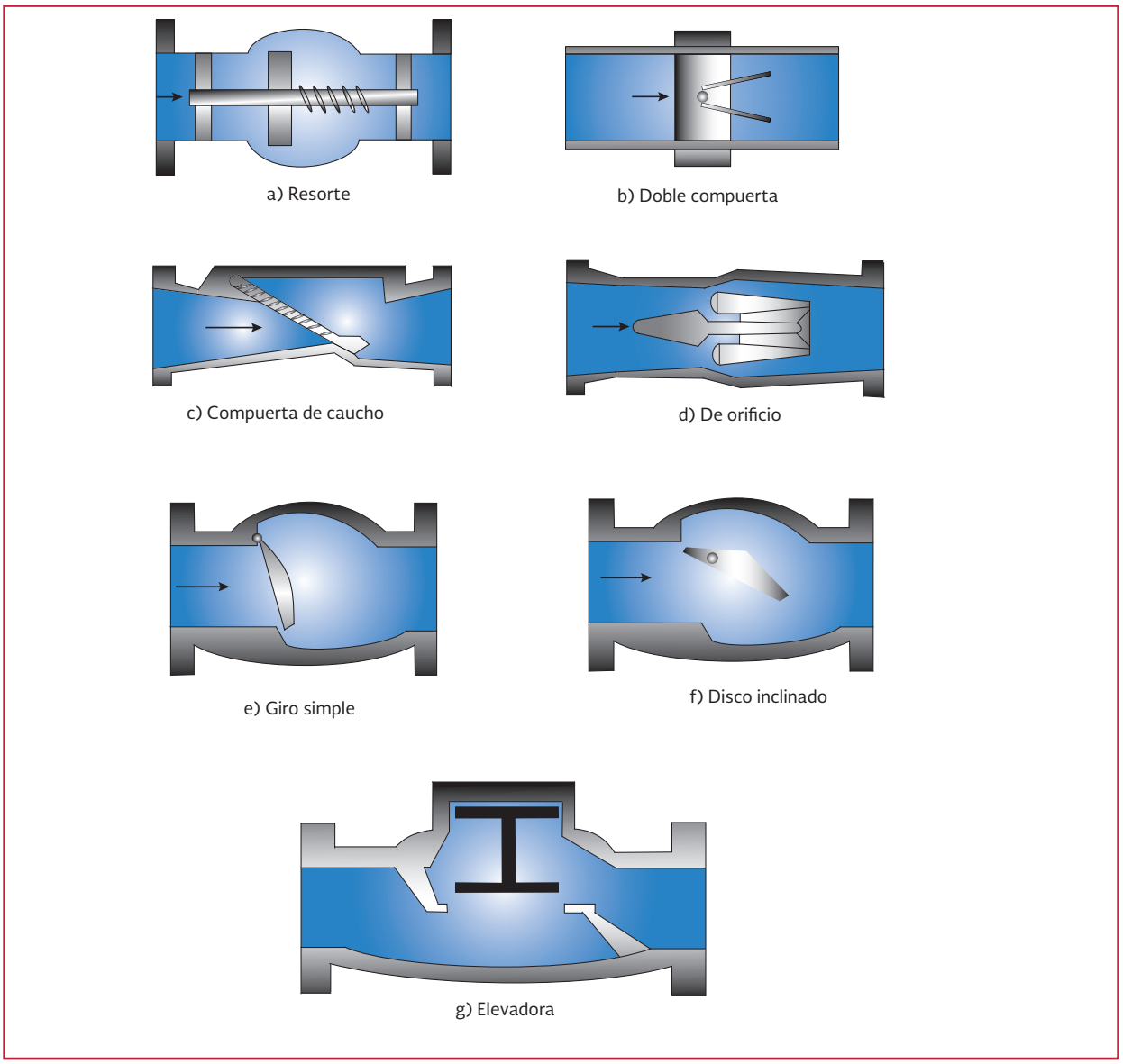
7.4.3. Válvula de no retorno elevadora

Tiene un flotador que es elevado cuando la fuerza dinámica del fluido excede su peso (ver Ilustración 7.2g).

7.4.4. Válvulas de no retorno de resorte y de orificio

Presentan cierres más rápidos (ver Ilustración 7.2a y d), en el primer caso el resorte impulsa al disco contra el flujo, de tal forma que cuando la fuerza del resorte es mayor que la del flujo se produce un cierre rápido. En la válvula de orificio se tienen cierres excepcionalmente rápidos porque ésta solo hace un desplazamiento corto para cerrar, además su forma aerodinámica ofrece poca resistencia al flujo.

Ilustración 7.2 Válvulas de no retorno (adaptado de Tullis, 1989)



En la selección de válvulas de no retorno, deberá considerarse que éstas tengan un coeficiente de pérdidas aceptable en flujo hacia adelante y que no generen transitorios al cerrar. Para un sistema donde la velocidad del flujo es lenta, las válvulas de no retorno cerrarán antes que ocurra un flujo en retroceso de magnitud significante.

Para una válvula dada, la máxima velocidad está en función del porcentaje de flujo en retroceso, siendo dicho porcentaje diferente para cada sistema. La velocidad del flujo en reversa y la elevación asociada de carga por transitorio varía con el tipo de válvula, tamaño y dinámica del sistema. Cuando no hay flujo en el sistema, la válvula permanece cerrada o casi cerrada debido a la gravedad, un resorte o una combinación de ambos. Al iniciarse el flujo las fuerzas hidrodinámicas abren la válvula.

La proximidad de piezas especiales u otras válvulas que alteran el flujo, constituyen un

importante factor que afecta la estabilidad del disco. Si un codo u otra situación que genere disturbio es localizada a corta distancia aguas arriba, la inestabilidad del flujo puede causar que el disco oscile, causando ondas en el sistema.

7.5. Válvulas de aire

Para que una conducción presente un comportamiento adecuado en condiciones normales de flujo requiere de válvulas que controlen el aire (ver Ilustración 7.3), tanto en llenado y vaciado como en operación a flujo establecido.

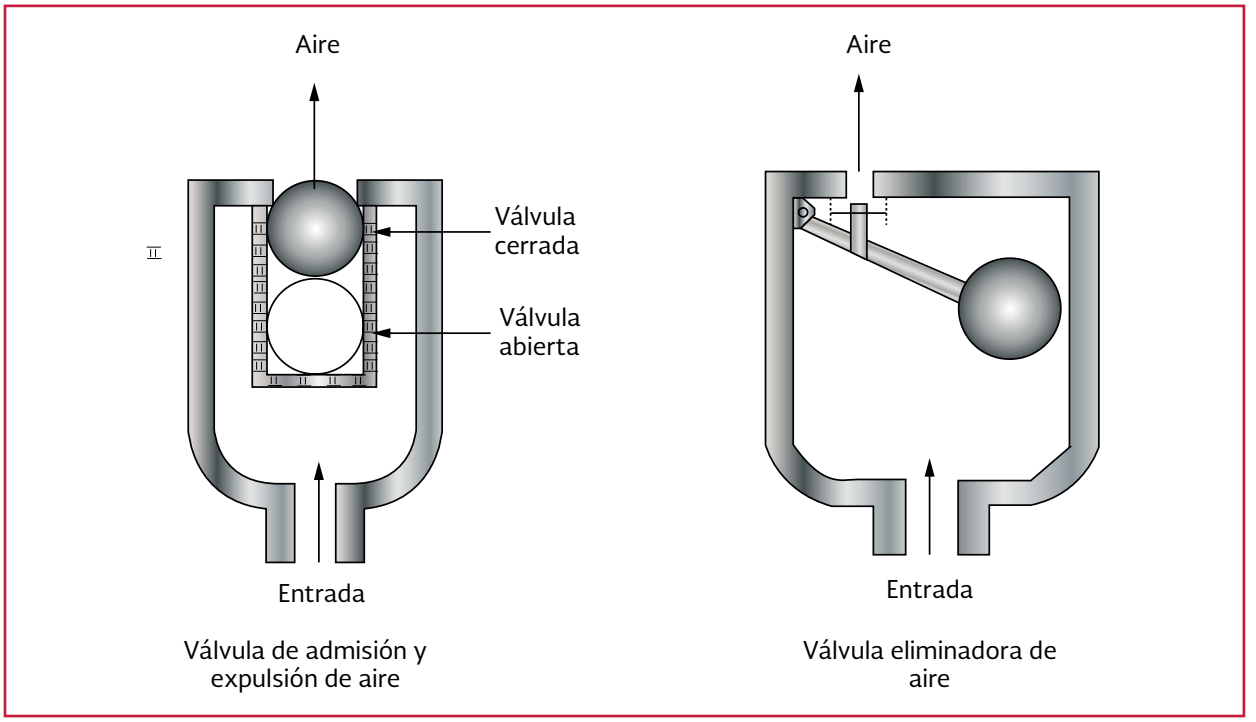
Cuando la conducción se llena es necesario expulsar el aire existente para evitar sobrepresiones y cuando se vacía es necesario admitir aire para evitar subpresiones que pongan en peligro la tubería. El agua en condiciones ordinarias contiene aproximadamente un dos por ciento de aire disuelto. La presión en la tubería y la temperatura rigen la solubilidad del aire por lo que en los puntos altos del perfil de la línea éste se separa y queda atrapado, haciendo necesaria su eliminación.

Para resolver la problemática descrita existen dos tipos de válvulas de aire: 1) Válvula de admisión y expulsión de aire, y 2) Válvula eliminadora de aire, aunque puede resultar un tercer tipo al superponer los efectos de las dos anteriores.

7.5.1. Válvulas de admisión y expulsión de aire

Estas válvulas (ver Ilustración 7.3) generalmente tienen grandes orificios ($^1/_2$" a 16" o mayores de acuerdo a cada fabricante) para expulsar

Ilustración 7.3 Válvulas de aire (adaptado de Tullis, 1989)



o admitir importantes cantidades de aire en las operaciones de llenado y vaciado respectivamente. Para la selección de otros diámetros se puede consultar el libro de *Selección de Equipos y Materiales Electromecánicos* y *Calculo y Diseño de Instalaciones Mecánicas del MAPAS* . Deberán ubicarse en los puntos altos del perfil (cercanos al gradiente hidráulico) y su montaje debe hacerse vertical sobre el lomo de la tubería. En tramos largos horizontales o con pendiente ascendente deberán colocarse a intervalos de 500 a 1000 m.

Contienen un flotador que permanece abajo por gravedad cuando la tubería está vacía o presenta depresión. Cuando la tubería es presurizada entra el agua en la válvula y eleva el flotador hasta sellar el orificio mientras la línea permanezca presurizada no podrá reabrir, para eliminar el aire que pueda acumularse subsecuentemente, siendo necesaria en estos casos la válvula eliminadora.

7.5.2. VÁLVULAS ELIMINADORAS DE AIRE

Este tipo de válvula (ver Ilustración 7.3) presenta un orificio pequeño (1/2" o menor), por el cual se eliminan pequeñas cantidades de aire acumuladas en los puntos altos de la línea, cuando opera a flujo establecido. Los orificios de la válvula son controlados por un émbolo activado por un sistema de flotación.

La acumulación de aire en el cuerpo de la válvula hace que el flotador baje y se abra el orificio, con lo cual el aire es eliminado y el flotador vuelve a subir permitiendo el cierre del orificio.

Cabe mencionar que las funciones de las válvulas eliminadoras de aire y de admisión y expulsión son requeridas en varios tramos de la conducción, en función de:

1. El perfil del acueducto
2. La frecuencia de llenado y vaciado
3. La cantidad de aire que es necesario admitir
4. La resistencia de la tubería al colapso por depresiones o sobrepresiones.

Esto se soluciona con la instalación en paralelo de las válvulas de admisión-expulsión y eliminadora, generando un tercer tipo denominado válvula combinada. La instalación puede hacerse separada o conectadas.

8

Conducciones a superficie libre

En este capítulo se expondrán los conceptos básicos y algunas recomendaciones generales para el trazo y diseño de un canal de conducción de agua, así también se mostrarán los tipos de flujo que se pueden presentar en un canal y algunos ejemplos básicos para determinar el perfil de un flujo.

El flujo en un canal se produce, principalmente, por la acción de la fuerza de gravedad y se caracteriza porque expone una superficie libre a la presión atmosférica.

El movimiento de un líquido a superficie libre se ve afectado por las mismas fuerzas que intervienen en el flujo dentro de un tubo, a saber:

- La fuerza de gravedad, como la más importante en el movimiento
- La fuerza de resistencia ocasionada en las fronteras rígidas por la fricción y la naturaleza casi siempre turbulenta del flujo
- La fuerza producida por la presión que se ejerce sobre las fronteras del canal, particularmente en las zonas donde cambia su geometría
- La fuerza debida a la viscosidad del líquido, de poca importancia si el flujo es turbulento

A éstas se agregan, excepcionalmente, las siguientes:

- La fuerza de tensión superficial, consecuencia directa de la superficie libre
- Las fuerzas ocasionales debidas al movimiento del sedimento arrastrado

La superficie libre se considera como la intercara entre dos fluidos: el superior, que es el aire estacionario o en movimiento, y el inferior, que usualmente es agua en movimiento. Las fuerzas de gravedad y de tensión superficial resisten cualquier fuerza tendiente a distorsionar la intercara, la cual constituye una frontera sobre la que se tiene un control parcial.

La aparente simplicidad resultante de la superficie libre es irreal, ya que su tratamiento es, en la práctica, más complejo que el conducto a presión. La interacción entre las fuerzas da lugar a la complejidad, y únicamente a base de simplificaciones y generalizaciones es posible su mecánica.

8.1. Canales

Los canales son conductos de gran desarrollo, abiertos o cerrados, en los cuales circula el agua

bajo la acción de la gravedad y sin presión, puesto que la superficie libre del líquido está en contacto con la atmosfera.

Estudio hidráulico

El estudio hidráulico de un canal que conduce un líquido a gravedad se refiere, esencialmente, a la determinación, en cada punto, del tirante correspondiente al caudal que circula en cada instante. A partir de la ecuación:

$$Q = AV \qquad \text{Ecuación 8.1}$$

donde:

Q = Caudal (m^3/s)
A = Área hidráulica (m^2)
V = Velocidad media (m/s)

Es posible determinar la velocidad, conocidos el caudal y el tirante, puesto que el área hidráulica es función de éste, que puede, en algunas ocasiones, influir sobre las soluciones elegidas por el proyectista.

En los puntos que se describirán a continuación en este manual, se examinan los problemas de tipo hidráulico que implica una conducción a superficie libre y se proporcionan indicaciones prácticas para su resolución. No se trata de un manual de hidráulica y, por lo tanto, la mayoría de las formulas se indican sin mayor demostración adicional, para lo cual pueden verse en numerosos tratados de hidráulica en los que se desarrollan ampliamente estos temas, es posible para ello consultar Chow(1994) o Sotelo (2002), en los que se ha sintetizado, en forma clara, la hidráulica de los cauces abiertos y las deducciones de las ecuaciones aplicadas.

En primer lugar, es preciso clasificar los diferentes tipos de flujo existentes, ya que casi todos ellos pueden llegar a presentarse en un canal, y se mostrarán los procedimientos para resolver los problemas que implican en función del régimen de flujo. Entre los varios métodos que existen para clasificar aquellos se ha elegido el que se funda en las variaciones del tirante, debido a que, como se ha indicado, es precisamente el estudio del tirante el estudio principal del análisis hidráulico. El tirante es una función que depende de dos variables independientes, tiempo y localización geométrica dentro de un tramo de canal; se examina a continuación lo que sucede cuando varía una de dichas variables, manteniendo la otra constante y de esta manera se va resolviendo el problema para definir los tirantes que se presentan a lo largo de un canal.

Si se supone, en primer lugar, que la localización geométrica es constante, es decir, que se está examinando una sección determinada y que, en cambio, varia el tiempo, es evidente que las únicas posibilidades, por cuanto al tirante se refiere, son las de mantenerse constante, en cuyo caso el régimen se denomina “permanente”, o variar y se denomina “variable”.

Cuando la variable independiente que se fija es el tiempo, el procedimiento de análisis equivale a analizar el tirante simultáneamente en toda la conducción, pero en un instante fijo; en este caso, o bien el tirante es el mismo, o difiere de unas secciones a otras y entonces recibe la denominación de “variado”, que no debe confundirse con “variable”, que es cuando el tirante cambia a lo largo del tiempo en la misma sección. La variación del tirante entre secciones próximas puede ser gradual o brusca; en el primer caso el régimen se dice “gradualmente variado” y en el segundo “rápidamente variado”.

La combinación de los criterios anteriores permite establecer la clasificación que se muestra en la Ilustración 8.1.

8.2. Conceptos básicos

8.2.1. Magnitudes de cálculo

En el cálculo hidráulico de canales existen una serie de magnitudes fundamentales, relacionadas con la geometría de los cauces cuya definición, para una sección transversal cualquiera, se incluye a continuación (ver Ilustración 8.2):

- Profundidad (h): es la distancia vertical entre el punto más bajo de la sección y la superficie libre
- Tirante (y): es la distancia entre el punto más bajo de la sección y la superficie libre, medida normalmente al fondo. Evidentemente, $h = y/\cos\theta$, por lo que, excepto en cauces con gran pendiente, puede suponerse $y = h$, en donde θ es el ángulo de inclinación del canal
- Ancho de superficie libre (T): es la anchura de la sección a la altura de la lámina libre
- Area hidráulica (A): es el área de la superficie transversal a la dirección del flujo
- Perímetro mojado (P): es la longitud del perímetro exterior de la superficie A
- Radio hidráulico (R): se define mediante la ecuación:

$$R = A/P \qquad \text{Ecuación 8.2}$$

- Tirante hidráulico (Y): es la relación entre la superficie mojada y la anchura máxima:

$$Y = A/T \qquad \text{Ecuación 8.3}$$

- Operador crítico (Z): es un valor que fa-

Ilustración 8.1 Clasificación de flujo a superficie libre (adaptado de Sotelo, 2002)

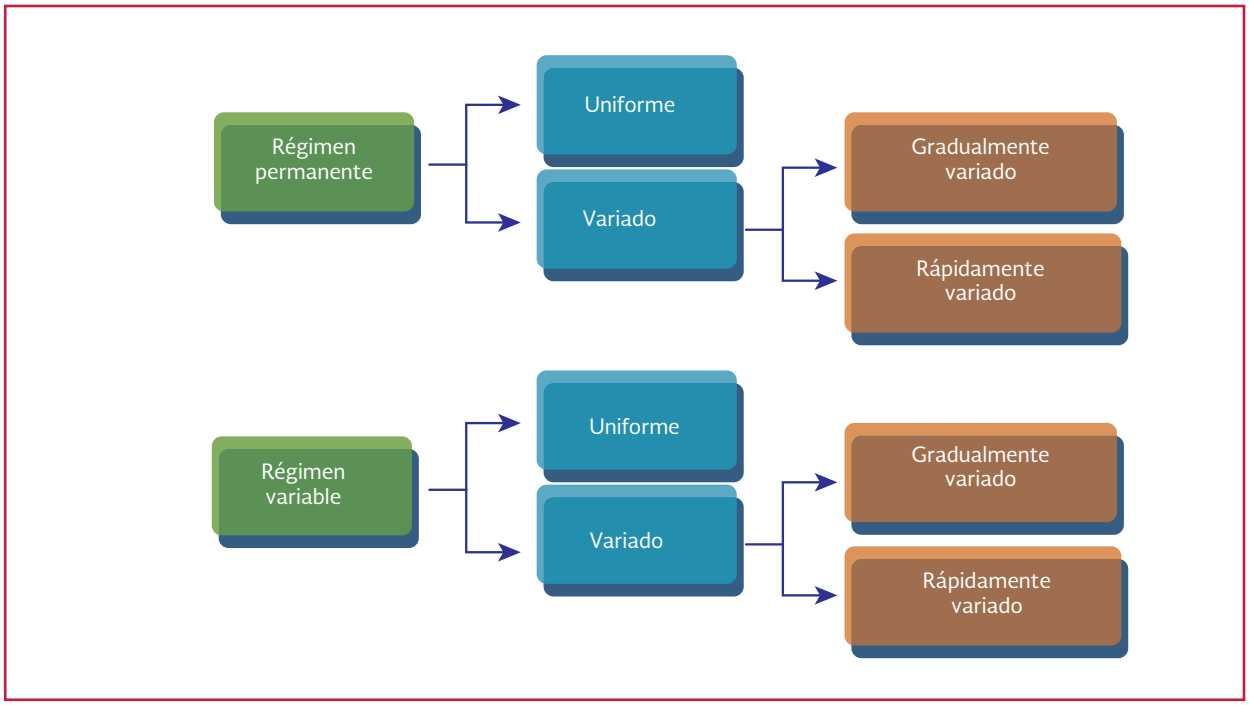
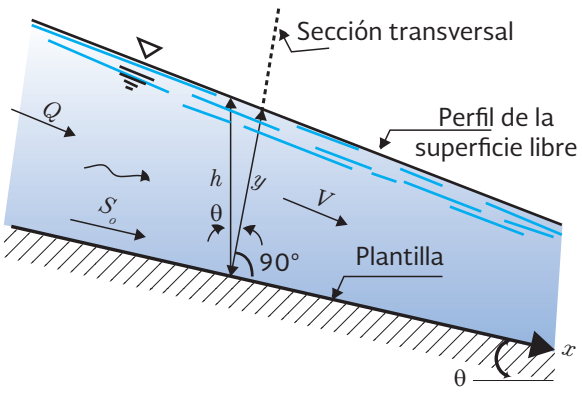
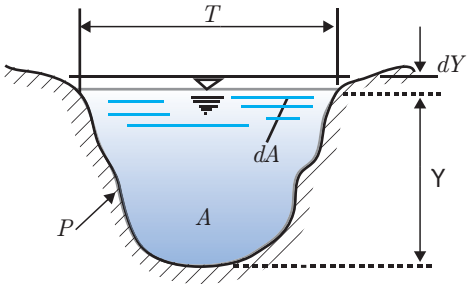


Ilustración 8.2 Esquema representativo de los elementos de un canal (adaptado de Sotelo, 2002)



a) Corte longitudinal



b) Corte transversal

cilita el cálculo de las magnitudes críticas, que se explican más adelante, y se define mediante la ecuación:

$$Z = A\sqrt{Y} = A\sqrt{\frac{A}{T}}$$

Ecuación 8.4

- Operador uniforme (N): es un valor que facilita el cálculo de las magnitudes normales, que se explican más adelante, y se define mediante la ecuación:

$$N = AR^{2/3}$$ Ecuación 8.5

Al suponer que la profundidad será igual al tirante, se denominará tirante a la variable de la profundidad del agua.

8.2.2. Sección efectiva y diseño hidráulico

Los canales artificiales se diseñan con secciones de figuras geométricas regulares. La selección de la forma depende del tipo de canal que se va a construir, siendo la trapecial la más común en los revestidos y no revestidos, la rectangular en los revestidos con materiales estables (concreto, mampostería, madera, etc.), y la triangular en los pequeños.

La sección transversal de un canal se localiza mediante la coordenada x sobre la plantilla según su eje (ver Ilustración 8.2).

La Tabla 8.1 y Tabla 8.2 presentan los elementos geométricos de las secciones más comunes en canales artificiales, expresados en términos del tirante.

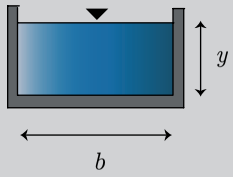
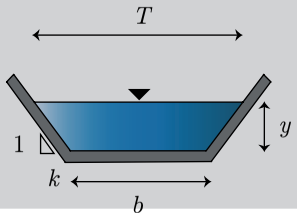
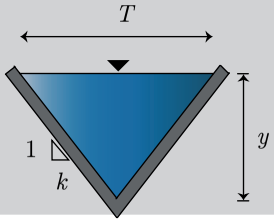
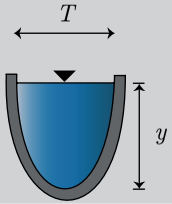
8.2.3. Conservación de la energía

El principio fundamental a tener en cuenta en los cálculos hidráulicos de canales, es el de la conservación de la energía, cuya expresión, para los puntos de una misma línea de corriente, proviene de la conocida ecuación de Bernoulli.

$$H = z + y + \alpha\frac{V^2}{2g} + \Delta H$$

Ecuación 8.6

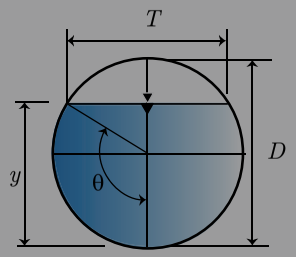
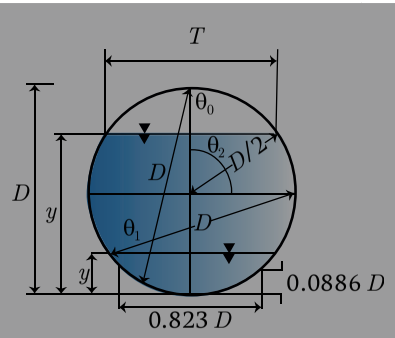
Tabla 8.1 Elementos geométricos de secciones prismáticas para conductos a superficie libre (adaptada de Chow, 1994)

Sección	Rectangular	Trapecial	Triangular	Parabólica
Elemento geométrico				
Área, A	by	$(b+ky)y$	ky^2	$2/3\ Ty$
Perímetro mojado P	$b+2y$	$b+2\sqrt{(1+k^2)}y$	$2\sqrt{(1+k^2)}y$	$T+\frac{8}{3}\frac{y^2}{T}$
Radio hidráulico $R=A/P$	$\frac{by}{b+2y}$	$\frac{(b+ky)y}{b+2\sqrt{(1+k^2)}y}$	$\frac{ky}{2\sqrt{(1+k^2)}}$	$\frac{2T^2y}{3T^2+8y^2}$ *
Ancho de la superficie libre, T	b	$b+2ky$	$2ky$	$\frac{3}{2}\frac{A}{y}$
Tirante medio A/T	y	$\frac{(b+ky)y}{b+2ky}$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{2}{3}y$
dP/dy	2	$2\sqrt{(1+k^2)}$	$2\sqrt{(1+k^2)}$	$\frac{16}{3}\frac{y}{T}+\left(1-\frac{8}{3}\frac{y^2}{T^2}\right)\frac{T}{2y}$
dT/dy	0	$2k$	$3k$	$\frac{T}{2y}$

* Aproximación satisfactoria para el intervalo $0<x\leq1$, donde $x=4y/T$. Cuando $x>1$, use la expresión exacta:

$$P=\left(\frac{T}{2}\right)\left[\sqrt{(1+x^2)}+\left(\frac{1}{x}\right)\ln\left(x+\sqrt{(1+x^2)}\right)\right]$$

Tabla 8.2 Elementos geométricos de secciones circular y herradura para conductos a superficie libre (adaptada de Chow, 1994)

Sección	 Circular			
Tirante	$0 \le \frac{y}{D} \le 1$	$0 \le \frac{y}{D} \le 0.0886$	$0.0886 \le \frac{y}{D} \le 0.5$	$0.05 \le \frac{y}{D} \le 1$
Ángulo	$\theta = \text{arcsen}\left(1-\frac{2y}{D}\right)$	$\theta_0 = \arccos\left(1-\frac{y}{D}\right)$	$\theta_1 = \text{arcsen}\left(\frac{1}{2}-\frac{y}{D}\right)$	$\theta_2 = \arccos\left(\frac{2y}{D}-1\right)$
Área, A	$\frac{1}{4}\left(\theta-\frac{1}{2}\text{sen}2\theta\right)D^2$	$\left(\theta-\frac{1}{2}\text{sen}2\theta_0\right)D^2$	$[0.43662-\theta_1+sen\theta_1(1-\cos\theta_1)]D^2$	$\left(0.82932-\frac{\theta_2}{4}+\frac{1}{2}\text{sen}2\theta_2\right)D^2$
Perímetro mojado, P	θD	$2\theta_0 D$	$(1.69623-2\theta_1)D$	$(3.26703-\theta_1)D$
Radio hidráulico $R=A/P$	$\frac{1}{4}\left(1-\frac{\text{sen}2\theta}{2\theta}\right)D$	$\frac{1}{4}\left(1-\frac{\text{sen}2\theta_0}{2\theta_0}\right)D$	$\frac{0.43662-\theta_1+\text{sen}\theta_1(1-\cos\theta_1)}{1.69623-2\theta_1}D$	$\frac{0.82932-0.25\theta_2+0.5\text{sen}2\theta_2}{3.26703-\theta_2}$
Ancho de la superficie libre, T	$2\sqrt{y(D-y)}$	$2\sqrt{y(2D-y)}$	$\left[2\sqrt{0.75+\frac{y}{D}\left(1-\frac{y}{D}\right)}-1\right]D$	$\left[2\sqrt{\frac{y}{D}\left(1-\frac{y}{D}\right)}-1\right]D$
Tirante medio, A/T	$\frac{1}{4}\left[\frac{\theta-\frac{1}{2}\text{sen}2\theta}{\text{sen}\theta}\right]D$	$\frac{1}{4}\left[\frac{\theta_0-\frac{1}{2}\text{sen}2\theta_0}{\text{sen}\theta_0}\right]D$	$\frac{0.43662\theta_1+\text{sen}\theta_1(1-\cos\theta_1)}{2\cos\theta_1-1}D$	$\frac{0.82932-0.25\theta_2+0.5\text{sen}\theta_2}{\cos\theta_2}D$
dP/dy	$\frac{1}{\sqrt{\frac{y}{D}\left(1-\frac{y}{D}\right)}}$	$\frac{2}{\sqrt{\frac{y}{D}\left(2-\frac{y}{D}\right)}}$	$\frac{2}{\sqrt{0.75+\frac{y}{D}\left(1-\frac{y}{D}\right)}}$	$\frac{1}{\sqrt{\frac{y}{D}\left(1-\frac{y}{D}\right)}}$
dT/dy	$\frac{1-\frac{2y}{D}}{\sqrt{\frac{y}{D}\left(1-\frac{y}{D}\right)}}$	$\frac{2\left(1-\frac{y}{D}\right)}{\sqrt{\frac{y}{D}\left(2-\frac{y}{D}\right)}}$	$\frac{1-\frac{2y}{D}}{\sqrt{0.75+\frac{y}{D}\left(1-\frac{y}{D}\right)}}$	$\frac{1-\frac{2y}{D}}{\sqrt{\frac{y}{D}\left(1-\frac{y}{D}\right)}}$

donde:

H = Nivel de energía constante (m)
z = Cota de la línea de corriente a partir de un plano de referencia (m)
V = Velocidad en el punto considerado (m/s)
g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)
ΔH = Pérdidas de energía continuas o localizadas (m)
y = Tirante (m)
α = Coeficiente de distribución de velocidad

Cuando el flujo es uniforme y permanente, el coeficiente α es igual a la unidad y si es gradualmente variado difiere muy poco de este valor, por lo que, en la práctica, se le considera siempre igual a la unidad, excepto en flujos rápidamente variados; en estos casos, y para simplificar el cálculo, se supone también que es igual a la unidad, y se introducen, en cambio, unas pérdidas localizadas de energía, pertenecientes en esencia al término ΔH, en función de la energía cinética $V^2/2g$, mediante coeficientes deducidos, generalmente, de ensayos en modelo y/o de experiencias directas.

ΔH es la integral de las pérdidas continuas y localizadas de energía que hubieran podido producirse entre las dos secciones. Esta ecuación es la base para la determinación de la línea de agua, y, como se verá posteriormente, la mayoría de los métodos de cálculo la utilizan de una u otra forma. Conviene advertir que en la determinación de esta ecuación se ha propuesto, implícitamente, que la distribución de presiones en la superficie transversal de la corriente era hidrostática, lo cual es cierto en la mayor parte de los casos,excepto en el movimiento rápidamente variado, donde no es válida la substitución del término de presión P_i/γ por el tirante, y debe utilizarse un coeficiente α' que corrija este defecto.

Después de lo establecido, puede concluirse que la ecuación de la energía, en su forma más simplificada, puede utilizarse en la resolución de problemas relativos a regímenes uniformes, e incluso gradualmente variados; ésta es la razón por la cual, en esos casos, se utiliza, casi siempre, la ecuación de la cantidad de movimiento.

8.2.4. Energía específica

Se denomina energía específica en una sección dada la distancia entre la línea de energía y el fondo; es decir, utilizando las ecuaciones anteriores:

$$E = h\cos\theta + \alpha\frac{V^2}{2g} \qquad \text{Ecuación 8.7}$$

donde:

E = Energía específica en una sección (m)
h = Profundidad del agua normal al fondo (m)
α = Coeficiente de Coriolis (adimensional)
V = Velocidad media en la sección (m/s)
g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Cuando el cauce tiene una pendiente muy reducida y el flujo es uniforme, o gradualmente variado, la ecuación anterior se transforma en la siguiente:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \qquad \text{Ecuación 8.8}$$

que expresa que la energía específica es igual al tirante más el término de energía cinética.

Puesto que se ha supuesto que V es la velocidad media en la sección, se tiene $V=Q/A$, con lo cual, la ecuación se puede escribir de la siguiente forma:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$$ Ecuación 8.9

y en definitiva $E=F(Q,y)$ ya que el área hidráulica, es función regular, o no, del tirante.

La ecuación anterior liga tres variables: energía específica, tirante y caudal, de forma que dos de ellas han de ser independientes y su representación gráfica es determinada en una superficie en un espacio de tres dimensiones; ante la dificultad de manejo que con dicha representación, es mejor estudiarla a través de sus secciones por planos paralelos a los coordenados. Sea, en principio, Q constante, que es una situación normal en el estudio hidráulico de un cauce; es decir, se conocen el caudal y el tipo de sección y se quiere analizar la relación entre el tirante y la energía específica.

Las curvas de caudal para energía constante específica y de energía específica para caudal constante, permiten, respectivamente, determinar los tirantes conjugados que proporcionan la energía específica requerida para un caudal dado y el caudal que se quiere transportar con una energía específica dada; también demuestran que existe una condición:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gY}} = 1$$ Ecuación 8.10

donde:

Fr = Número de Froude (adimensional)
V = Velocidad media en el sección (m/s)
g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)
Y = Tirante medio de la sección (m)

para lo cual a caudal constante la energía específica es mínima y el caudal es máximo.

La condición anterior equivale a que el número de Froude del régimen sea igual a la unidad o lo que es lo mismo, a que el flujo esté en estado crítico. El número de Froude (Ecuación 8.10) determina la relación entre las fuerzas de inercia y las de gravedad de forma que cuando es mayor que la unidad predominan aquéllas y el régimen se llama rápido o supercrítico y cuando son menores sucede al revés y el régimen se denomina lento o subcrítico.

En la Ilustración 8.3 pueden observarse algunos aspectos que son de interés. Por ejemplo, para una energía específica cualquiera; E_0, existen dos posibles tipos de escurrimiento: uno con tirante y_1 y una velocidad V_1 y otro con un tirante mayor y_2 y una velocidad menor V_2. Hay además un punto singular que corresponde a la energía específica mínima posible para el gasto dado, se dice que el régimen de dicho escurrimiento es "crítico" y con ese nombre se designan las características hidráulicas del escurrimiento: "tirante crítico", "pendiente crítica", "velocidad crítica", etc.

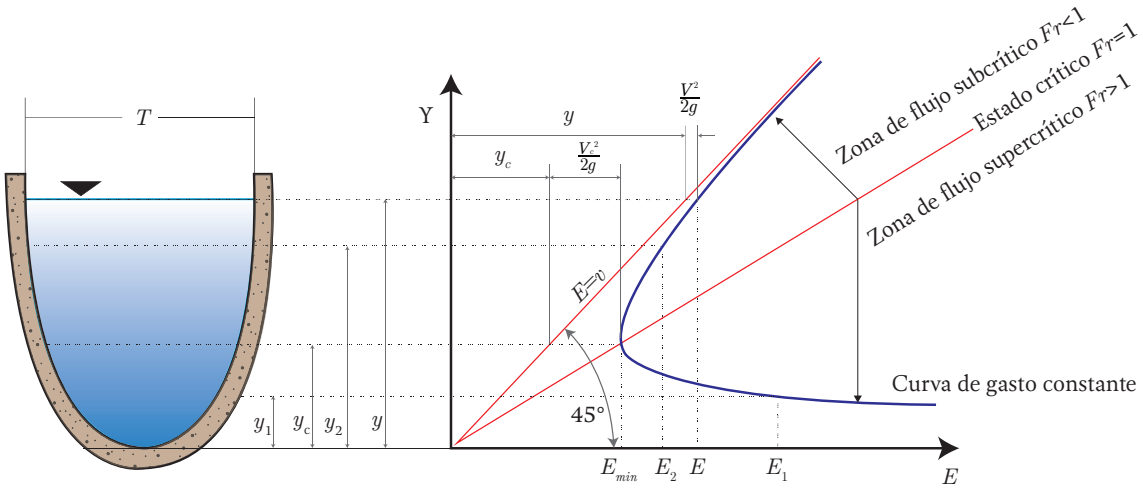
Si el tirante es mayor que el crítico se dice que el régimen es "subcrítico", "tranquilo" o "lento" y si es menor se dice que es el régimen es: "supercrítico" o "rápido".

8.2.5. Distribución de velocidades en un canal

La variación de las velocidades en las secciones de canales viene siendo investigada desde hace mucho tiempo; para el estudio de la distribución de velocidades se consideran dos secciones,

a) Sección transversal. La resistencia ofrecida por las paredes y fondo reduce la velocidad. En la superficie libre del agua (SLA), la resistencia ofrecida por la atmósfera y por los vientos también influye sobre la velocidad.

Ilustración 8.3 Gráfica de la energía específica (adaptado de Sotelo, 2002)



La velocidad máxima será encontrada en la vertical del eje en un punto, por debajo de la superficie libre (ver Ilustración 8.4)

b) Sección longitudinal. En una sección tomada verticalmente desde la SLA hasta el fondo y orientado según el estudio de escurrimiento, considerando que las velocidades de las partículas varían de punto a punto según su posición, se distinguen las siguientes velocidades:

V_s	=	Velocidad superficial (m/s)
V_{max}	=	Velocidad máxima (m/s)
V_f	=	Velocidad correspondiente al fondo (m/s)
V	=	Velocidad media (m/s)

El diagrama de velocidades varía con las dimensiones del canal, con su forma, con la rugosidad de las paredes, con el número de Reynolds de la corriente, etc. Sin embargo, aproximadamente tiene la forma de la Ilustración 8.5.

La velocidad máxima, según la Ilustración 8.5 se presenta ligeramente por debajo de la SLA desde: $0.05\ y \le h_2 \le 0.25\ y$, según sean corrientes poco o muy profundas.

La velocidad media en la vertical se puede estimar a una profundidad:

$$V_{med} = V_{0.6\,d} \qquad \text{Ecuación 8.11}$$

Si bien un método más confiable consiste en tomar un promedio de las lecturas a 0.2 y 0.8 del tirante, de acuerdo con las recomendaciones del U.S.G.S. (Servicio Geológico de los Estados Unidos).

$$V_{med} = \frac{V_{0.2d} + V_{0.8d}}{2} \qquad \text{Ecuación 8.12}$$

Según se trate de canales pequeños o grandes la velocidad media varía entre 0.8 y 0.95 veces la velocidad superficial respectivamente.

$$V_{med} = 0.8 - 0.95\ V_s$$

Ilustración 8.4 Distribución de velocidades en sección transversal (adaptado de Chow, 1994)

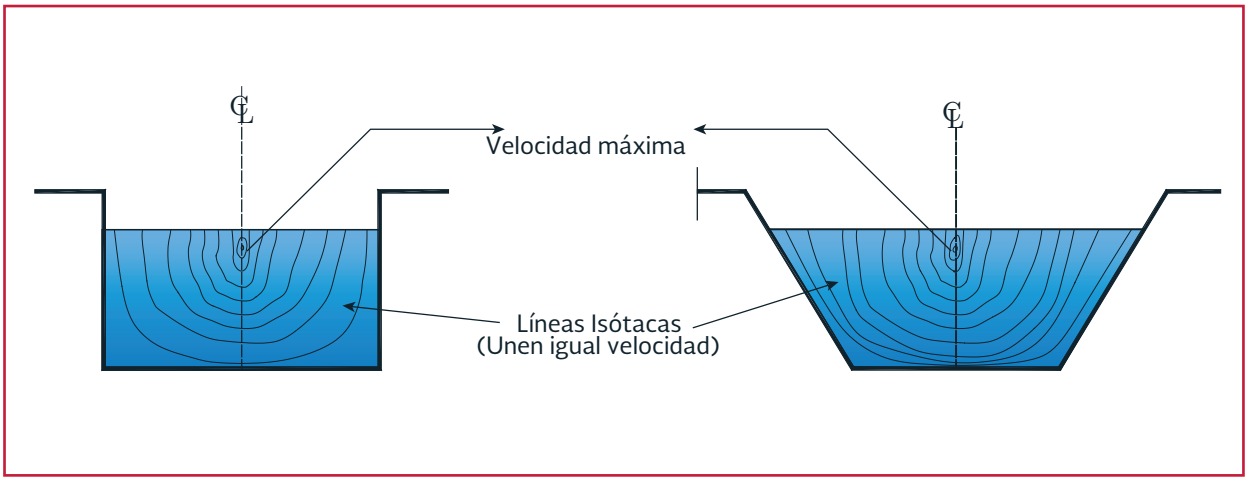
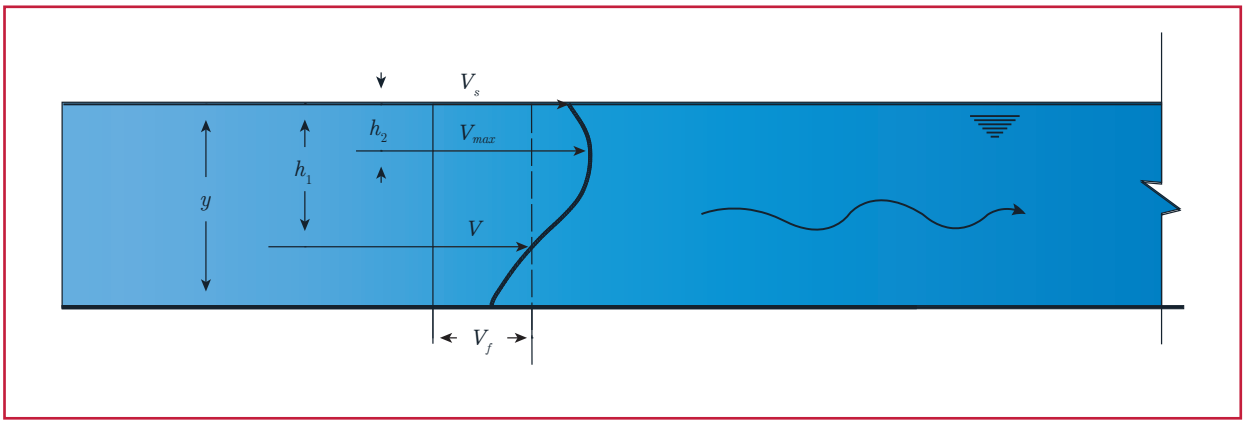


Ilustración 8.5 Distribución de velocidades en la sección longitudinal (adaptado de Chow, 1994)



Es importante conocer el tipo de distribución de velocidades que se tiene en una sección, ya que siempre se habla de una sola velocidad representativa en toda la sección (velocidad media) que en general sólo se presenta en dos puntos de la misma. Esta particularidad hace necesario efectuar una corrección a la carga de velocidad calculada con la velocidad media.

8.3. Régimen crítico

El llamado estado crítico de flujo está caracterizado por varias condiciones de las que se destacan las siguientes:

- Para un caudal dado la energía específica es mínima
- Para una energía específica dada el caudal es máximo
- Para un caudal dado la fuerza específica es mínima
- La energía cinética es igual a la mitad del tirante hidráulico:

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{Y}{2} \qquad \text{Ecuación 8.13}$$

El número de Froude es igual a la unidad, Fr=1.

En general, el estudio del régimen crítico se hace solamente en determinadas secciones que reciben el nombre de secciones de control, debido a que controlan la línea de agua. Cuando se produce el tirante crítico en todas las secciones de un tramo

de un cauce se dice que el régimen es crítico y si, además, es uniforme el calado crítico deberá conservarse en todo el tramo. En este caso, la pendiente que tiene el fondo del canal en ese tramo se denomina pendiente crítica; cuando es inferior se denomina pendiente subcrítica y se produce un régimen con velocidades menores de la crítica, régimen lento, y tirantes mayores, mientras que en caso contrario el régimen se denomina rápido y la pendiente supercrítica. El régimen crítico es muy inestable ya que, un pequeño cambio en la energía específica producirá un cambio importante en el tirante.

El procedimiento más fácil para calcular el tirante crítico, correspondiente a un caudal dado, en una sección determinada, es utilizar la relación, ya deducida, que caracteriza a dicho estado, además de la ecuación anterior, tenemos:

$$\frac{Q^2}{g} = A^2 Y = Z^2$$ Ecuación 8.14

$$Z = \frac{Q}{\sqrt{g}}$$ Ecuación 8.15

Esta relación es de la forma $f(y)$ = constante y se puede resolver inmediatamente obteniendo directamente el tirante crítico, y_c. La función $Z = f(y)$ puede ser algebraica, si la forma de la sección lo permite, o estar definida mediante una curva cuando aquélla es completamente irregular.

8.4. Régimen uniforme

El régimen uniforme implica permanencia en el caudal, tirante y tiene sección constante. La permanencia del caudal y tirante, con sección constante, implica la de la velocidad y, en consecuencia, del término de energía cinética, $V^2/2g$, en la ecuación de Bernoulli, por lo que, en definitiva, impone el paralelismo entre las líneas de energía, la superficie libre del agua (S_w) y el fondo del canal (S_0), es decir, todas ellas han de tener la misma pendiente (S) y, por lo tanto, ha de cumplirse:

$$S_0 = S_f = S_w = S$$ Ecuación 8.16

En el estudio de este tipo de flujo, las variables que intervienen en el problema son las siguientes:

Q	=	Gasto (m^3 /s)
V	=	Velocidad media (m/s)
y	=	Tirante (m)
n	=	Coeficiente de rugosidad ($s/m^{1/3}$)
S	=	Pendiente (m/m)

Las ecuaciones disponibles para resolver los problemas que puedan presentarse son dos: de continuidad del caudal y la que expresa la velocidad media en función de las características de la sección, de la pendiente de la línea de energía y de la rugosidad del contorno; estas dos ecuaciones tienen la siguiente formulación matemática, que en este caso se plantea por la ecuación de Manning por ser de la que existen más coeficientes de rugosidad contrastados y de más fácil utilización; no obstante, es obvio que existen innumerables relaciones, entre las mismas variables, planteadas por diversos investigadores.

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$$ Ecuación 8.17

La expresión anterior y la Ecuación 8.1 implican la relación de seis variables mediante dos ecuaciones, lo que determina la existencia de cuatro variables independientes, que han de ser conocidas de antemano, y, también una combinatoria de 6 en 2 que representan 15 problemas diferentes

de determinación de los datos restantes; de estos quince problemas el más frecuente es la determinación del tirante y de la velocidad correspondiente cuando se conocen el caudal, el coeficiente de rugosidad, la pendiente del cauce y la forma de la sección. De las ecuaciones anteriores se puede deducir la siguiente:

$$AR^{\frac{2}{3}} = \frac{Qn}{S^{\frac{1}{2}}} \qquad \text{Ecuación 8.18}$$

Esta función puede ser algebraica, si la forma de la sección lo permite, o definida mediante una curva, si la sección no admite una expresión analítica.

Esto implica que $f(y)$ es constante y al despejar el valor del tirante que satisface al régimen uniforme; este tirante, que se denomina "normal", es el que se establecerá en el tramo intermedio de un canal suficientemente largo que permita que el flujo "se normalice", independientemente de las condiciones de entrada y salida donde, dependiendo de aquéllas, el régimen puede ser variado.

El tirante normal, y_n, puede ser mayor, igual o menor que el crítico correspondiente a la sección y caudales dados; en el primer caso el régimen será lento o subcrítico, en el segundo crítico y en el tercero rápido o supercrítico. Se recuerda que la pendiente crítica de un tramo de cauce es aquélla para la cual, con el caudal dado, se produce un tirante normal igual al crítico; su determinación es inmediata a partir de la ecuación de Manning, una vez deducido el valor del tirante crítico, y_c, donde A y R dependen del tirante:

$$S_c = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{\frac{4}{3}}} \qquad \text{Ecuación 8.19}$$

8.5. Flujo gradualmente variado

El flujo uniforme en un canal satisface la condición ideal de equilibrio dinámico entre el componente de la fuerza de peso del líquido en la dirección del movimiento y la fuerza de fricción generada sobre la frontera sólida de la conducción, lo que equivale a la igualdad de la pérdida por fricción entre dos secciones cualesquiera con el desnivel entre ellas. Esto se logra cuando la velocidad del flujo se mantiene constante a lo largo del canal, lo que es posible únicamente si las dimensiones de la sección y el tirante son constantes. Esto significa que el flujo uniforme puede ocurrir sólo en un canal prismático donde el gasto sea constante (ver Ilustración 8.6).

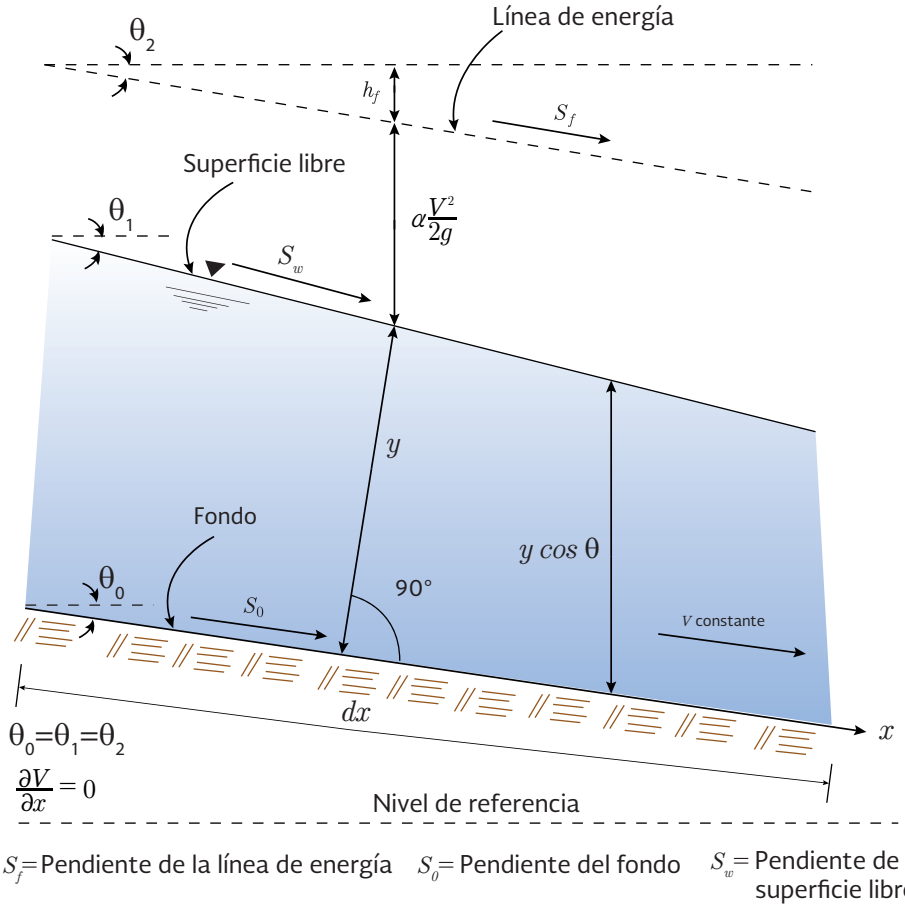
Cualquier otro flujo, aun en un canal prismático, que no satisfaga las condiciones de equilibrio del uniforme, se convierte en variado dentro de un tramo del canal o en toda su longitud.

En un canal prismático puede producirse en uno o varios tramos antes o después del uniforme, como resultado de cambios en la rugosidad, en la pendiente, en las dimensiones de la sección, por efecto de estructuras construidas en el canal para controlar niveles del agua o el gasto.

El flujo variado puede ocurrir en cualquier canal (prismático o no) pero su tendencia será tratar de alcanzar las condiciones del uniforme en los tramos prismáticos de la conducción. Esto puede o no lograrse plenamente dependiendo de la rugosidad del canal y de la longitud que tenga.

Como el uniforme, el flujo gradualmente variado se produce en un canal de gasto constante y

Ilustración 8.6 Volumen diferencial para derivar la ecuación dinámica de flujo gradualmente variado (adaptado de Sotelo, 2002)



está íntimamente relacionado con la pérdida por fricción, la cual es factible de valuar previamente.

Cualquier otra pérdida es secundaria pero puede tomarse en cuenta localmente o a lo largo del canal si se valúa previamente. Es el caso de la pérdida por cambios bruscos o graduales de la sección, como resultado de la separación del flujo de las paredes y plantilla, o por la turbulencia inducida al cambiar la velocidad de una sección a otra en un tramo o en todo el canal. Es pues, un problema que se analiza con la ecuación de energía, lo que elimina a flujos rápidamente variados, como el salto hidráulico, o el espacialmente variado de gasto creciente, donde las pérdidas se valúan con el principio del momentum.

8.5.1 Ecuación dinámica

En el tratamiento del flujo gradualmente variado se considera que ocurren cambios pequeños del tirante en la dirección del movimiento, si se comparan con la distancia en que se producen. También que no ocurre entrada o salida del agua a lo largo del tramo que se analiza.

Para el desarrollo de la teoría se establecen las siguientes hipótesis:

a) El fondo del canal es plano y de pendiente uniforme e induce sólo pequeñas curvaturas en el perfil longitudinal del flujo, y líneas de corriente prácticamente paralelas;

por lo mismo, la distribución hidrostática de la presión prevalece en cada sección. Esta suposición no implica eliminar pendientes supercríticas

b) La distribución de la velocidad en una sección es fija, por tanto, los coeficientes que dependen de dicha distribución son constantes en todo el canal

c) La pérdida de energía más importante es la de fricción. Para el cálculo de la pendiente local de fricción (en una sección del canal) se utiliza una ecuación igual que en flujo uniforme, con la velocidad, área, radio hidráulico y factor de fricción que haya en la sección; este último independiente del tirante

Esta suposición no ha sido verificada ni teórica ni experimentalmente, sin embargo, los errores que induce son pequeños si se comparan con los que se incurre al seleccionar el factor de fricción.

La suposición es probablemente más precisa cuando el flujo se contrae que cuando se expande, debido a que en el primero la pérdida de energía es causada casi enteramente por fricción; en el segundo, pueden existir además pérdidas por turbulencia en gran escala.

d) En los desarrollos no se considera el efecto del arrastre de aire al interior del flujo. Cuando dicho arrastre sea importante, el problema se resuelve como si no lo hubiera; después, el perfil resultante se corrige para tomar en cuenta dicho efecto.

Con base en estas suposiciones se obtiene la Ecuación 8.20 es forma de la llamada ecuación dinámica o ecuación del flujo gradualmente variado, donde el diferencial representa la pendiente S, de la superficie libre del agua referida al eje x coincidente con la plantilla del canal.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2} \qquad \text{Ecuación 8.20}$$

8.5.2 Características y clasificación de los perfiles de flujo

El perfil que adopta la superficie libre del agua en cualquier condición de flujo en un canal se conoce como perfil del flujo o perfil hidráulico.

Para un valor dado de Q en un canal de pendiente pequeña y sección transversal de forma cualquiera, las variables por resolver no son funciones sencillas del tirante, de modo que la Ecuación 8.20 no tiene una solución explícita inmediata. Aún sin ella, es posible analizar el aspecto semicuantitativo de la variación del tirante con el cadenamiento en diferentes circunstancias, esto es, la forma cualitativa que adopta el perfil del flujo. Para este fin, es necesario considerar los signos del numerador y denominador de la ecuación diferencial por resolver, y de éstos el de $^{dy}/_{dx}$, a fin de conocer el incremento o decremento del tirante en la dirección del flujo.

La forma que adopta el perfil del flujo está directamente asociada con la pendiente de la plantilla del fondo y con los valores de la pendiente de la energía y el número de Froude. Para ello, la discusión se simplifica si se acepta que el canal sea prismático y de pendiente pequeña.

Por lo que respecta a la pendiente de la plantilla, es positiva si desciende en la dirección del flujo, negativa si asciende y cero si es horizontal. Un flujo uniforme de un tirante dado, se puede esta-

blecer sólo sobre una pendiente positiva, por lo que dicha pendiente y los perfiles del flujo resultantes se designan como:

- Subcrítica si $y_n > y_c$; perfiles tipo M
- Crítica si $y_n = y_c$; perfiles tipo C
- Supercrítica si $y_n < y_c$; perfiles tipo S

La clasificación de la pendiente con alguna de estas designaciones depende de su magnitud, de la rugosidad del canal y, en menor grado, del caudal.

En algunos casos la pendiente puede ser:

- Horizontal, y_n=∞; perfiles tipo H
- Negativa o adversa, y_n no existe; perfiles tipo A

En el caso de pendiente cero no existe posibilidad de flujo uniforme; en efecto, para una pendiente igual a cero el tirante normal es infinito. Para pendiente negativa, el flujo uniforme y un valor de tirante normal son físicamente imposibles.

De la ecuación de Manning, la pendiente de fricción es:

Ecuación 8.21

$$S_f = \left(\frac{Qn}{AR^{2/3}} \right)^2$$

Por otra parte, el número de Froude adopta el valor de uno para el régimen crítico, mayor de 1 si los tirantes del perfil del flujo variado son menores que el crítico y menor de 1 en caso contrario.

Para un gasto dado y la mayoría de las secciones usuales, la pendiente de fricción y el número de Froude son decrecientes en forma continua a medida que el tirante crece. Esto es evidente en secciones anchas, donde al crecer el tirante, el radio hidráulico y el área hidráulica también lo hacen, pero el ancho de la superficie libre prácticamente no cambia.

Por definición de flujo uniforme, $S_f = S_0$ cuando $y = y_n$, por lo cual se concluye:

$S_f \gtrless S_0$ según que $y \gtrless y_n$

$F^2 \gtrless 1$ según que $y \gtrless y_c$

Con la ayuda de estas desigualdades se puede observar fácilmente cómo se afecta el comportamiento del diferencial de la Ecuación 8.20, al cambiar las magnitudes de los tirantes normal y crítico.

Cualquiera que sea la pendiente, el gasto y la sección del canal, las líneas que indican la altura del tirante normal y del crítico respecto de la plantilla, dividen al espacio en que puede desarrollarse el perfil del flujo en tres zonas, llamadas:

- Zona 1. El espacio arriba de la línea superior
- Zona 2. El espacio entre las dos líneas
- Zona 3. El espacio abajo de la línea inferior

En ciertos casos, alguna de las zonas puede desaparecer, por ejemplo, la 2 cuando la pendiente es crítica y el tirante normal es igual al crítico. Sin embargo, las restantes mantienen el número de la zona antes asignado.

Dentro de cada zona queda alojado cualquier perfil, de modo que si:

dy/dx >0, el perfil de la superficie libre diverge de la plantilla.

dy/dx =0, el perfil de la superficie libre es paralelo a la plantilla.

dy/dx <0, el perfil de la superficie libre converge con la plantilla.

Esto significa que existen diferentes formas para el perfil del flujo gradualmente variado, que se muestran en la Ilustración 8.7. La forma o tipo del perfil de flujo depende de las condiciones particulares en el canal; es decir, el incremento o disminución del tirante depende del signo que resulte de dichas condiciones al imponerlas en la Ecuación 8.20.

En cada zona existe un perfil distinto, válido dentro de los límites de la zona. La forma del perfil en la proximidad de las fronteras de la zona se puede estudiar como sigue:

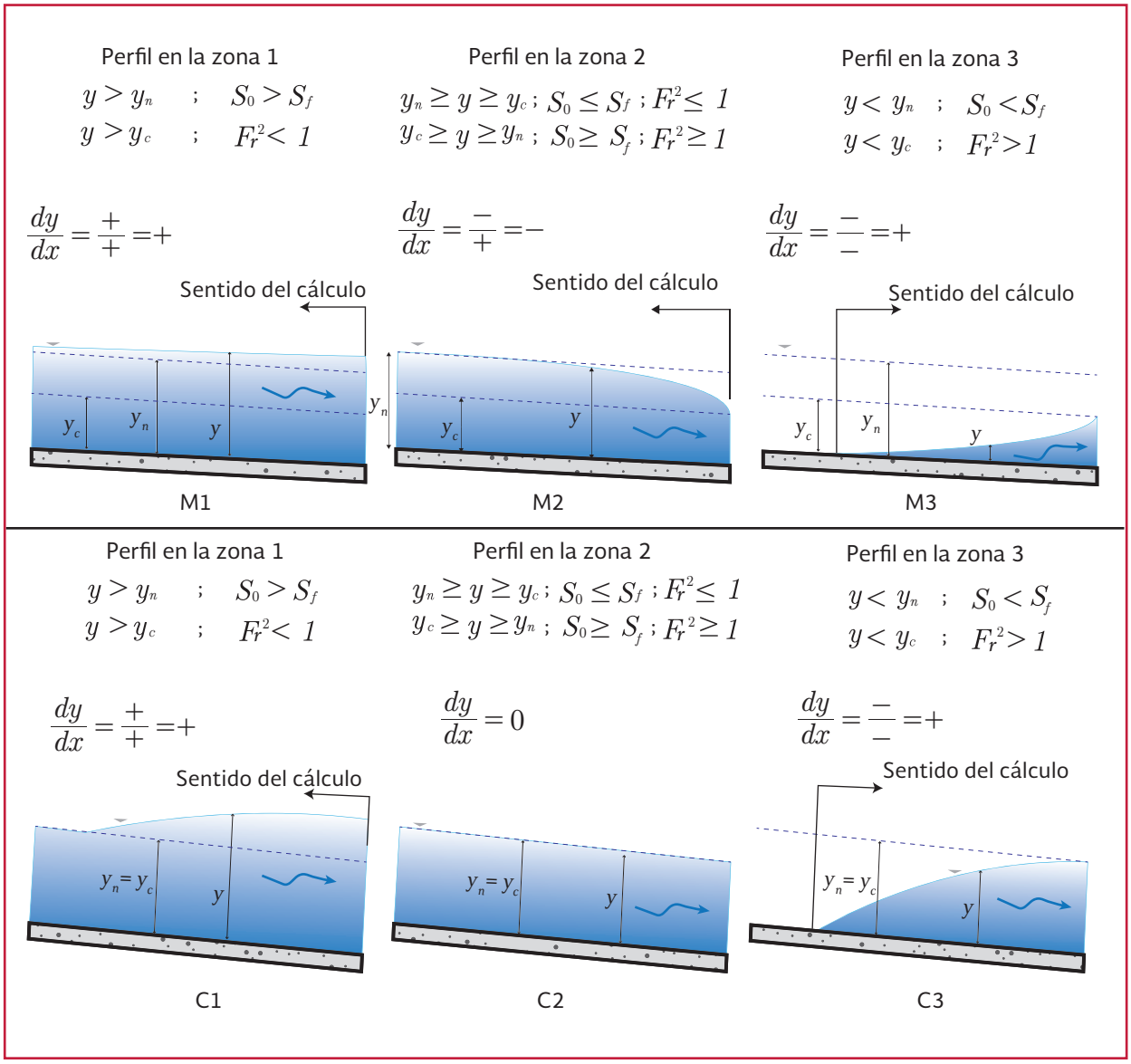
a) Cuando el tirante tiende a infinito, F^2 y S_f tienden a cero y dy/dx tiende aS_0 .Esto significa que la superficie del agua es asintótica a la horizontal (perfiles H2, A2) Cuando y tiende a y_n es porque S_f tiende a S_0, dy/dx tiende a cero, y el perfil del flujo se vuelve paralelo a la plantilla del canal, es decir, tiende al flujo uniforme (perfiles M1, M2, C2, C3, S2 y S3)
b) Cuando y tiende a y_c, F^2 tiende a uno y dy/dx tiende a ∞; es decir, el perfil del flujo tiende a la vertical en la proximidad del tirante crítico. Esto significa que cuando el perfil se desarrolla en régimen supercrítico se presenta un salto hidráulico antes de que y alcance el valor y_c, (perfiles M3, H3, A3); por el contrario, si el perfil se desarrolla en régimen subcrítico se genera una gran curvatura al aproximarse al valor y_c para volverse vertical en el punto en que $y = y_c$ (perfiles M2, H2, A2). En ambos casos se presenta localmente un flujo rápidamente variado curvilíneo, que no puede tratarse con la teoría aquí presentada
c) Cuando y tiende a 0, tanto S_f como Fr^2 tienden a ∞, de manera que dy/dx tiende a un límite positivo finito, cuya magnitud depende de la sección particular de que se trate. Este resultado es de poco interés debido a que no puede existir un tirante igual a cero para un gasto mayor de cero.

Tipo M. El perfil M1 es muy común. La presencia de estructuras de control, como vertedores y compuertas, u otros accidentes naturales como estrechamientos y curvas, sobreelevan la superficie del agua en un canal o río y se produce un perfil del tipo M1 que puede extenderse varios kilómetros hacia aguas arriba, donde es asintótico al perfil en flujo uniforme.

El perfil M2 ocurre cuando el tirante disminuye, por ejemplo, antes de un cambio de pendiente subcrítica a supercrítica, de un estrechamiento de la sección o en la proximidad de una caída. El perfil M3 se encuentra aguas abajo de un cambio de pendiente de supercrítica a subcrítica, o después de la descarga de una compuerta y su longitud está regida por las condiciones de aguas abajo, ya que termina normalmente en un salto hidráulico. Los perfiles M2 y M3 son más cortos en comparación con el M1.

Tipo S. El perfil S1 se produce antes de una estructura de control, como una presa o una compuerta, situada en un canal de gran pendiente. Principia después de un salto hidráulico y termina en la obstrucción. El perfil S2 es generalmente muy corto y es común en la entrada de un canal de gran pendiente o después de un cambio de pendiente subcrítica a supercrítica. El perfil S3 se produce aguas abajo de una compuerta en

Ilustración 8.7 Diferentes perfiles de flujo a superficie libre que se presentan en un canal (adaptado de Sotelo, 2002)



un canal de gran pendiente, o aguas abajo de su intersección con otro de menor pendiente.

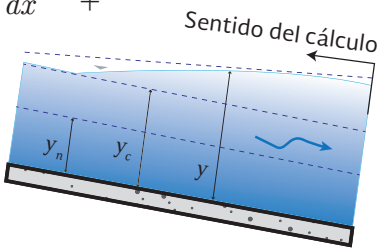
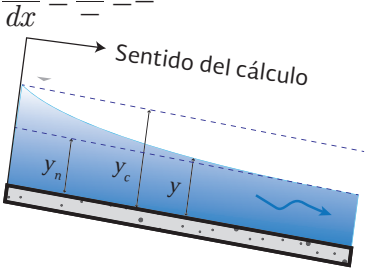
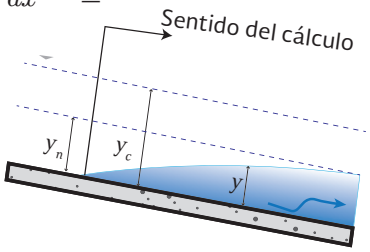
Tipo C. Como los tirantes normal y crítico coinciden, hay sólo dos perfiles. Éstos son aproximadamente horizontales y la inestabilidad propia del estado crítico se manifiesta en la forma de una ondulación superficial apreciable.

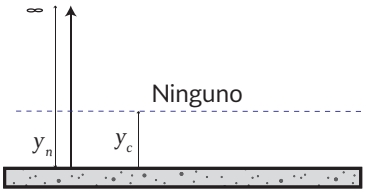
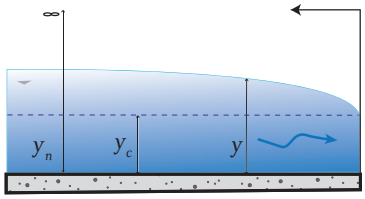
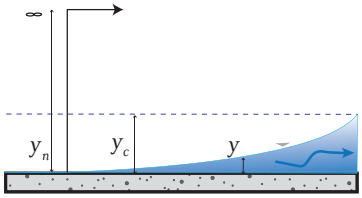
Tipo H. El tirante normal es infinito y se forman sólo los perfiles H2 y H3. El perfil H2 se produce después de que un canal de pendiente subcrítica cambia a horizontal. El perfil H3 ocurre después de una compuerta o de un cambio de pendiente supercrítica a horizontal.

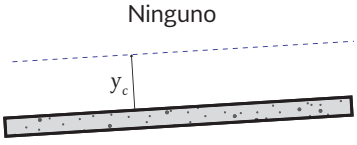
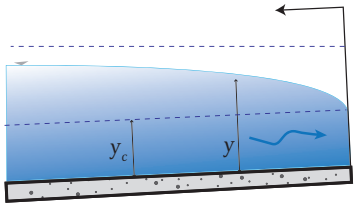
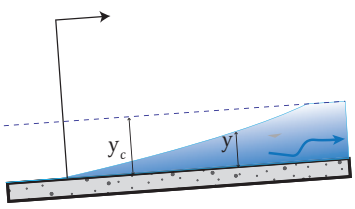
Tipo A. La pendiente negativa en un canal es poco común. El tirante normal no existe y los perfiles que se forman tienen las mismas tendencias que los H2 y H3. Los perfiles A2 y A3 son extremadamente cortos.

El flujo variado puede formarse con uno o más de los tipos de perfil que se han expuesto y re-

Ilustración 8.7 Diferentes perfiles de flujo a superficie libre que se presentan en un canal, adaptado de Sotelo, 2002 (continuación)

Perfil en la zona 1	Perfil en la zona 2	Perfil en la zona 3
$y > y_n \quad ; \quad S_0 > S_f$ $y > y_c \quad ; \quad F_r^2 < 1$	$y_n \geq y \geq y_c \; ; \; S_0 \leq S_f \; ; \; F_r^2 \leq 1$ $y_c \geq y \geq y_n \; ; \; S_0 \geq S_f \; ; \; F_r^2 \geq 1$	$y < y_n \quad ; \quad S_0 < S_f$ $y < y_c \quad ; \quad F_r^2 > 1$
$\frac{dy}{dx} = \frac{+}{+} = +$	$\frac{dy}{dx} = \frac{+}{-} = -$	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$
		
S1	S2	S3

Perfil en la zona 1	Perfil en la zona 2	Perfil en la zona 3
$y > y_n \quad ; \quad S_0 > S_f$ $y > y_c \quad ; \quad F_r^2 < 1$	$y_n \geq y \geq y_c \; ; \; S_0 \leq S_f \; ; \; F_r^2 \leq 1$ $y_c \geq y \geq y_n \; ; \; S_0 \geq S_f \; ; \; F_r^2 \geq 1$	$y < y_n \quad ; \quad S_0 < S_f$ $y < y_c \quad ; \quad F_r^2 > 1$
$\frac{dy}{dx} =$ No existe	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{+} = -$	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$
		
	H2	H3

Perfil en la zona 1	Perfil en la zona 2	Perfil en la zona 3
$y > y_n \quad ; \quad S_0 > S_f$ $y > y_c \quad ; \quad F_r^2 < 1$	$y_n \geq y \geq y_c \; ; \; S_0 \leq S_f \; ; \; F_r^2 \leq 1$ $y_c \geq y \geq y_n \; ; \; S_0 \geq S_f \; ; \; F_r^2 \geq 1$	$y < y_n \quad ; \quad S_0 < S_f$ $y < y_c \quad ; \quad F_r^2 > 1$
$\frac{dy}{dx} =$ No existe	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{+} = -$	$\frac{dy}{dx} = \frac{-}{-} = +$
		
	A2	A3

sulta conveniente familiarizarse con su clasificación, en la Ilustración 8.7 se muestran de manera esquemática los diferentes perfiles que pueden llegar a presentarse en un canal, descritos anteriormente, así también Chow recomienda 0.013 como valor normal del coeficiente de Manning para el diseño de canales de concreto.

Ejemplo 8.1

Se trata de calcular la superficie del agua en un canal que transporta 12 m³/s y vierte a un embalse; tiene sección trapecial, de 6 m de anchura en el fondo y taludes 2:1 (relación horizontal a vertical), y la pendiente es de 0.0016 (ver Ilustración 8.8); el coeficiente de rugosidad, para la ecuación de Manning, se supone que es n = 0.025, el de distribución de velocidad α = 1.10 y el correspondiente a las pérdidas por turbulencia $k = 0.0$. La sección de control está determinada por el tirante final, obligado por la superficie libre del embalse, que es y = 1.50.

En primer lugar, se calculan los tirantes: normal y crítico, y la pendiente crítica correspondiente a las condiciones del problema que son:

Q = 12 m³/s
n = 0.025
S = 0.0016
$S^{1/2}$ = 0.04
A = y (6 + 2y)
P = 6+2y√5

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(y(6+2y))^{5/3}}{(y+2y\sqrt{5})}$$

La ecuación que proporciona el tirante normal es la mostrada:

$$AR^{\frac{2}{3}} = \frac{Qn}{S^{\frac{1}{2}}};$$

$$\frac{(y(6+2y))^{\frac{5}{3}}}{(y+2y\sqrt{5})^{2/3}} = 7.5$$

Una ves resuelta la ecuación anterior proporciona el valor de y_n = 1.07. Por su parte el tirante crítico se calcula a partir de la ecuación:

$$Z = \frac{A^{\frac{3}{2}}}{T^{\frac{1}{2}}}, \text{ y como } \frac{Q}{\sqrt{g}} = 4.02$$

$$\frac{(y(6+2y))^{\frac{3}{2}}}{(y+2y\sqrt{5})^{\frac{1}{2}}} = 4.02$$

Que determina un valor y_c = 0.71 para el tirante crítico. A partir de este valor se determina el de la pendiente crítica que es S_c = 0.0067, lo cual indica que el flujo es lento ya que la pendiente del fondo es menor a la crítica. En la Ilustración 8.8 puede observarse, por la posición respectiva de las líneas de tirante normal y crítico así como por la del tirante inicial, que la curva será del tipo M-1.

En la Tabla 8.3 se detallan los cálculos realizados; solamente se presentan los de los valores definitivos y aunque es evidente que el proceso exige iterar el tirante en cada paso, la realidad es que con una mínima experiencia éste se ajusta rápidamente. Cada una de las diferentes columnas significa lo siguiente y se calcula así:

1. Abscisa: es la distancia, contada hacia aguas arriba y paralelamente al fondo, con que se sitúa la sección cuyo tirante se quiere determinar

Ilustración 8.8 Perfil de flujo del ejemplo

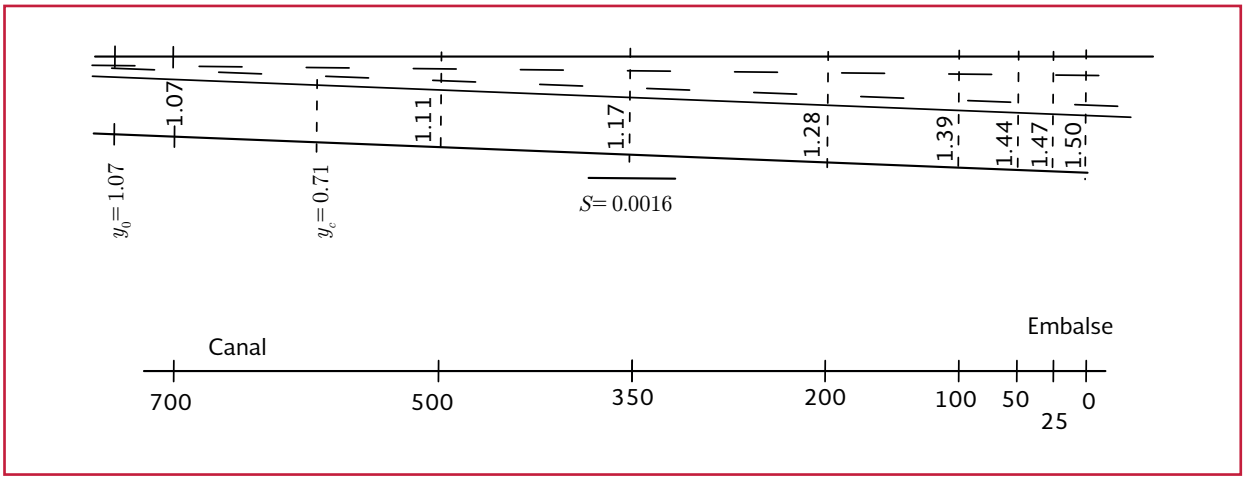


Tabla 8.3 Resultados obtenidos del ejemplo 9.1

(1) Abscisa	(2) z (m)	(3) y (m)	(4) A (m)	(5) V (m/s)	(6) $AV^2/2g$ (m)	(7) H (m)
00	101.50	1.50	13.500	0.889	0.0444	101.544
25	101.51	1.47	13.142	0.913	0.0468	101.557
50	101.52	1.44	12.787	0.938	0.0494	101.569
100	101.55	1.39	12.204	0.983	0.0542	101.604
200	101.60	1.28	10.957	1.095	0.0673	101.667
350	101.73	1.17	9.758	1.230	0.0849	101.815
500	101.91	1.11	9.124	1.315	0.0970	102.007
700	102.19	1.07	8.710	1.378	0.1066	102.297

(8) R (m)	(9) $R^{4/3}$ (m$^{4/3}$)	(10) S_f	(11) $\bar{S}_f$	(12) Δx (m)	(13) h_f (m)	(14) h_e	(15) H' (m)
1.060	1.0800	0.00045	-	-	-		101.544
1.045	1.0604	0.00049	0.00047	25.00	0.012	0	101.556
1.028	1.0375	0.00057	0.00053	25.00	0.013	0	101.569
0.999	0.9987	0.00060	0.0059	50.00	0.029	0	101.598
0.935	0.9143	0.00082	0.00071	100.00	0.071	0	101.669
0.869	0.8293	0.00114	0.00098	150.00	0.147	0	101.816
0.832	0.7825	0.00138	0.00126	150.00	0.189	0	102.005
0.808	0.7526	0.0158	0.00148	200.00	0.926	0	102.321

2. z: cota, sobre el plano de comparación elegido, del nivel de la superficie de agua; aunque en realidad z obedece a la siguiente ecuación, en la que S es la pendiente de la solera:

$$z = z_o + \Delta x \; sen(arc\,tan\, S)$$

Ecuación 8.22

El pequeño valor de $\tan S$ permite suponer que el seno y la tangente son iguales y z se calcula mediante la ecuación:

$$z = z_o + S\Delta x$$ Ecuación 8.23

En este caso particular se ha supuesto que el plano de comparación es tal que la cota

del fondo en la sección inicial es 100

3. y: tirante supuesto en la sección analizada.
4. A: superficie de la sección mojada; en este caso para sección trapecial se calcula mediante la ecuación:

$$A = y(6 + 2y) \qquad \text{Ecuación 8.24}$$

5. V: velocidad media = Q/A; aquí

$$V = \frac{12}{y(6 + 2y)}$$

6. $\frac{aV^2}{2g}$: término de energía cinética; en este caso α=1.1 (dato del problema)
7. H: energía total para el tirante supuesto
8. R: radio hidráulico = A/P, en este caso:

$$R = \frac{y(6 + 2y)}{6 + 2y\sqrt{5}} \qquad \text{Ecuación 8.25}$$

9. $R^{4/3}$: magnitud auxiliar para el cálculo
10. S_f : pendiente de la línea de energía en la sección considerada; se calcula:

$$S_f = \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \qquad \text{Ecuación 8.26}$$

11. $\overline{S_f}$: pendiente media de la línea de energía; se determina como media de los valores de S_f en los extremos del intervalo considerado
12. Δx: longitud del tramo elemental considerado; se mide siempre paralelamente al fondo
13. h_f: pérdida de energía debida al rozamiento

$$h_f = \overline{S_f}\Delta x \qquad \text{Ecuación 8.27}$$

14. h_e: pérdida de energía debida a las turbulencias; es un porcentaje de la variación, en valor absoluto, de la energía cinética en ambos extremos del tramo elemental; en el ejemplo se ha supuesto h_e = 0
15. H': energía total en la sección considerada; se calcula mediante la ecuación:

$$H' = H_a{}' + h_e + h_f \qquad \text{Ecuación 8.28}$$

en la que $H_a{}'$ es la energía total en el extremo inferior del tramo considerado
Como es natural, el tirante supuesto es el verdadero cuando $H = H'$ en cada línea del cuadro comparativo; una vez ajustado un tramo se sigue hacia aguas arriba respetando los valores ya deducidos

8.6. Régimen bruscamente variado, elementos del salto hidráulico

El salto hidráulico es un fenómeno local mediante el cual se verifica el cambio brusco de régimen rápido (supercrítico) al tranquilo (subcrítico). Este cambio es motivado por la pérdida de energía producida por las condiciones físicas bajo las cuales se manifiesta el fenómeno. Este cambio brusco de régimen se caracteriza por una alteración rápida de la curvatura de las trayectorias del flujo, que produce vórtices de eje horizontal, lo que implica inclusive la aparición de velocidades en dirección opuesta al flujo, que proporcionan choques entre partículas en forma más o menos caótica ocasionando una gran disipación de energía y una alteración manifiesta de las presiones hidrostáticas.

Las condiciones de frontera aguas arriba y aguas abajo del salto determinan su intensidad y también su ubicación. La intensidad del salto y su forma varía ampliamente, lo cual se verifica a través del número de Froude, en la Ilustración

8.10 se idealiza un salto hidráulico con sus componentes.

Los tirantes en la secciones (1) y (2) que limitan al salto se denominan tirantes conjugados y se caracterizan el primero por ser menor y el segundo mayor que el tirante crítico.

Convencionalmente se acostumbra representar a los tirantes que definen a un salto hidráulico por la letra y, siendo para la sección 1 y 2, y_1, y_2 y para el tirante crítico y_c.

Como se muestra en la Ilustración 8.9, donde el movimiento está referido al diagrama de la energía específica, los tirantes y_1, y_2 se encuentran situados en las ramas inferior y superior de la curva de energía específica, respectivamente.

Las secciones 1 y 2 separan al salto de las zonas adyacentes en las que el escurrimiento es uniforme o gradualmente variado por la energía en ambas secciones y está dada por:

$$E_1 = y_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} \qquad \text{Ecuación 8.29}$$

$$E_2 = y_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} \qquad \text{Ecuación 8.30}$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \text{Eficiencia del salto}(\eta_s)$$

También que:

E_1-E_2 = Pérdida de energía en el salto hidráulico

Las pérdidas de energía motivadas por el salto hidráulico son del tipo de las que acompañan al impacto, es decir, pérdidas producidas por cambios bruscos de movimiento por lo que son más cuantiosas en comparación con las producidas por rozamiento de regímenes uniformes o gradualmente variados. Sus valores máximos pueden ser mayores hasta en 70%.

Los elementos principales que afectan al salto hidráulico, son:

e) Altura del salto h_s dada por la diferencia de los tirantes conjugados y_1, y_2
b) La longitud del salto Ls que es igual a la distancia comprendida entre las secciones donde inicia y termina el salto

Para tales circunstancias el estudio de este fenómeno local, está enfocado a determinar las relaciones que guardan entre si los elementos vertical y longitudinal del mismo.

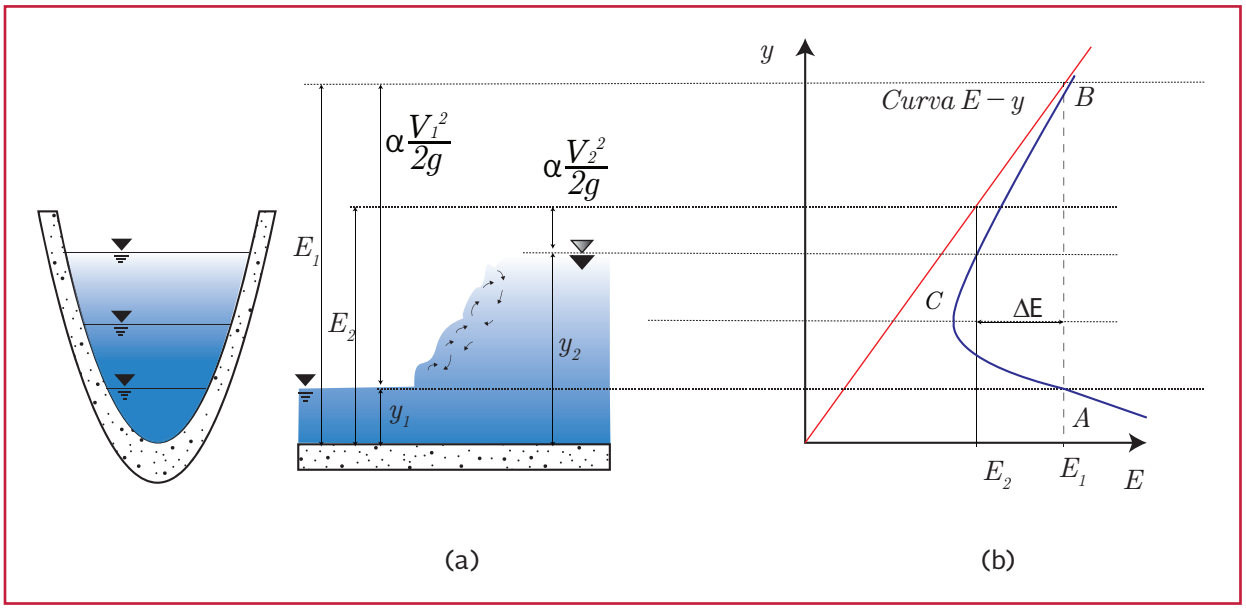
El fenómeno del salto hidráulico representa la única posibilidad con que se puede presentar el cambio de régimen supercrítico a subcrítico.

8.6.1 Transición de régimen supercrítico a subcrítico

Ahora se observa el proceso de transición de régimen supercrítico a subcrítico. Se ha visto que esta transición puede ocurrir únicamente si se produce una reducción local del ancho del canal. Sin embargo dicha transición también puede ocurrir si en el canal de sección uniforme hay una transición en la pendiente cambiando de supercrítica a subcrítica, tal como ocurriría al pie de una rápida caída. El régimen aguas arriba de la intersección, es supercrítico, mientras que, aguas abajo la pendiente impone un tirante normal en régimen subcrítico, ocurriendo en algún punto intermedio la transición entre ambos.

Para explicar el proceso de transición se puede recurrir a un análisis semejante al del caso an-

Ilustración 8.9 Salto hidráulico y su efecto en la energía específica (adaptado de Sotelo, 2002)



terior. El flujo (inicialmente es supercrítico) se frena por efecto de la fricción y de la reducción de la pendiente, aumenta gradualmente y su tirante disminuye su energía especifica hasta alcanzar la condición crítica. Toda vez que aguas abajo existe régimen subcrítico, esto implica que la energía específica del flujo debe ser mayor que la mínima. Sin embargo, una vez alcanzado el tirante crítico, no hay posibilidad de que la energía específica crezca por arriba de la mínima. Eso se debe a que la poca pendiente del canal no abastece al flujo de energía adicional, esto impide continuar con una explicación semejante al fenómeno. Para encontrar la forma de la transición del régimen se puede apelar a la evidencia experimental, se muestra con toda claridad que la transferencia del régimen supercrítico a subcrítico es de forma violenta, acompañado de mucha turbulencia y gran pérdida de energía.

Al entrar el agua a la zona de pendiente menor, se reduce la gran velocidad del flujo por efecto de la resistencia de fricción y se produce un incremento brusco del tirante que, virtualmente, rompe el perfil del flujo y produce un estado de gran turbulencia. Este fenómeno ocurre frecuentemente al pie de la descarga de una compuerta reguladora, de un cimacio o en un cambio de pendiente como el mostrado en la Ilustración 8.10.

8.6.2 Formas de salto hidráulico

Las formas de salto hidráulico se clasifican en salto directo y salto ondulado (Ilustración 8.11), los cuales se describen a continuación:

Salto directo

Los saltos directos presentan una superficie libre regular, de ascenso continuo, con expansión adyacente cubierta por un "rizo" superficial donde las partículas describen circuitos cerrados y no participan del movimiento de traslación del agua de (1) a la sección (2), su altura es relativamente grande y frecuentemente se presentan en canales y estructuras hidráulicas.

Ilustración 8.10 Transición de régimen supercrítico a subcrítico (adaptado de Sotelo, 2002)

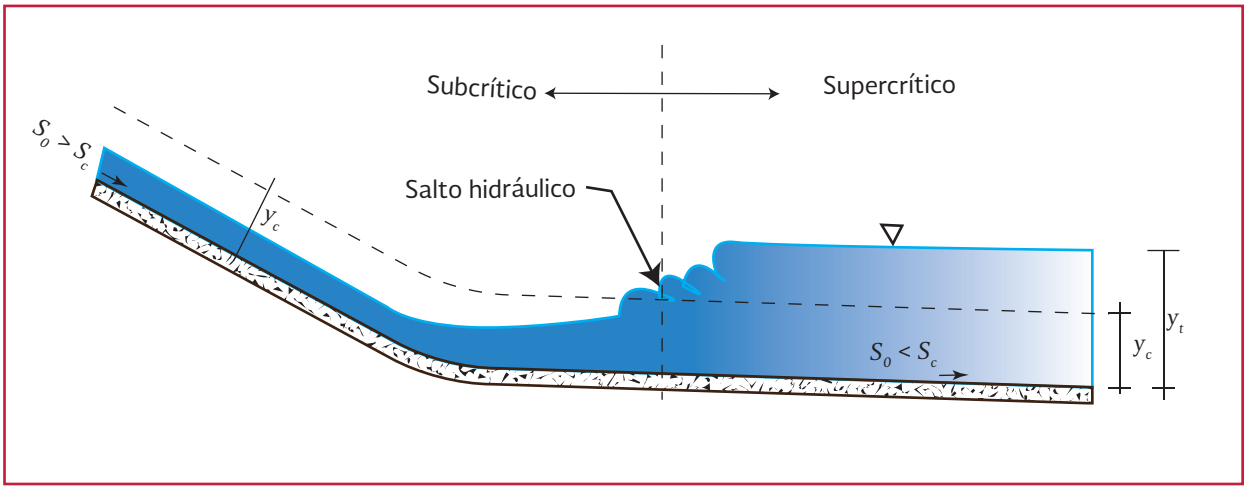
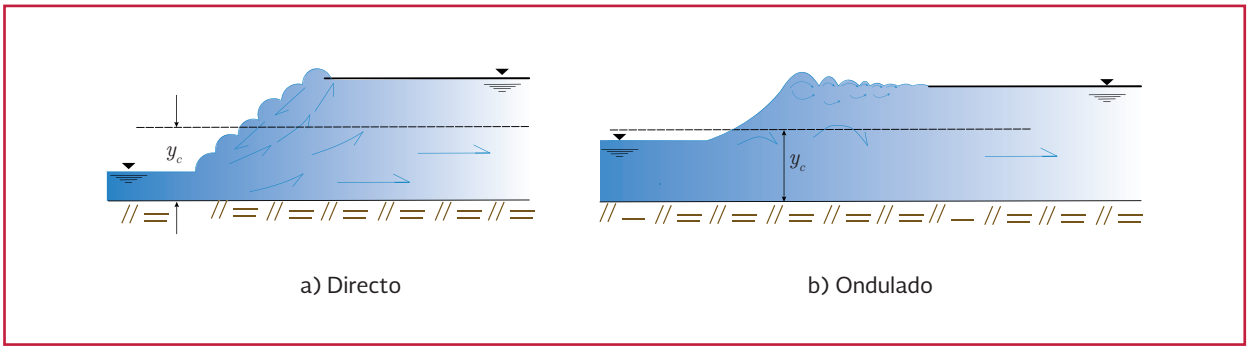


Ilustración 8.11 Formas de un salto hidráulico



Salto ondulado

Los saltos ondulados presentan una superficie libre con una serie de ondulaciones de altura gradualmente decreciente las cuales pueden ser de superficie continua o bien, la primera de ellas o varias consecutivas pueden presentar rizos superficiales. Generalmente se presentan en corrientes naturales con pendiente moderada y su altura h_s es relativamente pequeña.

8.6.3 Tipos de salto hidráulico

Ensayos de laboratorio realizados por el *United States of Bureau Reclamation* (Peterka, 1984), han demostrado que la cineticidad del régimen ejerce marcada influencia en la forma y propiedades del salto hidráulico en estructuras o tramos de canales con fondo horizontal, en grado tal que es posible diferenciar 5 tipos distintos de ellos, los que relacionados con el factor cinético $\lambda = F^2$ del régimen antes del salto λ_1, de acuerdo al número de Froude. Para cuando éste es igual a la unidad, el flujo es crítico y aquí no se forma ningún salto.

Chow (1994), explica la variación del salto de la siguiente manera en función del número de Froude:

Para Fr = 1, el flujo es crítico, y aquí, no se puede formar ningún salto.

Para Fr = 1 a 1.7, la superficie del agua muestra ondulaciones, y el salto es llamado salto ondular.

Para Fr = 1.7 a 2.5, una pequeña serie de rizos se desarrollan sobre la superficie del agua, aguas abajo, permanece lisa. La velocidad a lo largo es ligeramente uniforme, y la pérdida de energía es baja, este salto se puede llamar un salto débil.

Para Fr = 2.5 a 4.5, hay un chorro oscilante entrando al salto del fondo hacia la superficie y atrás otra vez sin periodicidad. Cada oscilación produce una gran onda de periodo irregular, la cual comúnmente en canales puede viajar por millas haciendo daño ilimitado a bancos de tierra y piedras sueltas. Este salto se le puede llamar un salto oscilante.

Para Fr = 4.5 a 9.0, la extremidad aguas abajo del rizo de la superficie y el punto en el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurre prácticamente en la misma sección vertical. La acción y posición de este salto son menos sensibles a la variación en la profundidad aguas abajo. El salto está bien balanceado y el rendimiento es el mejor. La disipación de energía varía desde el 45 al 70%. Este salto se puede llamar salto permanente.

Para Fr = 9.0 y mayores, el chorro de alta velocidad arroja golpes intermitentes de agua rodando hacia abajo de la cara del frente del salto, generando ondas aguas abajo, y puede prevalecer una superficie áspera. La acción del salto es áspera pero efectiva ya que la disipación de la energía puede alcanzar 85%. Este salto se puede llamar un salto fuerte.

Se debe destacar que los números de Froude dados arriba para los diversos tipos de salto no son situaciones estrictas si no que están dentro de un rango de extensión dependiendo de condiciones locales (ver Ilustración 8.12).

8.6.4 Elementos verticales del salto hidráulico

Estos elementos están definidos por los tirantes conjugados: y_1, y_2 y que le sirven de frontera o límite aguas arriba y aguas abajo respectivamente, así como la altura del salto h_s, representada por la diferencia de los anteriores.

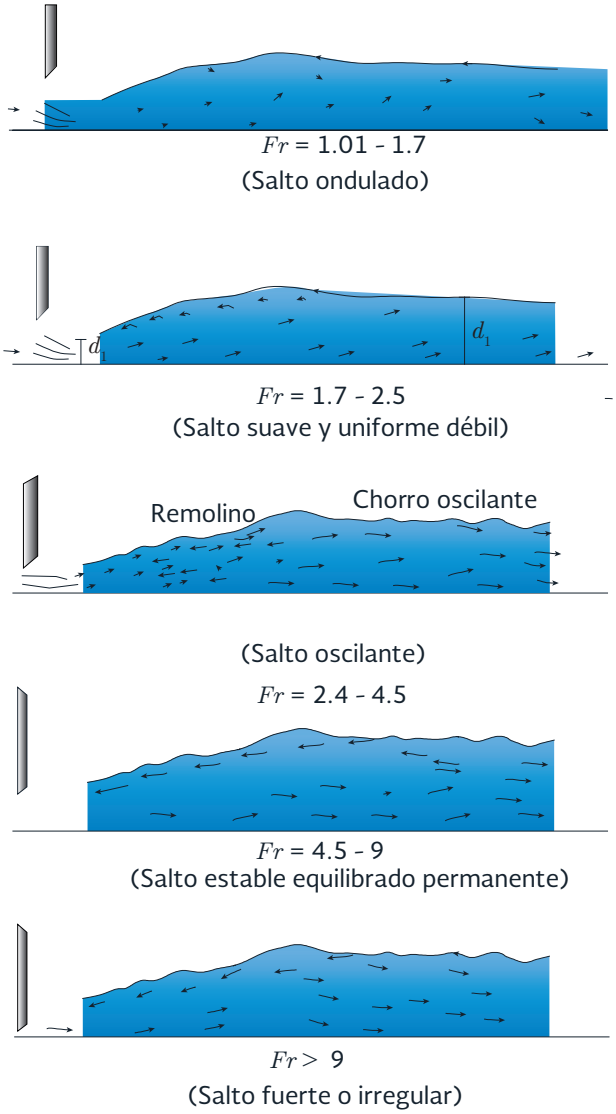
La finalidad del estudio de estos aspectos es el de establecer en la forma más aproximada posible, la relación que existe entre los tirantes conjugados, es decir que dados la forma del canal, el gasto y uno de los tirantes conjugados, determinar el otro. Las consideraciones energéticas ofrecen una explicación clara de la esencia física del fenómeno, pero no pueden servir de base para una teoría por la razón de que no existe un procedimiento directo para evaluar las pérdidas de energía. Por otra parte se obtiene una solución más satisfactoria aplicando el teorema de la cantidad de movimiento con el cual se llegan a resultados teóricos concordantes con observaciones experimentales.

8.6.5 Elementos longitudinales del salto hidráulico

Determinados los elementos verticales del salto hidráulico y_1, y_2, h_s, resta solamente obtener la longitud del salto L_s, la cual queda dada por la distancia entre secciones (1) y (2) donde se presentan los conjugados.

La longitud de un salto hidráulico es un parámetro crucial en el diseño, en general ésta no puede establecerse de consideraciones teóricas; los resultados de algunas investigaciones experimentales, han dado resultados en cierto sentido contradicto-

Ilustración 8.12 Esquemas de la forma del salto hidráulico con relación al número de Froude según el USBR



rios. En esta sección, la longitud del salto se define como la distancia frontal del salto hasta un punto inmediato sobre la superficie del flujo aguas abajo de la ola asociada con el salto.

Diversos autores proponen que la longitud del salto es un resultado de dos movimientos: el movimiento translatorio del prisma del agua hacia abajo y, otro, el movimiento vertical debido al índice de conversión de energía cinética a energía potencial.

Un análisis de datos experimentales indicó que existe una buena relación entre la longitud y la altura del salto hidráulico. Indicando que la longitud del salto es 6.9 veces la altura.

No obstante el esfuerzo de muchos investigadores, en lo que al salto hidráulico se refiere, a la fecha no se dispone de un procedimiento que basado en principios físicos, permita calcular con suficiente aproximación la longitud del mismo. Sin embargo, los resultados de mul-

titud de pruebas de laboratorio y observaciones directas en prototipos construidos, han permitido establecer ecuaciones empíricas para ese fin, la mayor parte basadas en el hecho de que la longitud del salto hidráulico es una función que depende principalmente de la altura del mismo, de la geometría del canal y en general de las condiciones bajo las cuales se manifiesta el fenómeno.

La zona en la que las turbulencias son notables y susceptibles de producir daños al canal mientras se estabiliza el flujo se extiende a una distancia conocida como longitud del salto y debe protegerse con una estructura adecuada llamada tanque amortiguador.

8.6.6 Localización del salto hidráulico

Es de especial importancia para un proyectista, la definición del sitio donde se verifica el salto, toda vez que las características específicas del proyecto depender en parte de ello. Las consideraciones teóricas que sirven para la determinación de las características del salto establecen que el sitio donde se verifica éste, depende de las condiciones bajo las cuales se presenta. Las consideraciones teóricas que sirven de base para la determinación de las características principales del salto es el sitio donde se da éste, dependiendo de las condiciones bajo las cuales se presente. Así, para saltos hidráulicos en cauces o canales, motivados por cambios bruscos de pendiente pueden presentarse tres casos:

1er caso: El salto en el canal de aguas arriba. Este caso se presenta cuando el tirante conjugado mayor (y_2) del tirante conjugado menor y_1 (=y_{01}) es menor que y_{02} (tirante normal tramo aguas abajo). El salto pasa del tirante normal: y_{01} (=y_1) a su conjugado y_2 y después el perfil de la superficie libre del agua sigue una curva S_1 hasta alcanzar el tirante y_{02}, en el quiebre del canal.

2do caso: Salto en el quiebre. Se presenta cuando el tirante conjugado mayor (y_2) del menor y_1 (=y_{01}) es igual al tirante normal (y_{02}) del tramo aguas abajo.

3er caso: Salto en el canal aguas abajo. Se presenta cuando el tirante conjugado mayor y_2 del menor y_1 (=y_{01}) es mayor que el tirante normal y_{02} del tramo aguas abajo. En este caso a partir del quiebre y hacia aguas abajo se forma una curva del tipo *M3* hasta alcanzar el tirante conjugado menor y_1 del tirante conjugado mayor y_2 (=y_{02}), en esta sección se inicia el salto hidráulico hasta alcanzar el valor y_2 (=y_{02}) con las cuales continua el escurrimiento (ver Ilustración 8.13).

Para casos del salto hidráulico en estructuras hidráulicas (caídas, rápidas, vertedores, compuertas, salidas de obras de toma, etc.) desde el punto de vista económico y por seguridad, conviene que el salto hidráulico se verifique al pie de los mismos aunque para ello haya necesidad de aditamentos especiales como son: tanques amortiguadores, deflectores, etc.

Se siguientes ecuaciones para los tirantes conjugados en canales rectangulares (Arteaga 1993):

$$y_2 = -\frac{y_1}{2}\left(-1+\sqrt{1+8\frac{V_1^2}{g\,y_1}}\right)$$

Ecuación 8.31

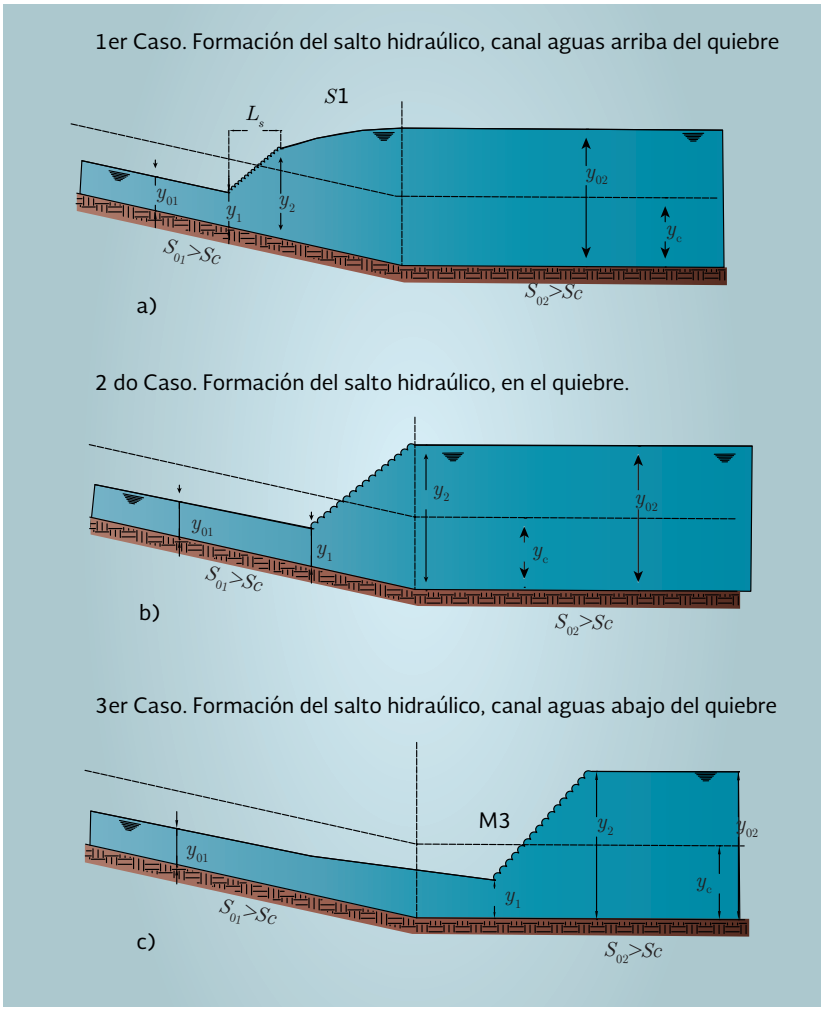
conociendo "y_1"

$$y_1 = -\frac{y_2}{2}\left(-1+\sqrt{1+8\frac{V_1^2}{g\,y_2}}\right)$$

Ecuación 8.32

conociendo "y_2"

Ilustración 8.13 Localización del salto hidráulico en dos tramos de canal (adaptado de Arteaga *et al.*, 2006)



Longitud del salto hidráulico (*Ls*). Resultados obtenidos de multitud de ensayos experimentales en laboratorios de hidráulica y verificados muchos de ellos en prototipo, han establecido que la longitud del salto en canales de sección rectangular es función de la altura del mismo.

$$Ls = 5(y_2 - y_1)$$ Bakhmeteff - Matzke

Ecuación 8.33

$$Ls = 6(y_2 - y_1)$$ Smetana

Ecuación 8.34

$$Ls = 6.02(y_2 - y_1)$$ Kinney

Ecuación 8.35

El USBR (Peterka, 1954) llevó a cabo una serie de pruebas de laboratorio en saltos hidráulicos en canales rectangulares con el objetivo de determinar la relación existente entre la longitud y la altura de los mismos, para esos casos, la cual resultó ser 6.9, por lo que según el USBR la longitud del salto en canales rectangulares está dada por:

$$Ls = 6.9(y_2 - y_1)$$ Ecuación 8.36

A juzgar por el número de pruebas y por las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo se estima que la Ecuación 9.66 es adecuada para el cálculo de la longitud del salto hidráulico en canales rectangulares.

Un aspecto importante en esta clase de problemas es la estabilidad del salto hidráulico y la formación del mismo en el sitio en el que se desea, ya que generalmente se utiliza como disipador de energía.

De manera general se puede decir que el salto hidráulico se formará dependiendo de las condiciones que se tengan inmediatamente del mismo, es decir, de la energía total que se tenga en el tramo del canal aguas abajo del sitio en que dicho salto se produce, puesto que sus características serán independientes de las condiciones del canal en que se forma.

Ejemplo 8.2

Cálculo de un salto hidráulico en sección rectangular. Para aquellos casos en que se desee o convenga calcular los tirantes conjugados mediante la Ecuación 8.31 y Ecuación 8.32, la secuela de cálculo que se recomienda es:

a) Dados el gasto (Q) y las características de los tramos de canal, similares a lo mostrado en la Ilustración 8.14, calcular los tirantes normales y_{01} y y_{02}
b) Cálculo del tirante crítico aplicando la expresión:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} \qquad \text{Ecuación 8.37}$$

c) Comparar los valores de los tirantes normales (y_{01} y y_{02}) con el tirante crítico (y_c) con el objeto de verificar la formación del salto hidráulico, para lo cual se debe cumplir :

$$y_{01} < y_c < y_{02}$$

Verificando lo anterior se procede a asignar el valor del tirante normal y_{01} al tirante conjugado menor (y_1)

d) Cálculo del tirante conjugado mayor (y_2) mediante la Ecuación 8.32
e) Comparar el valor de y_2 con y_{02} y si: $y_2 < y_{02}$
El salto hidráulico se presenta aguas arriba del quiebre antecediendo a una curva S1
$y_2 = y_{02}$. El salto hidráulico se presenta en el quiebre $y_2 > y_{02}$. El salto hidráulico se presenta aguas abajo del quiebre, siendo precedido por una curva M3
En este último caso, se regresa uno a la parte final del inciso c), asignándole y_{02} a y_2 y se calcula el tirante conjugado menor y_1 con la expresión (Ecuación 8.32) y quedando precedido el salto hidráulico por una curva M3 que va del valor y_{02} en el quiebre hasta el valor de y_1
f) Cálculo de la altura del salto (h_s)
$h_s = y_2 - y_1$
g) Cálculo de la longitud (Ls) según la Ecuación 8.35

$$Ls = 6.9(y_2 - y_1) = 6.9\,h_s$$

Ejemplo 8.3

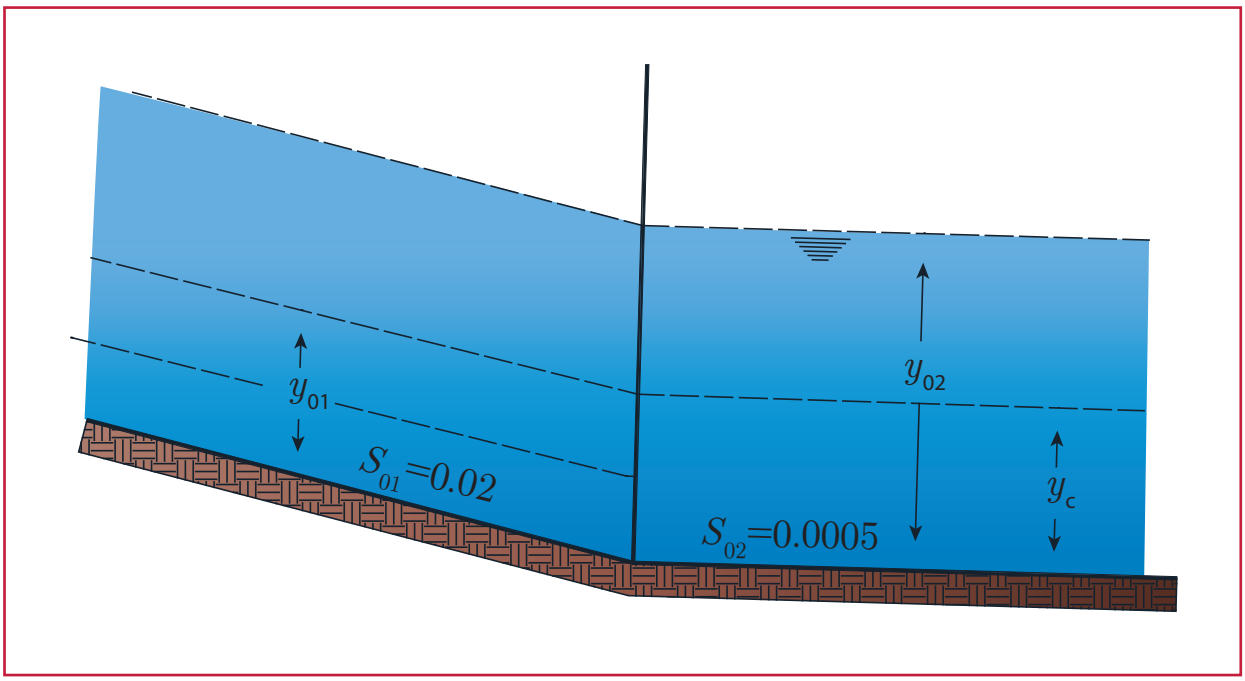
Determinar las características del salto hidráulico provocado por un cambio brusco de pendiente en un canal rectangular, teniendo las siguientes características:

Q = 12.00 m³/s
B = b = 4 m

Solución

1. Determinación de los tirantes normales

Ilustración 8.14 Perfil de canal para ejemplo de salto hidráulico en sección rectangular



y_{01} = 0.555 m
y_{02} = 2.01 m
A_1 = 2.220 m^2
A_2 = 8.04 m^2
V_1 = 5.407 m/s
V_2 = 1.493 m/s
n_1 = 0.015
n_2 = 0.015

2. Cálculo del tirante crítico (y_c)

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{12^2}{9.81\ (4^2)}}$$

$$y_c = 0.972\ \text{m}$$

Ecuación 8.38

3. Verificación de la formación del salto
Como: y_{01} (0.555 m) < y_c (0.972 m) < y_{02} (2.01 m), se presenta el salto hidráulico y como se satisface la condición de formación del salto, se asigna el valor de y_{01} al conjugado menor y_1 = 0.555 m

4. Cálculo del conjugado mayor (y_2) mediante la Ecuación 8.31):

$$y_2 = -\frac{y_1}{2}\left(-1+\sqrt{1+8\frac{V_1^2}{gy_1}}\right)$$

$$= \frac{0.55}{2}\left(-1+\sqrt{1+\frac{(8.0)5.407^2}{(9.81)\ 0.555}}\right)$$

$$= 1.562\ \text{m}$$

5. Para la localización del salto hidráulico se compara el valor del conjugado mayor y_2 con el tirante normal del tramo aguas abajo del quiebre y_{02}
Como: y_2 (1.562 m) < y_{02} (2.01 m), entonces el salto hidráulico se presenta aguas arriba del quiebre, precediendo a una curva $S1$, cuyos límites de ése son: en el quiebre se tiene un valor de tirante: $y_{máx}$ = y_{02} = 2.01 m y aguas arriba del quiebre el valor mínimo del tirante: y_{min} = y_2 = 1.562 m

El rango total de variación es: $\Delta y_t = y_{max} - y_{min}$ = 2.01 - 1.562 = 0.448 m

Como: Δy_t < 0.5 m ∴ el intervalo entre tirantes para el cálculo de coordenadas es:

$$\Delta y = \frac{\Delta y_t}{6} = \frac{0.448}{6} = 0.075\,\text{m}$$

Ecuación 8.39

$$\Delta y = 0.08\,\text{m}$$ Ecuación 8.40

por lo que los valores del tirante para los que se recomienda calcular la curva del régimen gradualmente variado S_1, son: y_1=2.101 m (en el quiebre y hacia aguas arriba del quiebre), y_2=1.93 m, y_3=1.185 m, y_4=1.77 m, y_5=1.69 m, y_6=1.61 m, y_7=1.562 m, utilizándose cualquiera de los métodos descritos anteriormente.

6. Cálculo de la altura del salto (h_s).
   $h_s = y_2 - y_1$ = 1.562-0.555, por tanto: h_s = 1.007 m
7. Cálculo de la longitud del salto (*Ls*) utilizando la expresión (3.52'):
   $Ls = 6.9\, h_s = 6.9\,(1.007)$
   $Ls = 6.95$ m
8. Cálculo de la pérdida de energía en el salto (ΔE_s)

Ecuación 8.41

$$\Delta E_s = E_1 - E_2$$

Se tiene:

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 0.555 + \frac{5.407^2}{19.62} = 2.045\,\text{m}$$

Ecuación 8.42

$$E_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} = y_2 + \frac{Q_2^2}{2g(A_2)^2} = y_2 + \frac{Q_2^2}{2g(By_2)^2} = 1.562 + \frac{12^2}{2(9.81)(4)(1.562)^2}$$

Ecuación 8.43

$$E_2 = 1.562 + \frac{144}{765.916} = 1.75\,\text{m}$$

Ecuación 8.44

Sustituyendo E_1 y E_2 en la Ecuación 8.41 se tiene:

$\Delta E_s = 2.045 - 1.75$
$\Delta E_s = 0.295$ m

9. Eficiencia del salto (η_s)

$$\eta_s = \frac{E_2}{E_1}(100)$$ Ecuación 8.45

$$\eta_s = \frac{1.75}{2.045}(100) = 85.5\,\%$$

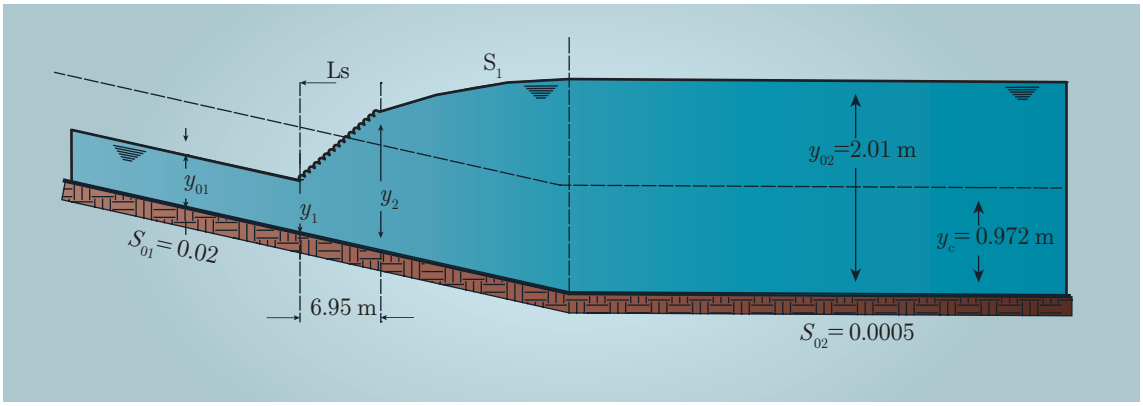
Ecuación 8.46

Ver resultados obtenidos en la Ilustración 8.15.

8.7. Diseño de secciones hidráulicas

En el cálculo del flujo uniforme intervienen seis variables: gasto, la velocidad, el tirante que se establece, coeficiente de Manning, la pendiente y la dimensión de la sección (de forma conocida), esto es, el ancho de la plantilla y el talud si la sección es trapecial o rectangular, o el diámetro si es circular o herradura.

Ilustración 8.15 Salto hidráulico en cambio de pendiente de canal rectangular para ejemplo



Son dos las ecuaciones con las que se puede hacer el cálculo, independientemente del tipo de problema: la ecuación de continuidad, ver Ecuación 8.1 y la ecuación de Manning para la fricción, ver Ecuación 8.17.

El gasto se expresa entonces de la siguiente manera:

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} = K S^{\frac{1}{2}} \qquad \text{Ecuación 8.47}$$

En la práctica se presentan problemas de revisión o de diseño, en los que debe haber, cuando más, dos incógnitas. Los problemas de revisión consisten en calcular:

- El gasto y la velocidad cuando se conocen la pendiente, el coeficiente de Manning, el tirante y la geometría de la sección
- El tirante y la velocidad cuando se conoce el gasto, el coeficiente de Manning, la pendiente y la geometría de la sección

Los problemas de diseño consisten en calcular:

- La dimensión de la sección y la velocidad cuando se conocen el gasto, el coeficiente de Manning, el tirante, la pendiente y la forma de la sección
- La dimensión de la sección y el tirante cuando se conocen el gasto, la velocidad, el coeficiente de Manning, la pendiente y la forma de la sección
- La pendiente y la velocidad cuando se conocen el gasto, el tirante, el coeficiente de Manning y la geometría de la sección

8.7.1 Sección hidráulica óptima

Se sabe que la capacidad de conducción de una sección de un canal incrementa con el aumento en el radio hidráulico o la disminución en el perímetro mojado. Desde un punto de vista hidráulico, la sección de canal que tenga menor perímetro mojado para un área determinada; por consiguiente es la sección hidráulicamente más eficiente de todas las secciones.

Los elementos geométricos para las seis secciones hidráulicas óptimas se muestran en la Tabla 8.4, pero no siempre estas secciones son prácticas debido a dificultades en la construcción y el uso de material. En general, una sección de canal debe diseñarse para cumplir con una eficiencia hidráulica óptima pero debe modificarse para tener en cuenta aspectos

Tabla 8.4 Secciones hidráulicas óptimas (adaptada de Chow, 1994)

Sección Transversal	Área A	Perímetro Mojado P	Radio Hidráulico R	Ancho Superficial T	Profundidad Hidráulica D	Factor de Sección Z
Trapecio, medio hexágono	$\sqrt{3}\ y^2$	$2\sqrt{3}\ y$	$1/2\ y$	$4/3\ \sqrt{3}\ y$	$3/4\ y$	$3/2\ y^{2.5}$
Rectángulo, medio Cuadrado	$2y^2$	$4y$	$1/2\ y$	$2y$	y	$2\ y^{2.5}$
Triángulo, medio Cuadrado	y^2	$2\sqrt{2}\ y$	$1/4\ \sqrt{2}\ y$	$2y$	$1/2\ y$	$\sqrt{2}/2\ y^{2.5}$
Semicírculo	$\pi/2\ y^2$	πy	$1/2\ y$	$2y$	$\pi/4\ y$	$\pi/4\ y^{2.5}$
Parábola $T=2\sqrt{2}\ y$	$4/3\ \sqrt{2}\ y^2$	$8/3\ \sqrt{2}\ y$	$1/2\ y$	$2\sqrt{2}\ y$	$2/3\ y$	$8/9\ \sqrt{3}\ y^{2.5}$
Catenaria hidrostática	$1.39586\ y^2$	$2.9836\ y$	$0.46784\ y$	$1.917532\ y$	$0.72795\ y$	$1.19093\ y^{2.5}$

constructivos. Desde el punto de vista práctico, nótese que la sección hidráulica óptima es la sección que da el área mínima para un canal determinado pero no necesariamente la mínima excavación. La sección con mínima excavación ocurre sólo si el nivel de agua llega hasta el tope de las bancas. En los casos en que la superficie del agua se encuentra por debajo del tope de las bancas, como ocurre a menudo, los canales más angostos que aquellos con la sección hidráulica óptima darán una excavación mínima. Si la superficie del agua fluye por encima de las bancas y éstas coinciden con el nivel del terreno, canales más anchos darán una excavación mínima.

8.7.2 Bordo libre

El bordo libre de un canal es la distancia vertical desde la parte superior del canal hasta la superficie del agua en la condición de diseño. Esta distancia debe ser lo suficientemente grande para prevenir que ondas o fluctuaciones en las superficie del agua causen reboses por encima de los lados. Este factor se vuelve muy importante en especial para el diseño de canaletas elevadas, debido a que la subestructura de éstas puede ponerse en peligro por cualquier rebose.

No existe una regla universalmente aceptada para el cálculo del bordo libre, debido a que la acción de las ondas o fluctuaciones en la superficie del agua en un canal puede crearse por muchas causas incontrolables. Ondas pronunciadas y fluctuaciones en la superficie del agua por lo general se esperan en canales donde la velocidad es muy alta y la pendiente muy empinada, de tal manera que el flujo se vuelve muy inestable, o en curvas donde la alta velocidad y el ángulo de deflexión pueden causar superficies de agua con superelevaciones apreciables en el lado convexo de la curva, o en canales donde la velocidad del flujo se aproxima al estado crítico para el cual el agua puede fluir con sus dos profundidades alternas y saltar desde el nivel bajo al nivel alto con cualquier pequeña obstrucción. Otras causas naturales, como el movimiento del viento y la acción de las mareas, también pueden inducir ondas altas que requieren una consideración especial en el diseño.

Es necesario prever un bordo libre por encima del nivel de la superficie del agua calculada, con el fin de considerar su variación por efecto de oleaje, estimación defectuosa de rugosidad, arrastre de aire, fallas en la operación, ondas de traslación generadas por maniobras bruscas de rechazo o demanda del gasto en canales de fuerza, por cie-

rre o apertura de compuertas intermedias, o por maniobras defectuosas que puedan provocar el desbordamiento.

La magnitud del libre bordo depende de muchos factores que hacen compleja su selección, pero existen algunas reglas sencillas producto de la experiencia. En general, varía entre 5 y 30 por ciento del tirante máximo del canal. Una ecuación empírica general es:

$$L_b = 0.30 + 0.25y \qquad \text{Ecuación 8.48}$$

donde:

y = Tirante máximo (m)

L_b = Bordo libre (m); se recomienda un máximo de 1.20 m

El bordo libre en canales revestidos se obtiene de la Ilustración 8.16, en función del gasto. De esta misma figura se obtiene además la altura hasta la cual hay que prolongar el revestimiento por encima de la superficie del agua.

En canales con flujo a régimen supercrítico (Fr>1) (como rápidas y canales de descarga de vertedores), desde luego revestidos, el U.S. *Bureau of Reclamation* recomienda calcular el bordo libre con la ecuación empírica :

$$L_b = 0.61 + 0.0372\, V\, y^{\frac{1}{3}} \qquad \text{Ecuación 8.49}$$

donde:

V = La velocidad del flujo (m/s)

y = Tirante (m)

L_b = Bordo libre (m)

Arteaga (1997) recomienda bordos libres en función del caudal para canales revestidos ver Tabla 8.5.

8.7.3 Canales no erosionables

La mayor parte de los canales artificiales revestidos y construidos pueden resistir la erosión de manera satisfactoria y por consiguiente, se consideran no erosionables. Los artificiales no revestidos por lo general son erosionables, excepto aquellos excavados en cimentaciones firmes, como un lecho de roca. En el diseño de canales artificiales no erosionables, factores como la velocidad permisible máxima y la fuerza tractiva permisible no hacen parte del criterio que debe ser considerado. El diseñador simplemente calcula las dimensiones del canal artificial mediante una ecuación de flujo uniforme y luego decide acerca de las dimensiones finales con base a la eficiencia hidráulica o reglas empíricas de sección óptima, aspectos prácticos constructivos y economía Los factores que se consideran en el diseño son:

- La clase del material que conforma el cuerpo del canal, la cual determina el coeficiente de rugosidad
- La velocidad mínima permisible, para evitar la depositación si el agua mueve limos o basuras
- La pendiente del fondo del canal y las pendientes laterales
- El bordo libre
- La sección más eficiente ya sea determinada hidráulica o empíricamente

Ilustración 8.16 Bordo libre para canales con revestimiento de superficie dura, membrana enterrada y tierra (Sotelo, 2002).

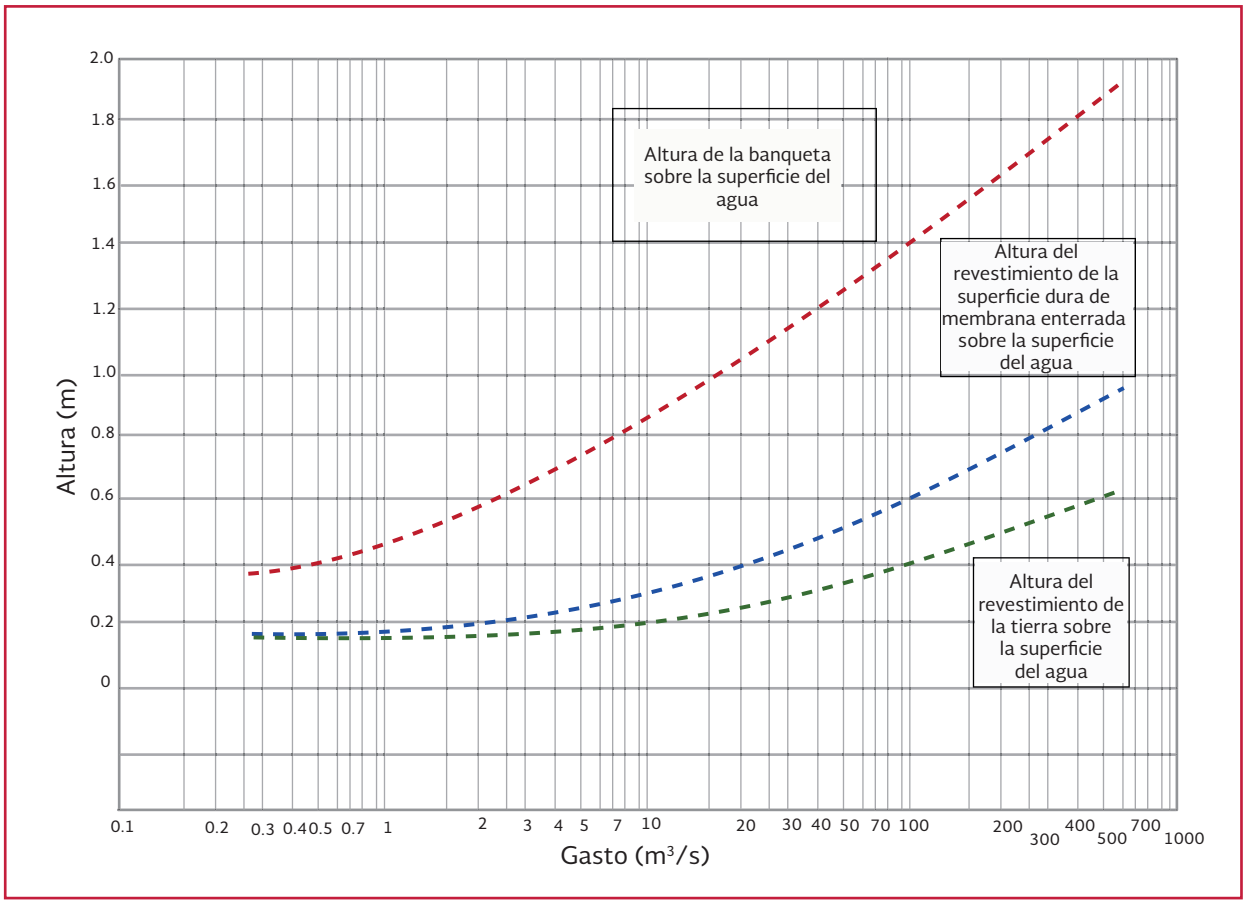


Tabla 8.5 Espesores de revestimiento, bordos libres y anchos de corona en canales revestidos (adaptada de Arteaga, 1997)

Gasto (m³/s)	Espesor de revestimiento de concreto (cm)	Bordo libre (cm)	Ancho de corona en bordos (m)	
			Con camino	Sin camino
0 → 0.5	5	15	2.50	2.50
0.5	5	5	4.00	2.50
1.0 → 2.0	5	25	2.50	2.50
2.0	6	6	4.00	2.50
3.0 → 4.0	6	30	2.50	2.50
4.0 →10.0	7	30	2.50	2.50
10.0 → 20.0	8	35	3.00	3.00
20.0 → 40.0	10	40	4.00	4.00
40.0 → 60.0	10	50	4.00	4.00
60.0 → 100	10	60	4.00	4.00

8.7.4 Material y revestimiento no erosionable

Los materiales no erosionables utilizados para formar el revestimiento de un canal o el cuerpo de un canal desarmable, incluyen concreto, mampostería, acero hierro fundido, madera, vidrio, plástico, etc. La selección del material depende sobre todo de la disponibilidad y el costo de éste, el método de construcción y el propósito para el cual se utilizará el canal.

El propósito del revestimiento de un canal artificial, en la mayor parte de los casos, es prevenir la erosión, pero ocasionalmente puede ser el evitar las pérdidas de agua de infiltración. En canales artificiales revestidos, la velocidad máxima permisible, es decir, la velocidad máxima que no causará erosión, puede no considerarse siempre y cuando el agua no transporte arena, grava o piedras. Si van a existir velocidades muy altas sobre el revestimiento, sin embargo, debe recordarse que existe una tendencia en el agua que se mueve muy rápidamente de mover bloques del revestimiento y empujarlos por fuera de su posición. Por consiguiente el revestimiento debe diseñarse contra estas posibilidades.

8.8. Trazo del canal y estructuras auxiliares

8.8.1 Trazo

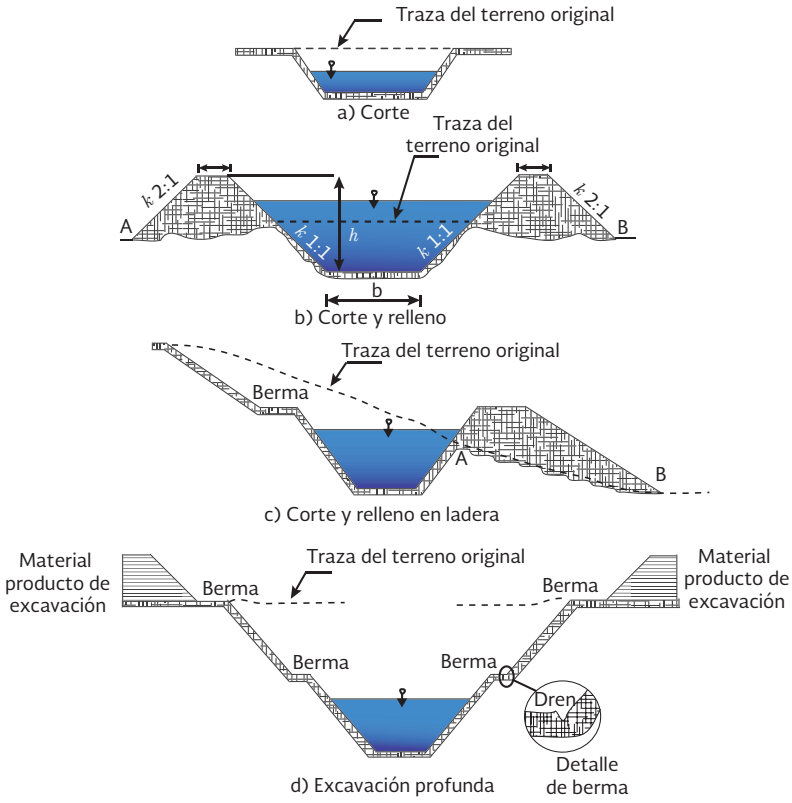
En terrenos suficientemente uniformes, los canales se diseñan comúnmente con pendiente entre 0.00005 y 0.0002, y con secciones abiertas totalmente en corte o parte en corte y relleno, como se muestra en la Ilustración 8.17, siendo común que para la última situación resulte la sección más económica al balancear los volúmenes de excavación y relleno. Cuando el ángulo de inclinación de la ladera que va a alojar el canal es mayor que $\pi/4$, se recomienda utilizar un conducto cerrado, es decir, un túnel que opere a superficie libre.

Los terraplenes resultantes del relleno se forman con el material producto de la excavación y se deben diseñar y construir con el mismo cuidado de un dique o una presa, para garantizar su estabilidad e impermeabilidad. El ancho de su corona suele ser similar al tirante del canal, con un mínimo de 1.20 m, pero siempre debe ser suficiente para proporcionar estabilidad contra la presión hidrostática resultante de un vaciado rápido, con el flujo de filtración hacia afuera y hacia abajo del terraplén.

Si el terreno natural es inclinado, la cimentación del terraplén debe banquetearse. La distancia AB varía de 4 a 5 veces el tirante para suelos de grava de primera clase con arcilla suficiente para asegurar cohesión, y de 8 a 10 veces para suelos más ligeros o arcillosos. En cualquier caso, el terraplén debe ser suficientemente grande para prevenir fugas excesivas y tubificación, o bien tener un corazón impermeable o un revestimiento. En el cálculo del bordo libre del canal debe preverse el asentamiento que va a sufrir el terraplén.

Es conveniente un camino de acceso para las labores de inspección, operación, y mantenimiento del canal. Cuando el terraplén mismo forma el camino, el ancho de la corona y cimentación quedan gobernados por razones del tránsito y equipo de construcción que se piense utilizar en las labores de reparación. El ancho de la corona varía desde 3.70 m en canales pequeños, hasta 6.10 m en canales grandes. El promedio más común es de 5.00 m.

Ilustración 8.17 Secciones típicas de un canal



En ocasiones se realizan cortes profundos, que producen mayor volumen de material que es necesario para formar terraplenes. El excedente se deposita en las partes altas adyacentes al canal, lo que obliga al uso de bermas o banquetas para protegerlo de la caída de dicho material. Con el mismo propósito se utilizan bermas en los taludes excavados por encima del bordo libre.

El ancho de las bermas o banquetas depende del tamaño del canal, del volumen de excavación necesario para conformarlas, de la altura de los cortes y la maquinaria empleada en la excavación; el mínimo varía entre 1.50 y 3 m.

La superficie de las bermas y la corona de terraplenes se deben configurar de manera que se impida la entrada de aguas pluviales al canal, ya que erosiona los taludes, arrastra azolve a su interior y aumenta el caudal. Para ello se deben prever pendientes transversales y drenes interceptores.

Cuando no hay restricciones como la profundidad del corte o un desnivel relativo importante entre la superficie del agua y la del terreno natural, el canal se ubica de manera que el promedio de los materiales excavados sea suficiente para construir los terraplenes. El balance entre el corte y relleno en cada estación particular se deduce de una expresión algebraica o de una revaluación de opciones. Para un canal, como el que se muestra en la Ilustración 8.17, se igualan las expresiones para el área en corte y relleno de los terraplenes, en la forma:

$$Bx + k_1 x^2 = [(f_1 + f_2)(h - x) + (k_1 + k_2)(h - x)^2 \ (1 + \phi)]$$

Ecuación 8.50

donde:

ϕ = Coeficiente de abundamiento del material al pasar del área de corte al área de relleno compactado

Los otros símbolos se indican en la Ilustración 8.17. La ecuación resuelve para *x,* ya que es la única incógnita.

Cuando el terreno natural tiene una pequeña inclinación pero de todos modos es necesario el terraplén en la parte alta de la ladera, el canal se localiza de modo que la intersección de la línea de corte y la de terreno natural coincida con el centro de la distancia entre los puntos A y B. Esto involucra algún error que se corrige después de un poco de práctica.

En la Ilustración 8.17 c se muestra que la inclinación de la línea de terreno original es tal que el terraplén ha desaparecido de la parte alta de la ladera, pero el problema de puede resolver de manera similar buscando el balance deseado entre el corte y el relleno.

Sobre las colinas con laderas de pendiente suave y especialmente sobre las montañas de laderas inclinadas, el trazo del canal debe seguir en lo posible las curvas de nivel del terreno, con las pendientes longitudinales que varían entre 0.001 y 0.002. De este modo, las curvas horizontales para cambiar la dirección del canal afectan las cantidades de corte y relleno, por otra parte, los contornos que resultan de las curvas de nivel en terrenos accidentados pueden ser demasiado irregulares para ser seguidos por un canal de tamaño apreciable. En este caso, la profundidad del corte puede variar y la economía exigir que parte de los materiales sean transportados a lo largo del canal, desde los puntos de corte en exceso a los rellenos en déficit. Esto complica la técnica, ya que además de que los volúmenes de corte y el relleno son de por sí variables, intervienen distancias económicas de acarreo; en cuyo caso debe manejarse como una carretera, utilizando la llamada curva masa.

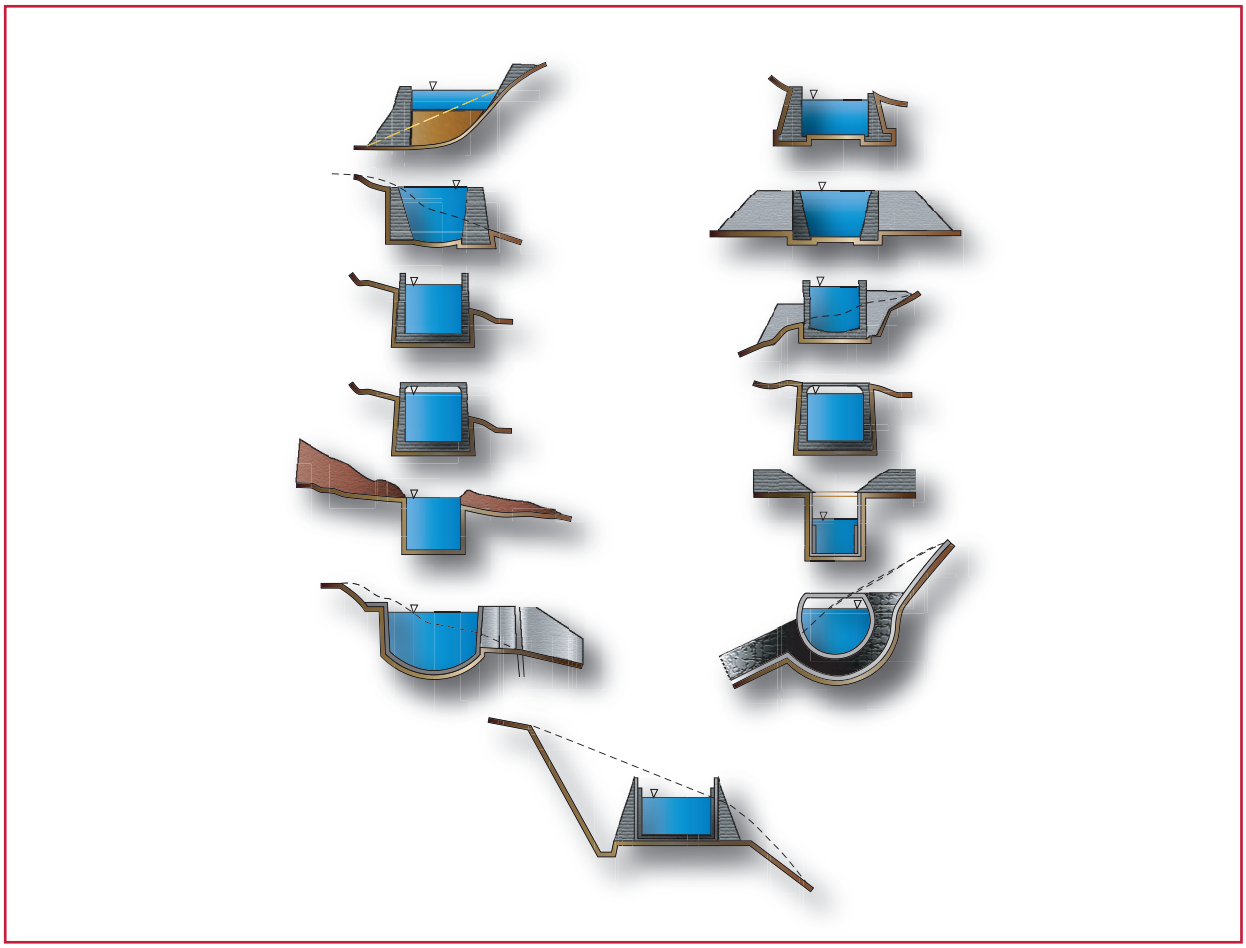
La solución correcta entre un trazo con localización elegida libremente y la adaptación total a la topografía del terreno debe determinarse comparando los costos de las diferentes soluciones posibles.

Sin embargo, es necesario tener en mente que las condiciones geológicas del terreno influyen en forma definitiva en la ubicación del canal. Con objeto de establecer bases dignas de confianza para el trazo del canal y para la determinación de sus secciones, se deben explorar ampliamente las formaciones geológicas, disposición de los estratos, calidad de la roca (grado de fisuramiento, permeabilidad, resistencia, tendencia al intemperismo, etc.) en cortes y rellenos, tomando en cuenta su profundidad o altura, la cimentación de los muros del canal y relleno, así como la extensión y calidad del revestimiento.

En la Ilustración 8.18 se muestran algunas secciones típicas del canal que se han adaptado a diversas formas geométricas y estructurales adaptadas al corte y relleno en laderas inclinadas.

En canales importantes localizados en ladera se establece con frecuencia, como condición de seguridad, que el prisma de agua quede totalmente en el área por debajo del terreno original,

Ilustración 8.18 Otras secciones típicas para un canal con diversas formas estructurales y geométricas (adaptado de Mosonyi, 1963)



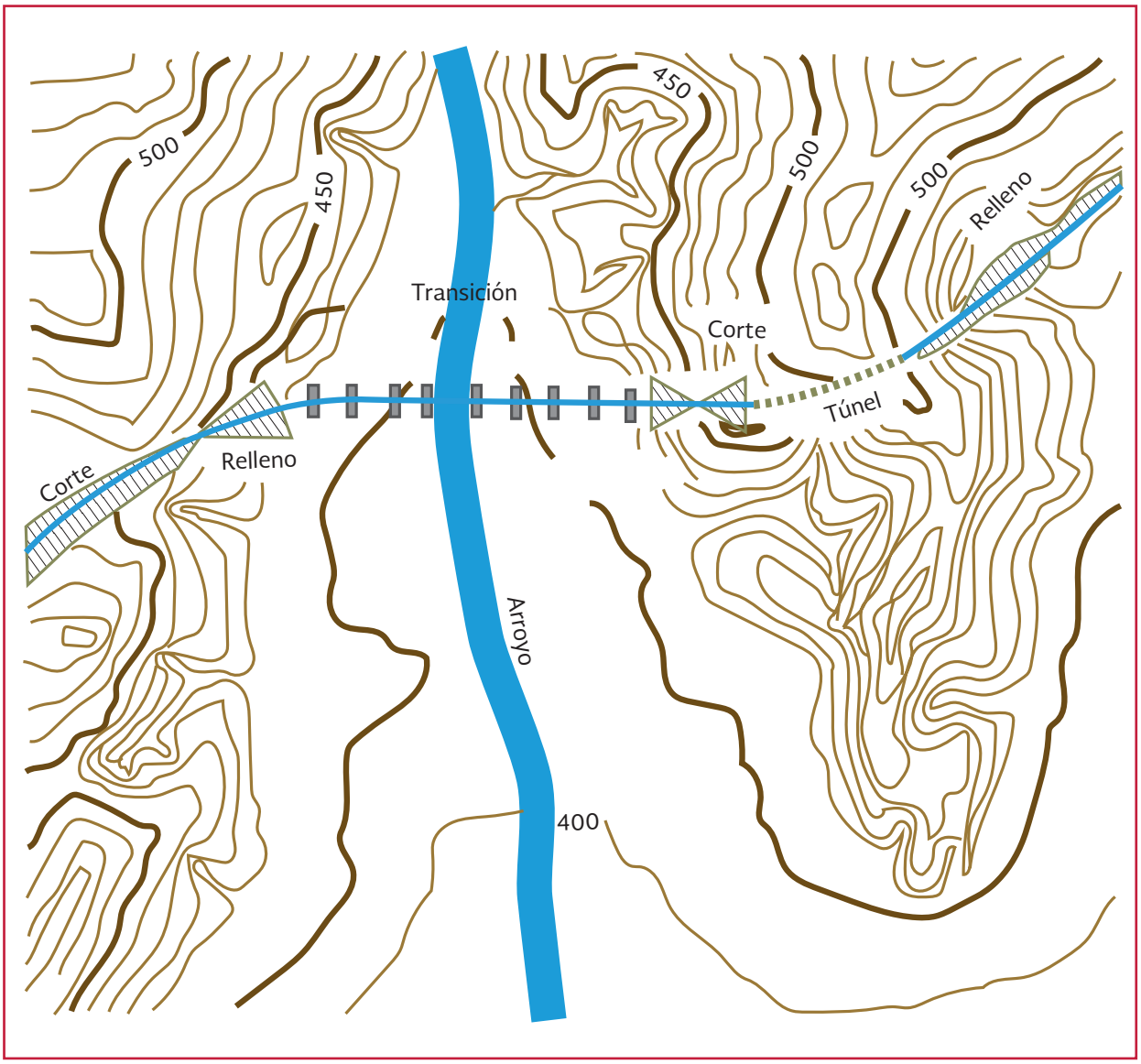
excepto en depresiones, donde los terraplenes se construyen con un cuidado muy especial. Algunos de estos casos se presentan en la Ilustración 8.18 en los que se elimina la probabilidad de balancear corte y relleno.

En barrancas poco profundas puede localizarse el canal en un relleno, mientras que los riscos más bajos se pueden salvar mediante cortes. El agua de lluvia de los terrenos adyacentes se conduce debajo del relleno mediante sifones invertidos, mientras que en los cortes profundos de longitud considerable hay que desalojarla por canales de drenaje especialmente construidos sobre el lado del canal de conducción correspondiente al corte.

8.8.2 Estructuras auxiliares

Cuando hay bajos en el terreno o el canal se tiene que resguardar de dificultades topográficas particulares, suele resultar más económico seguir un trazo recto sobre la depresión del terreno en lugar de una curva de nivel. En este caso se utilizan acueductos, es decir, canales artificiales de sección rectangular o semicircular, construidos de madera, de metal, de concreto o mampostería, soportados por una estructura que salva la depresión y permite dar pendiente necesaria, tal como se muestra en la Ilustración 8.19. En la Ilustración 8.20 se muestran esquemas de algunos acueductos típicos que funcionan como cualquier canal

Ilustración 8.19 Esquema de un trazo de canal de conducción que cuenta con puente canal y túnel (adaptado de Mosonyi, 1963)



abierto, cuya sección tiene las dimensiones mínimas para reducir el costo. En general, la velocidad del flujo es mayor en los acueductos que en los canales sobre la superficie del terreno, a fin de disminuir su sección, debiendo haber tolerancia suficiente en los desniveles para vencer las pérdidas y producir los cambios de velocidad en la entrada y salida del conducto.

Para salvar una barranca se utiliza un puente-canal o sifón invertido. El primer caso presentado en la Ilustración 8.19. El canal se convierte en un acueducto, soportado por un puente de concreto reforzado o metálico.

El sifón invertido en la Ilustración 8.21 puede descansar sobre el lecho de una barranca o río, o bien apoyarse o colgarse de un puente en un nivel que llene toda la sección. Es por ello que su diseño difiere del acueducto ya que funciona completamente lleno y su cálculo es como el de un conducto a presión, donde las pérdidas son muy importantes.

Ilustración 8.20 Esquemas de acueductos para salvar puntos bajos de topografía en el trazo de una conducción (adaptado de Mosonyi, 1963)

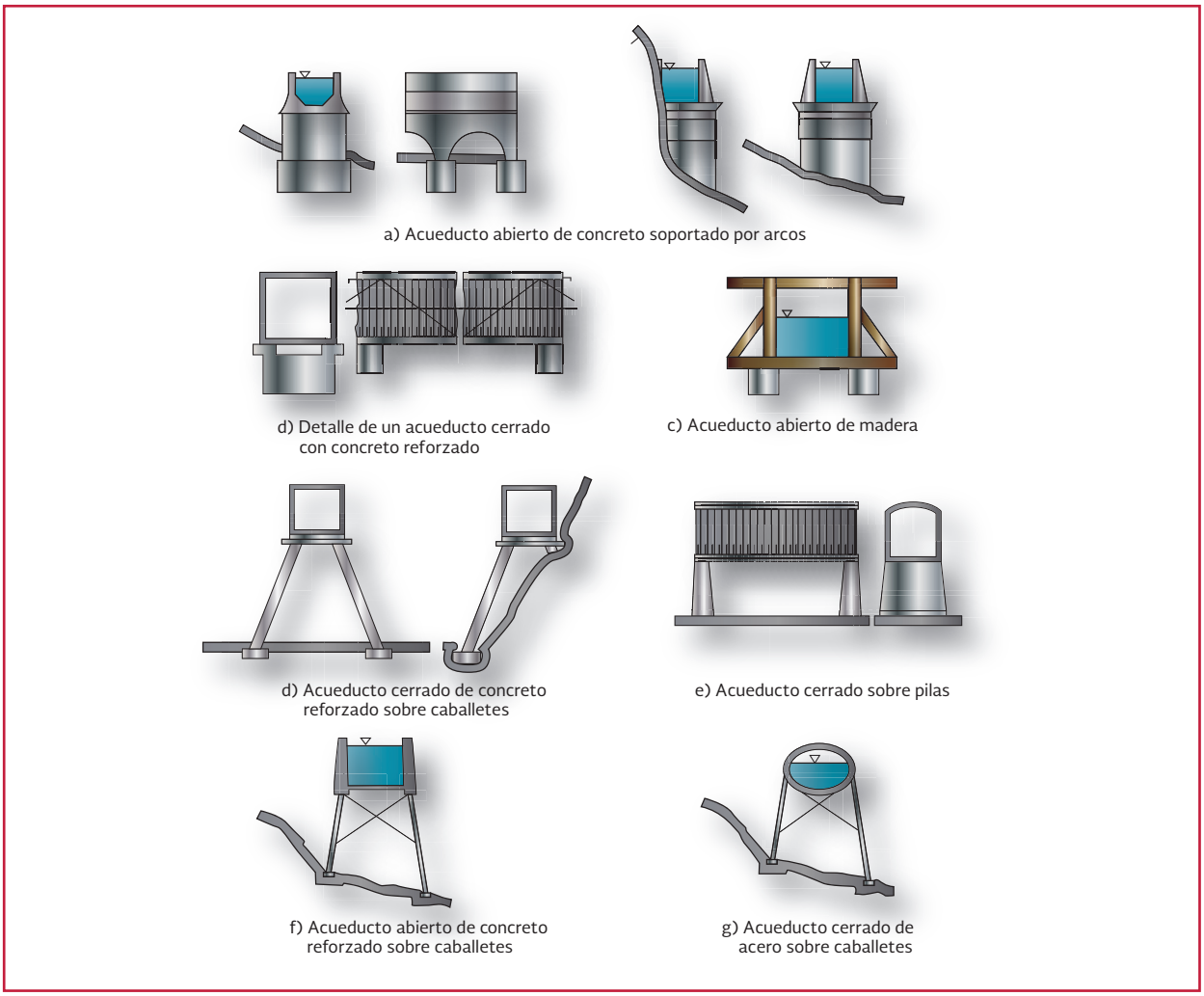
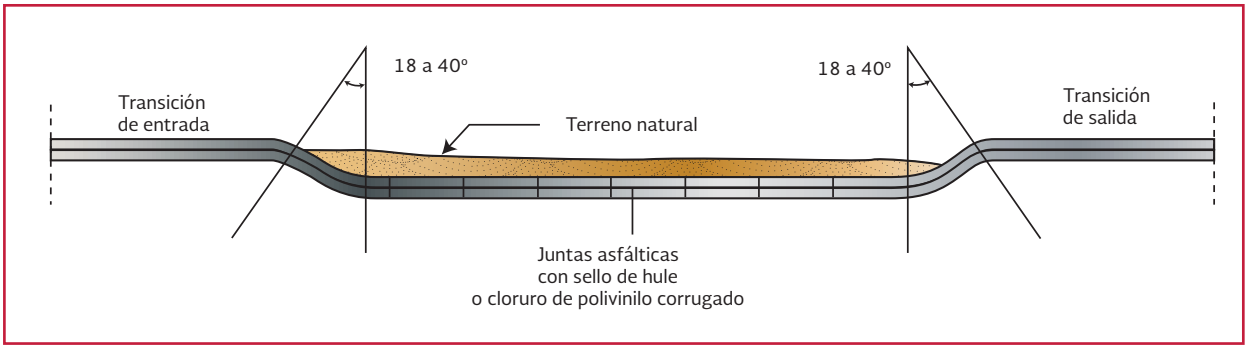


Ilustración 8.21 Esquema de sifón invertido en el cruce de un canal principal con un arroyo



Es frecuente que algunos conductos que operan parcialmente llenos tengan que ser cubiertos para no exponerlos. La protección se puede deber a razones de seguridad cuando se prevén derrumbes del terreno circunvecino o para proteger la calidad del agua. La sección puede ser rectangular, circular, herradura o cualquier otra forma razonable, donde la forma del conducto queda supeditada a razones estructurales para soportar las cargas estructurales.

8.8.3 Transiciones

Las contracciones y expansiones en canales artificiales constituyen la unión de dos canales con secciones transversales distintas, longitudes relativamente cortas, con la finalidad de reducir o aumentar la velocidad del flujo, en el segundo caso lo que se impide es el depósito de material suelto.

Hay que recordar que el diseño de la contracción puede realizarse con la teoría de la onda oblicua, pasando de la sección a) - b) y repitiendo el proceso, de la b) - c); para ello se puede utilizar la Ilustración 8.22.

El cálculo se realiza en dos etapas, haciendo el cambio de variables, a efecto de poder utilizar la figura. La secuencia de cálculo sería la siguiente

a) Se supone un valor de θ_0 entre los posibles que cubre la curva correspondiente a Fr_1 en el primer cuadrante
b) Con Fr_1 y θ_0 se pasa al segundo cuadrante para obtener β_1 y Y_2/Y_1; y con este último valor y Fr_1 se pasa al tercer cuadrante para obtener Fr_2
c) Se repite el paso anterior con el mismo valor de θ_0 pero reemplazando a Fr_1 por Fr_2 para obtener ahora a β_2.
d) Sustituyendo los valores obtenidos en los dos pasos anteriores en la Ecuación 8.51 se determina un valor de θ_0 calculado, que deberá de ser igual al θ_0 supuesto. En caso negativo se repite el procedimiento eligiendo un nuevo valor de θ_0. En caso positivo se continúa con el paso e)

$$tan(\beta_1 - \theta_0) = \frac{tan\theta_0}{\frac{b_1}{b_3}\left[1 - \frac{tan\theta_0}{tan\beta_1}\right] - 1}$$

Ecuación 8.51

e) Con los valores de θ_0 y Fr_2 correctos, se pasa al tercer cuadrante para determinar Y_3/Y_2 *Y* Fr_3. *El valor de* $Y_3/Y_1 = (Y_3/Y_2)\ (Y_2/Y_1)$, conviene que esté entre a) y c). En caso negativo podría probarse otro ancho b_3, si las condiciones topográficas lo permiten. La longitud definitiva de la contracción se determinaría de la Ecuación 8.52 y como comprobación debe de verificarse la Ecuación 8.53

$$L = \frac{b_1 - b_3}{2\tan\theta_0}$$

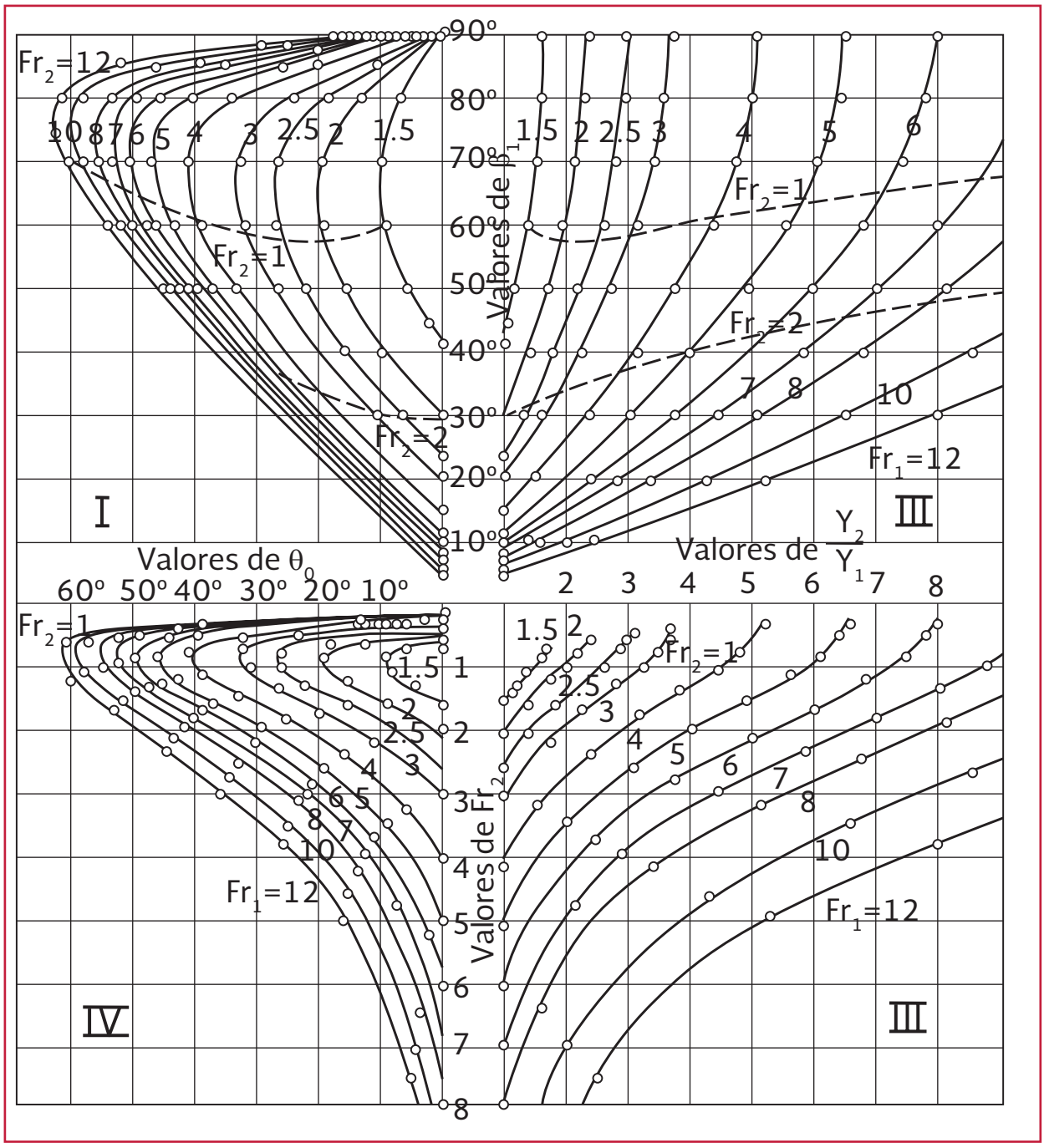
Ecuación 8.52

$$\frac{b_1}{b_3} = \left(\frac{Y_3}{Y_1}\right)^{3/2} \frac{Fr_3}{Fr_1}$$

Ecuación 8.53

En canales trapezoidales o de otra forma de sección no existe una teoría que permita diseñar contracciones, debido a la complejidad de las perturbaciones que se producen. En un análisis preliminar podría considerarse $b = B_1$; $Y_1 = A_1/B_1$ *y* $Fr_1 = V_1/\sqrt{(g\ A_1/B_1)}$; para obtener posteriormente la solución con ayuda de un modelo hidráulico.

Ilustración 8.22 Relaciones generales para salto hidráulico oblicuo



8.8.4 Curvas

Los cambios de dirección horizontal en un canal o río producen a menudo modificaciones importantes en el flujo como son: las corrientes de forma helicoidal y ondas cruzadas, la sobreelevación del flujo, la distribución de velocidades en las secciones transversales de la curvas es muy irregular y finalmente las pérdidas de energía que alteran el perfil de la superficie libre aguas arriba de la curva.

Para disminuir el efecto de las ondas oblicuas, se recomienda que el radio medio r_m satisfaga la condición

$$\frac{r_m}{B_1} > 4\ Fr_1^2 \qquad \text{Ecuación 8.54}$$

donde:

B_1 = Ancho de la superficie libre

Fr_1 = Número de Froude antes de la curva

Para reducir el efecto de la sobre elevación del agua se recomienda el criterio de Knapp, que consiste en dar una pendiente transversal a la plantilla S_t, a fin de equilibrar la componente del peso del agua, W, en la dirección radial con la fuerza centrífuga, Ilustración 8.23. Esto implica que:

$$S_t = \frac{V_1^2}{g\ r_m} \qquad \text{Ecuación 8.55}$$

Para evitar cambios bruscos en las características del flujo la pendiente transversal debe proporcionarse de manera gradual, desde cero al principio de la curva, Ilustración 8.23, aumentando 1inealmente hasta el máximo al final de la deflexión θ_0. Después se mantiene constante el valor máximo en toda la parte central, para disminuir gradualmente hasta cero en una longitud de arco que corresponde también a θ_0, antes de terminar la curva.

8.8.5 Bifurcaciones

El flujo en la bifurcación de un canal (unión o separación), es un fenómeno que envuelve numerosas variables, tal como los caudales, que escurren por ella, ángulo de intersección, forma y pendiente de los canales, dirección y magnitud de los gastos, redondeo en el muro de unión o separación, etc. A esto debe agregarse la posibilidad de régimen subcrítico o supercrítico o de un cambio de régimen.

El problema es tan complicado que sólo algunos casos simples y específicos han sido estudiados, y por lo mismo, sus resultados difícilmente pueden generalizarse; por lo que, es más recomendable un estudio en modelo hidráulico para cada caso particular que una aproximación teórica del problema, cuando se desea seguridad y precisión en los resultados.

8.8.5.1.Separaciones

El comportamiento del perfil de flujo en régimen subcrítico depende de las condiciones de frontera de los canales secundarios; haciendo el cálculo del perfil del agua en la dirección contraria al escurrimiento y hacia el punto de separación. El gasto en el canal principal se distribuye hacia los secundarios, cumpliendo con la condición de que se debe tener igual energía en el sitio de la separación al considerar las pérdidas de carga hidráulica. En la Ilustración 8.24 se muestran perfiles de flujo en una separación a régimen subcrítico, sin cambio de régimen.

Ilustración 8.23 Sobreelevación de una curva simple a régimen supercítico

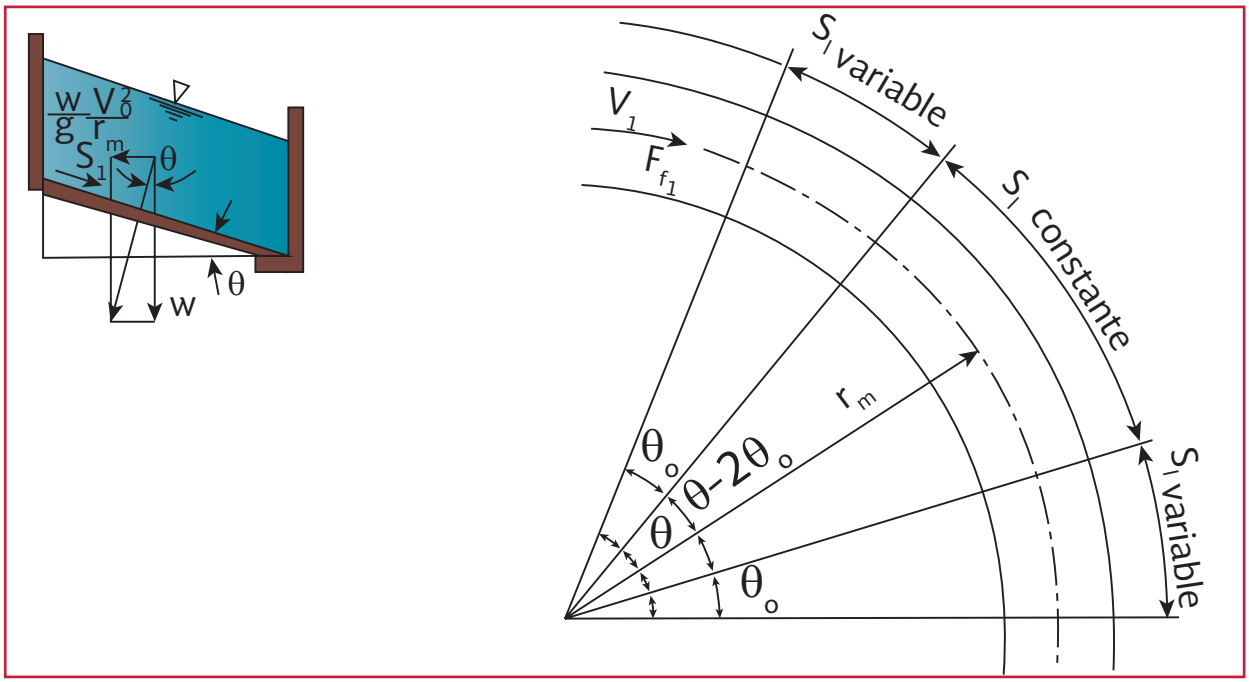
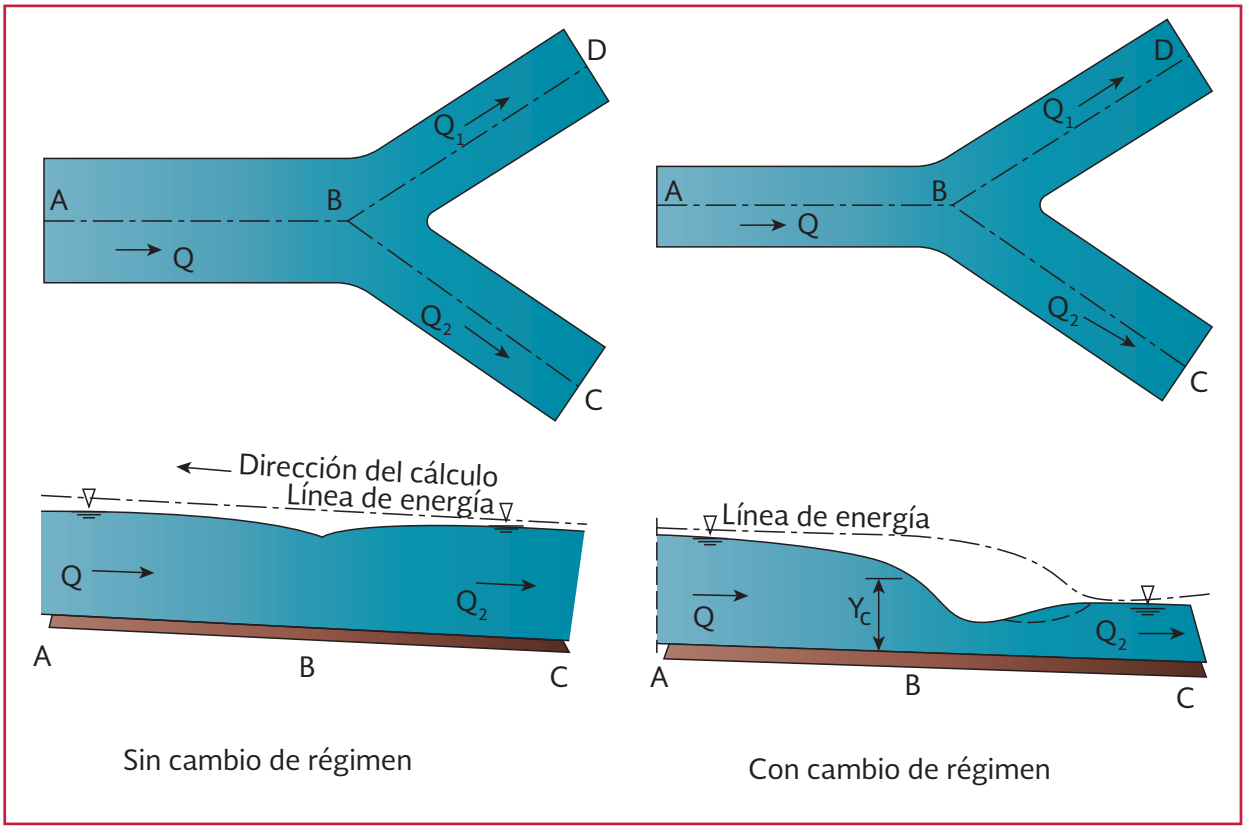


Ilustración 8.24 Perfiles de flujo en bifurcaciones en una separación a régimen subcrítico



En régimen supercrítico, el comportamiento del flujo queda determinado desde aguas arriba, es decir, desde el canal principal. Los gastos se dividen de acuerdo con la igualdad de energía (incluyendo pérdidas) en el punto de separación. En la Ilustración 8.25 se muestran perfiles de flujo en una separación a régimen supercrítico, sin o con cambio de régimen.

8.8.5.2.Uniones

El comportamiento de uniones en régimen subcrítico es similar al caso de separaciones. El cálculo en dirección contraria a la del flujo permite llegar al punto de unión, manejando la zona de transición de manera similar al de separación y satisfaciendo la condición de igual altura de energía (incluidas las pérdidas) al principio del canal principal. Con esta condición y el conocimiento de los gastos que se unen, se puede determinar el perfil del flujo en los canales secundarios. En ocasiones, la transición de subcrítico a supercrítico se hace por medio de un salto hidráulico, ver Ilustración 8.26, con un comportamiento del flujo muy complejo.

En régimen supercrítico el cálculo es en la dirección del flujo hasta el sitio de la unión. En la zona de transición se aplica la ecuación del impulso y cantidad de movimiento. En el canal principal se determina el perfil del flujo a partir del nivel de energía y los gastos conocidos. En sí, el comportamiento del flujo es complicado y por ello se recurre a estudiarlo en un modelo hidráulico.

8.8.6 Recomendaciones generales para el trazo de una línea de conducción

Al considerar el trazado en planta de una red de conducción por gravedad, es preciso tener en cuenta una característica fundamental de los canales y ésta es la de su flexibilidad; es decir, la facilidad, mucho mayor que cualquier otra obra lineal de transporte, que tienen los canales, en función de la pequeña velocidad con la que, normalmente, discurre el agua por ellos, para acoplarse a curvas de radio muy reducido sin que se produzca, apenas, aceleración centrifuga. Esta flexibilidad, naturalmente depende de la anchura del canal, por lo que, en términos relativos, se acepta como criterio de proyecto a estos efectos, que el radio mínimo sea cinco veces la anchura del canal.

Frente a la enorme flexibilidad en planta que proporciona el criterio expuesto, los canales son estrictamente rígidos en perfil, ya que, además de tener, como es obvio, siempre la pendiente en una sola dirección, su valor máximo admisible, al objeto de que la velocidad no sobrepase valores límites, relativamente pequeños, está acotado superiormente. No obstante, esta rigidez no es, como pudiera parecer a primera vista, fuente de problemas para el proyectista sino que, al contrario, facilita su tarea porque limita en gran manera el número de alternativas viables; no cabe duda, sin embargo, de que puede imponer soluciones costosas, inherentes a la propia esencia de este tipo de conducciones.

8.8.6.1. Determinación de alternativas

En los cauces para conducción a cielo abierto, son los condicionamientos funcionales y geomorfológicos los que dominan, fundamentalmente, en la determinación de alternativas, aunado a ello se deben tomar en cuenta las características catastrales de los predios por los que atravesará la línea.

8.8.6.2. Cauces de transporte

Estos cauces escurren, en general, por terrenos de relieve accidentado y deben transpor-

Ilustración 8.25 Perfiles de flujo en bifurcaciones en una separación a régimen supercrítico

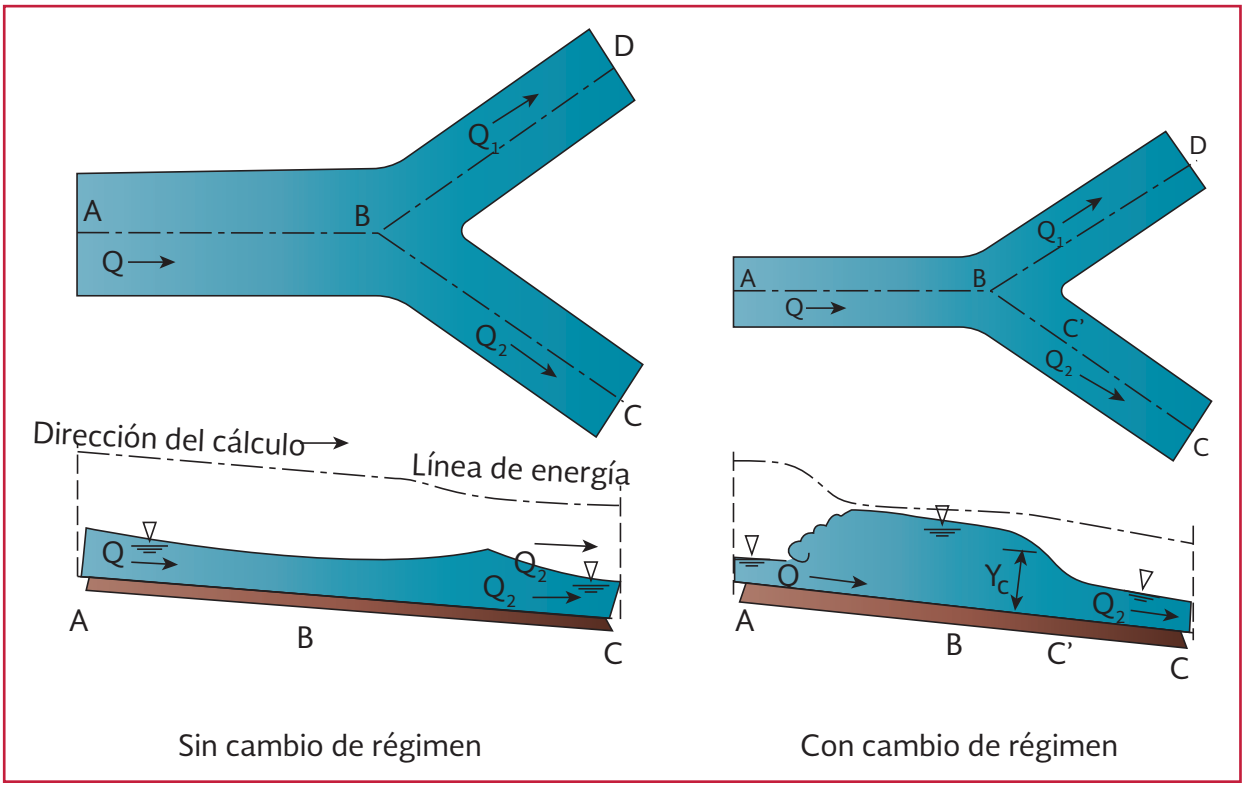
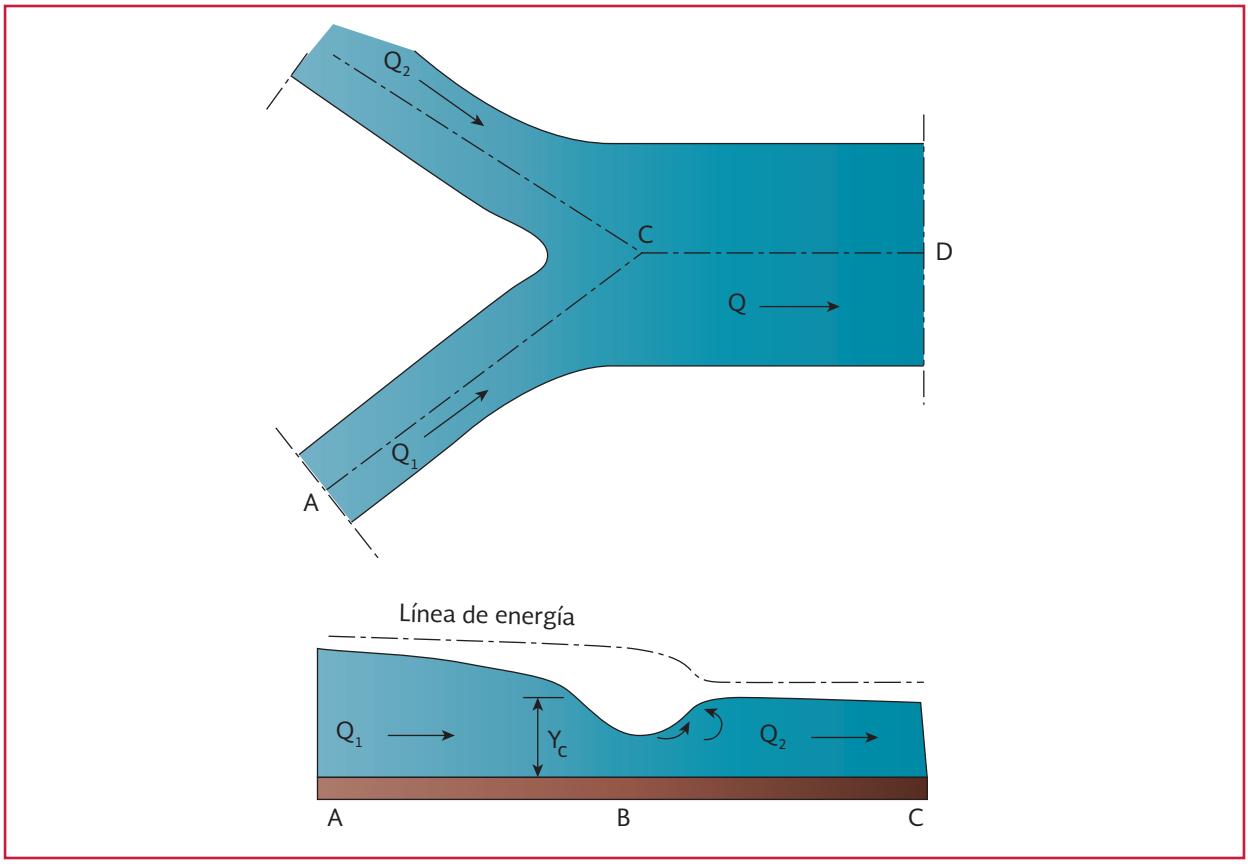


Ilustración 8.26 Perfiles de flujo en una unión con transición de régimen subcrítico a supercrítico



tar desde pequeños hasta grandes caudales de acuerdo a la demanda; en la determinación de las diferentes alternativas influirán de forma decisiva, los puntos de paso obligado, cruces con vías de comunicación, "pasillos" geológicos, depósitos reguladores, etc., que fraccionan el trazado total.

Entre estos puntos de paso obligado las diferentes alternativas se suelen producir por consideraciones topográficas y geológicas y, mucho menos frecuentemente, catastrales. En general, las alternativas se diferencian de la que pudiera denominarse solución base alternativa obvia que recorre todo el tramo a cielo abierto, en la introducción de obras especiales, como son túneles, acueductos, sifones, etc., que permiten reducir la longitud, aumentando los costos unitarios, y/o evitar los puntos de geología dudosos; a estos efectos, no debe olvidarse que un trazado más largo impone una pendiente más pequeña, ya que el desnivel total suele estar determinado de antemano, y, en consecuencia, precisa mayor sección.

Además del caso obligado en que sea preciso atravesar una divisoria entre cuencas hidrográficas diferentes, el túnel debe considerarse en las alternativas, al menos en los casos siguientes:

- Cuando el trazado en túnel permite un acortamiento importante en la longitud del cauce, respecto a la solución en canal a cielo abierto. La relación entre las longitudes que hacen más rentable una u otra solución, depende del tipo de terreno, tanto exterior como interior, y del canal de proyecto, ya que la sección en túnel tiene un mínimo constructivo que para caudales pequeños la hace, en general, inasequible; con todas las reservas propias del caso, puede decirse, sin embargo, que debe plantearse la alternativa túnel en cuanto el valor de dicha relación de longitudes es superior a dos
- Cuando existen peligros de deslizamiento en las laderas exteriores, ya sea durante la construcción o por efecto de las filtraciones, caso frecuente cuando existen yesos
- Cuando la pendiente transversal del terreno sea tan escarpada que obligue a obras muy importantes de excavación y/o fábrica para la instalación del canal exterior. En estos casos no debe olvidarse el costo de procurar caminos de acceso, absolutamente imprescindibles tanto para la construcción como para el mantenimiento, así como la eventual necesidad de cubrir el canal para protegerse contra los desprendimientos
- Cuando el canal deba cruzar por terrenos en los que bien durante su construcción, efectos de las excavaciones, o eventual rotura, pudieran ponerse en peligro viviendas e incluso vidas humanas

Si el túnel es suficientemente largo puede implicar más de una alternativa, según que se realice con una sola alineación o con planta poligonal; esta última solución permite acercar el túnel a las laderas y efectuar galerías y/o pozos de ataque, que sí bien aumentan su longitud total, disminuyen la existente entre dos bocas sucesivas, facilitando los problemas de iluminación, ventilación, y fundamentalmente, el de extracción de escombros. Como puede comprenderse, éste es un problema en el que la mejor solución depende no solamente de las posibilidades que permita la fisiografía, sino del material y tecnología disponible y sobre todo de los plazos; a estos efectos, debe tenerse en cuenta que un trazado que permita realizar la construcción

del túnel atacando simultáneamente por varias bocas, puede terminarse con gran adelanto, a pesar de su mayor longitud, sobre uno directo y, en consecuencia, comenzar a hacer uso de la conducción, mejorando, en definitiva, la relación actualizada entre los beneficios y costos del proyecto. En relación con este tipo de galerías de ataque, no debe olvidarse la posibilidad de emplearlas, posteriormente, para la conservación y explotación del túnel principal.

Así como los túneles permiten acortar el camino entre dos puntos separados por una montaña, los sifones y acueductos efectúan la misma función con respecto a los barrancos, con o sin agua, que interceptan el cauce del canal; cuando se presenta este caso es preciso, en general, estudiar comparativamente ambas alternativas, respecto a la solución base de rodear el obstáculo, ya que, en principio, son válidas las dos. No obstante, pueden enumerarse los principios generales siguientes:

- El acueducto produce menores pérdidas de carga que el sifón y su funcionamiento hidráulico está sujeto a muchas menos dificultades e imprevistos
- Cuando existen cursos de agua permanentes en el barranco es, casi siempre, más fácil cruzar con acueductos que son sifones
- Si el caudal es muy importante el costo del sifón puede ser prohibitivo
- Cuando el desnivel a salvar es grande, de forma que la altura de las pilas también lo sería, el costo del acueducto se incrementa en gran proporción, aunque se utilicen, por supuesto, soluciones de hormigón pretensado
- El acueducto transmite cargas unitarias mucho más importantes a la cimentación, pero en sitios localizados; se pueden elegir, por lo tanto, los más convenientes, pero en detrimento de la recomendable homogeneización de vanos y luces

8.8.6.3. Comparación de alternativas

Una vez definidas las diferentes alternativas de trazado en planta, seguramente se podrán eliminar algunas por simple comparación cualitativa; esta circunstancia se producirá, en general, entre soluciones del mismo tipo donde sea prácticamente evidente que los costos totales han de resultar superiores porque implican mayor cantidad de unidades del mismo tipo y son, en consecuencia, independientes de los precios unitarios que se impongan posteriormente. Se podrá seleccionar, por lo tanto, un grupo de alternativas, de diferente trazado en planta, de cada una de las cuales debe acometerse el estudio de su perfil longitudinal y el análisis de las secciones transversales correspondientes, antes de proceder a su valoración cuantitativa.

8.8.6.4. Trazado en perfil

Consideraciones generales

La determinación de las secciones transversales más adecuadas a cada trazado es un problema que está íntimamente ligado con el del perfil longitudinal ya que, como es sabido, el caudal depende de la sección y de la velocidad, y ésta de la pendiente; en definitiva, los cauces intentan transportar determinados caudales con el mínimo costo de inversión.

Se analiza en primer lugar el problema de los perfiles longitudinales, porque al estar fijados de antemano los desniveles totales entre la toma y el punto de entrega de la conducción, las pen-

dientes medias correspondientes a cada una de las alternativas de trazado también lo estarán, de forma que únicamente serán posibles desviaciones locales, respecto a dicha pendiente media, efectuadas en tramos parciales y con objeto de optimizar el costo total. Es preciso recordar, a estos efectos, que debe intentarse que las conducciones funcionen siempre en régimen uniforme para el caudal de proyecto, excepto en aquéllos tramos localizados en los que condicionamientos indispensables impongan regímenes gradualmente variados o estructuras especiales como rápidas y cajas de amortiguamiento para saltos hidráulicos.

Velocidades admisibles

Los valores admisibles de la velocidad en los diferentes cauces están limitados superior e inferiormente. Los límites inferiores se fijan con objeto de impedir la sedimentación y dependen de la cantidad de finos en suspensión que lleve el agua, de la granulometría y naturaleza de aquéllos y de la profundidad total del canal, pero, en general, e independientemente del tipo de cauce y de su localización en la red; no se recomienda que la velocidad media sea inferior a 0.50 m/s. Los límites superiores, por el contrario, admiten mucha mayor variación en función del tipo de canal, de su revestimiento y de la situación de cada tramo estudiado. En canales revestidos no existe, en principio, ninguna dificultad en que la velocidad sea de 3 m/s e incluso superior; no obstante, generalmente, es bastante más pequeña.

Las cifras anteriores se entienden referidas a los tramos de régimen uniforme, ya que en los puntos localizados de obras especiales puede convenir aumentar la velocidad para disminuir la sección transversal y, en consecuencia, el costo de la obra; por otra parte, existen zonas de transiciones, estrechamientos obligados, y rápidos, etc., en las que priman otras consideraciones y la única limitación impuesta a la velocidad, 8 m/s, proviene de la necesidad de impedir erosiones por cavitación en las obras que, normalmente, son todas de hormigón.

Análisis del flujo

Al estudiar cualquiera de las alternativas del trazado inicialmente consideradas se dispone en cada tramo del caudal de proyecto, de la velocidad máxima admisible y en consecuencia de la superficie transversal mínima, así como de los límites entre los que puede variar la pendiente longitudinal del fondo; a partir de las consideraciones que se realizan posteriormente se conocerá también el tipo de sección más adecuado a cada tramo y, por lo tanto, todas las características geométricas de ésta que permiten la obtención de los tirantes normal, crítico, etc. El perfil longitudinal estará formado por una serie de tramos en los que se producirá el régimen normal, por lo tanto un tirante normal, unidos mediante zonas en las que el régimen será gradualmente variado y, ocasionalmente, pueden existir puntos localizados, rápidas, vertederos, etc., de flujo variable y rápidamente variado; conviene, antes de calcularlo exactamente, analizar cualitativa y rápidamente el perfil hidráulico que corresponde a un trazado determinado, esta operación se suele denominar "análisis de flujo", ya que las condiciones impuestas, por el trazado en planta, al perfil longitudinal, pueden producir situaciones, deseables desde un punto de vista hidráulico que permitan eliminar alguna de las alternativas inicialmente seleccionadas u obliguen a efectuar cambios.

En las conducciones por canales, los cauces sue-

len ser prismáticos, es decir, de tramos de sección constante y en ellos el procedimiento general a seguir es el siguiente:

- Dibujar el perfil longitudinal con la escala vertical distorsionada
- Calcular los tirantes normales en cada tramo de sección constante y dibujar una línea que represente el flujo en esos tramos; como es sabido, esta línea debe ser paralela al fondo de cada tramo
- Calcular el tirante crítico en cada tramo y dibujar una línea, que ha de ser paralela a la anterior, que represente este tirante en cada punto
- Localizar todas las posibles secciones de control. A estos efectos, se entiende por sección de control aquélla en la que, por cualquier causa, se conoce, por supuesto en función del caudal, el tirante que debe producirse; dicho tirante fijo puede ser el normal, el crítico o cualquier otro, siempre que sea conocido. Las secciones de control pueden estar impuestas por obras artificiales como rápidas, flujo debajo de compuertas, etc., o simplemente, por condicionamientos hidráulicos en los extremos de aguas arriba y aguas abajo de cada tramo
- A partir de estos puntos de control y puesto que se conoce la posición de los tirantes normal y crítico en cada tramo, así como la calificación de la pendiente (subcrítica, crítica o supercrítica), y el tipo de flujo ha de ser, necesariamente, uno de los trece anteriormente descritos, de tal forma que es inmediata la determinación del perfil hidráulico. Se insiste en que se obtiene, únicamente, una aproximación cualitativa de dicho perfil
- Cuando la influencia de un punto de control implica un régimen rápido hacia aguas abajo y las condiciones en esa zona obligan a uno lento, debe producirse necesariamente un salto hidráulico; el problema principal consiste, entonces, en fijar la posición y características de este y el medio para controlarlo y evitar pérdidas por fugas en el canal debidas al salto

Con el procedimiento explicado se llega a disponer de la forma de la superficie del agua para cada alternativa, permite efectuar los cambios oportunos, introducir o eliminar las obras precisas e incluso descartar por motivos hidráulicos algunas de las alternativas que hayan sido consideradas.


06
05

Conclusiones

Con el presente documento se dan a los Organismos Operadores las recomendaciones para diseñar y seleccionar los componentes de una conducción de agua potable, que aseguren una adecuada vida útil y una economía real en la instalación y reparación desde la fuente de captación, hasta la descarga.

El presente libro busca ser un instrumento de referencia y consulta de los proyectistas, constructores, dependencias, empresas y organismos operadores relacionados con el sector agua potable para la elaboración de los proyectos.

Se han recopilado el material y las normas actualizadas, tanto nacionales como extranjeras, que rigen en la materia y que se consideran útiles para el diseño de conducciones a presión y a superficie libe, procurando reunirlas en una sola publicación, dando las recomendaciones que se consideran pertinentes para lograr un buen diseño y se incluyen tablas e ilustraciones como apoyo visual de diseño al proyectista, así mismo se incluyen las referencias de la literatura consultada y que puede resultar de ayuda al usuario para lograr una mayor profundidad en algún tema en específico al aplicar sus conocimientos.

Con el surgimiento de los modelos de simulación aplicados a la simulación de conducciones a presión y a superficie libre, diferentes firmas de ingeniería comercializan sus productos dentro del mercado. Esto cobrará importancia debido a que el usuario de acuerdo a sus necesidades específicas, debe decidir con mayor precisión cuál sería la elección final.

Recuerde que los procedimientos, datos, modelos matemáticos y programas de cómputo, presentados en este libro, obedecen a la experiencia vertida a lo largo del tiempo por parte de los especialistas en la materia y de los proyectos en que se han trabajado. Sin embargo, en ningún caso debe considerarse esta información, como reglamento o norma oficial, debe ser considerado una guía para el proceso de diseño de una línea de conducción de agua potable. Considérese que ninguna conducción de agua potable es igual a otra; los procedimientos, datos y resultados obtenidos, no pueden exportarse de uno a otro.

Bibliografía

Arteaga, T. (1993). Hidráulica Elemental. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo.1a edición. Chapingo, México.

Arteaga, T. (1997). Hidráulica de los sistemas de conducción. Apuntes de clase. Curso impartido al 5° año del departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Arteaga, T; Paz, S; Vázquez S. (2006). Hidráulica de los sistemas de conducción. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo. 1a edición. Chapingo, México, pp. 255-486.

AWWA C200-12. (2012). Steel Water Pipe 6 Inch and Larger. American Water Works Association Sixth Edition. Denver, Colorado, USA pp 1-48.

AWWA C210-07 (2007). Liquid Epoxy Coating System for the Interior and Exterior of steel Water Pipelines. American Water Works Association. Sixth Edition. Denver, Colorado, USA, pp. 1-28.

AWWA M11. (2004). Steel Pipe. A guide for design and Installation. American Water Works Association Fourth Edition. Denver, Colorado, USA, pp. 1-202.

AWWA M23. (2002). PVC Pipe Design and Installation. American Water Works Association Second Edition. Denver Colorado, USA, pp. 1-107.

AWWA M27. (2013). External Corrosion Control for Infrastructure Sustainability. American Water Works Association Third Edition. Denver Colorado, USA, pp. 1-74.

AWWA M45. (2013). Fiberglass Pipe Design. Third Edition. American Water Works Association Denver Colorado, USA, pp. 1-140.

AWWA M55. (2006). Manual of water supply practices. PE Pipe- Design and Installation. American Water Works Association First edition. Denver Colorado, USA, pp. 1-141.

Brater, F; Williams, K; Lindell, E and Wey, Y. (1996). Handbook of Hydraulics. McGraw Hill Companies Inc. Seventh Edition. USA pp. 6.39.

Cabrera, E.; Espert, V.; García-Serra, J. y Martínez, F. (1997). Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. UD Mecánica de Fluidos. Vol., I-II. Universidad Politécnica de Valencia. Editori-

al UPV, (2ª edición) pp. 1-192.

Colebrook, C y White, M. (1939). Turbulent Flow in Pipes, with particular reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipe Laws. Institution Journal. SEC. INST. C.E. pp. 133-156.

CFE. (2008a). Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por sismo Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, D.F.

CFE. (2008b). Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, D.F.

CFE. (2015) Tablas de tarifa, recuperado el día 02 de febrero de 2015, de la dirección electrónica: www.cfe.gob.mx

Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping System. (2002). NACE Standard RPO169-2002. Texas, USA, pp. 1-29.

Chow, V. (1994). Hidráulica de canales abierto. Mc Graw Hill Book Company Inc.1a edición en español. Bogotá, Colombia, pp. 3-597

Darcy H. (1856). Recherches Experimentales Relatives au Mouvement de I´Eau dans les Tuyaux (Experimental Research on the Movement of Water in Pipes). Mallet-Bachelier, París.

Guarga, R., Sánchez, B., Carmona, R., & Aguilar, L. (1985). Diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión. SARH. México.

Hydraulic Research Station (1969). Charts for the Hydraulic Design of Channels and Pipes. H.M.S.O. 3ª edition. London.

Mays, W. (2000). Water distribution system Handbook. McGraw Hill. Arizona, USA, chapter. 1.

Moody, L. (1944). Friction Factors for Pipe Flow. Transaction of the ASME, pp. 671-684

Mosonyi E. (1963). Water Power Development, volume 1, Academia de Ciencias de Hungría, Budapest.

Smetana J. (1931) Hydraulika, volumen 2 Nalkadatelsyvi Ceskoslovenské Akademie.

Peterka, A. (1954). Spillway Test Confirm Model-Prototype Conformance. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. Denver Colorado, USA pp. 1-62.

Peterka, A. (1984). Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. Denver Colorado, USA pp.1-18.

Sanks L. (1998). Pumping Station Design. Butterworth-Heinemann. Second Edition. Woburn, Massachusetts pp. 141-144.

Sotelo, G. (1997). Hidráulica General. Volumen 1 Fundamentos. Limusa, México D.F. pp. 285-286

Sotelo, G. (2002). Hidráulica de canales. Facultad de Ingeniería, UNAM México D.F. pp. 395-806

Swamee, P., & Jain, A. (1976). Explicit equations for pipe flow problems. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 102(5), pp. 657-664.

Tullis, J. (1989). Hydraulics of Pipelines. Pumps, Valves, Cavitation, Transients. John Wiley & Sons, Inc. USA. pp. 81-116.

Tzatchkov, V.G., Alcocer Yamanaka, V.H., Bourguett Ortiz, V.J., Arreguín Cortés, F.I. (2014). Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

Valdez, E. (1990). Abastecimiento de agua potable. UNAM. México D.F. pp. 146



Tabla de conversiones de unidades de medida

Sigla	Significado
mg	miligramo
g	gramo
kg	kilogramo
mm	milímetro
cm	centímetro
m	metro
ml	mililitro
l	litro
m^3	metro cúbico
s	segundo
h	hora
d	día
mg/l	miligramo por litro

Sigla	Significado
kg/m^3	kilogramo por metro cúbico
l/s	litros por segundo
m^3/d	metros cúbicos por día
Sm^3/h	condiciones estándar de metro cúbico por hora
Scfm	condiciones estándar de pies cúbicos por minuto
°C	grados Celsius
psia	libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta
cm/s	centímetro por segundo
m/s	metro por segundo
HP	caballo de fuerza (medida de energía)
kW	kilowatt
UNT	unidades nefelométricas de turbiedad

Longitud

Sistema métrico	Sistema Inglés	Siglas
1 milímetro (mm)	0.03	in
1 centímetro (cm) = 10 mm	0.39	in
1 metro (m) = 100 cm	1.09	yd
1 kilómetro (km) = 1 000 m	0.62	mi
Sistema Inglés	**Sistema métrico**	
1 pulgada (in)	2.54	cm
1 pie (ft) = 12 pulgadas	0.30	m
1 yarda (yd) = 3 pies	0.91	m
1 milla (mi) = 1 760 yardas	1.60	km
1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas	1.85	km

Superficie

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm^2 = 100 mm^2	0.15	in^2
1 m^2 = 10 000 cm^2	1.19	yd^2
1 hectárea (ha) = 10 000 m^2	**2.47**	**acres**
1 km^2 = 100 ha	0.38	mi^2
Sistema Inglés	**Sistema métrico**	
1 in^2	6.45	cm^2
1 ft2 = 144 in^2	0.09	m^2
1 yd^2 = 9 ft^2	0.83	m^2
1 acre = 4 840 yd^2	4 046.90	m^2
1 $milla^2$ = 640 acres	2.59	km^2

Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm^3	0.06	in^3
1 dm^3 = 1 000 cm^3	0.03	ft^3
1 m^3 = 1 000 dm^3	1.30	yd^3
1 litro (L) = 1 dm^3	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	**Sistema métrico**	
1 in^3	16.38	cm^3
1 ft^3 = 1 728 in^3	0.02	m^3
1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU	29.57	mL
1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU	0.47	L
1 galón EUA = 0.8327 galones RU	3.78	L

Masa/peso

Sistema métrico	Sistema inglés	
1 miligramo (mg)	0.0154	grano
1 gramo (g) = 1 000 mg	0.0353	onza
1 kilogramo (kg) = 1 000 g	2.2046	libras
1 tonelada (t) = 1000 kg	0.9842	toneladas larga
Sistema Inglés	**Sistema métrico**	
1 onza (oz) =437.5 granos	28.35	g
1 libra (lb) = 16 oz	0.4536	kg
1 stone = 14 lb	6.3503	kg
1 hundredweight (cwt) = 112 lb	50.802	kg
1 tonelada larga = 20 cwt	1.016	t

Temperatura

$^{o}C = \frac{5}{9}(^{o}F - 32)$	$^{o}F = \frac{9}{5}(^{o}C) + 32$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	**Símbolo**	**Factor de conversión**	**Se convierte a**	
Longitud				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
Presión/esfuerzo				
Kilogramo fuerza/cm^2	kg_f/cm^2	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada^2	lb/ plg^2, PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H_2O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
Fuerza/ peso				
kilogramo fuerza	kg_f	9.80	newton	N
Masa				
libra	lb	0.45	kilogramo	kg
onza	oz	28.30	gramo	g
Peso volumétrico				
kilogramo fuerza/m^3	kg_f/m^3	9.80	N/m^3	N/m^3
libra /ft^3	lb/ft^3	157.08	N/m^3	N/m^3
Potencia				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
Viscosidad dinámica				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
Viscosidad cinemática				
viscosidad cinemática	ν	1	stoke	m^2/s (St)
Energía/ Cantidad de calor				
caloría	cal	4.18	joule	J
unidad térmica británica	BTU	1 055.06	joule	J
Temperatura				
grado Celsius	°C	tk=tc + 273.15	grado Kelvin	K

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s^2

Longitud								
de / a	mm	cm	m	km	mi	milla náutica (nmi)	ft	in
mm	1.000	0.100	0.001					
cm	10000	1.000	0.010				0.033	0.394
m	1 000.000	100.000	1.000	0.001			3.281	39.370
km			0.001	1.000	0.621	0.540	3 280.83	0.039
mi			1 609.347	1.609	1.000	0.869	5 280.000	
nmi			1 852.000	1.852	1.151	1.000	6 076.115	
ft		30.480	0.305				1.000	12.000
in	25.400	2.540	0.025				0.083	1.000

Superficie								
de / a	cm^2	m^2	km^2	ha	mi^2	acre	ft^2	in^2
cm^2	1.00						0.001	0.155
m^2	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km^2			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi^2			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft^2	929.03	0.09					1.000	0.007
in^2	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm^3	m^3	L	ft^3	gal. EUA	acre-ft	in^3	yd^3
cm^3	1.000		0.001				0.061	
m^3		1.000	1 000.000	35.314	264.200			1.307
L	1 000.000	0.001	1.000	0.035	0.264		61.023	
ft^3		0.028	28.317	1.000	7.481			0.037
gal. EUA		0.004	3.785	0.134	1.000		230.974	
acre-ft		1 233.490				1.000		
in^3	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd^3		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm^3/s	gal/día	gal/min	l/min	m^3/día	m^3/h	ft^3/s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm^3/s	0.001	1.000	22.825	0.016	0.060	0.083		
gal/día		0.044	1.000			0.004		
gal/min	0.063	63.089	1 440.000	1.000	0.000	5.451	0.227	0.002
l/min	0.017	16.667	0.000	0.264	1.000	1.440	0.060	
m^3/día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m^3/h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft^3/s	28.316			448.831	1 698.960	2 446.590	101.941	1.000

Eficiencia de pozo		
de a	gal/min/pie	l/s/m
gal/min/pie	1.000	0.206
l/s/m	4.840	1.000

Permeabilidad						
de a	cm/s	gal/día/Pie²	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s	1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie²		1.000		0.041		0.055
millón gal/ día/acre			1.000	0.935		
m/día	0.001	24.543	1.069	1.000		1.351
pie/s	30.480			26 334.72	1.000	
Darcy		18.200		0.740		1.000

Peso								
de a	grano	gramo	kilogramo	libra	onza	tonelada corta	tonelada larga	tonelada métrica
Grano (gr)	1.000	0.065						
Gramo (g)	15.432	1.000	0.001	0.002				
Kilogramo (kg)		1 000.000	1.000	2.205	35.273			0.001
Libra (lb)		453.592	0.454	1.000	16.000			
Onza (oz)	437.500	28.350			1.000			
t corta			907.180	2 000.000		1.000		0.907
t larga			1 016.000	2 240.000		1.119	1.000	1.016
t métrica			1 000.000	2 205.000		1.101	0.986	1.000

Potencia								
de a	CV	HP	kW	W	ft lb/s	kg m/s	BTU/s	kcal/s
CV	1.000	0.986	0.736	735.500	542.500	75.000	0.697	0.176
HP	1.014	1.000	0.746	745.700	550.000	76.040	0.706	0.178
kW	1.360	1.341	1.000	1 000.000	737.600	101.980	0.948	0.239
W			0.001	1.000	0.738	0.102		
ft lb/s				1.356	1.000	0.138	0.001	
kg m/s	0.013	0.013	0.009	9.806	7.233	1.000	0.009	0.002
BTU/s	1.434	1.415	1.055	1 055.000	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal/s	5.692	5.614	4.186	4 186.000	3 088.000	426.900	3.968	1.000

Presión							
de a	**atmósfera**	**Kg/cm²**	**lb/in²**	**mm de Hg**	**in de Hg**	**m de H_20**	**ft de H_2O**
atmósfera	1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm²	0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in²	0.068	0.070	1.000	51.816	2.036	0.710	2.307
mm de Hg	0.001	0.001	0.019	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg	0.033	0.035	0.491	25.400	1.000	0.345	1.133
m de agua	0.096	0.100	1.422	73.560	2.896	1.000	3.281
ft de agua	0.029	0.030	0.433	22.430	0.883	0.304	1.000

Energía								
de a	**CV hora**	**HP hora**	**kW hora**	**J**	**ft.lb**	**kgm**	**BTU**	**kcal**
CV hora	1.000	0.986	0.736				2 510.000	632.500
HP hora	1.014	1.000	0.746				2 545.000	641.200
kW hora	1.360	1.341	1.000				3 413.000	860.000
J				1.000	0.738	0.102		
ft.lb				1.356	1.000	0.138		
kgm				9.806	7.233	1.000		
BTU				1 054.900	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal				4 186.000	3 087.000	426.900	426.900	1.000

Transmisividad			
de a	**cm²/s**	**gal/día/pie**	**m²/día**
cm²/s	1.000	695.694	8.640
gal/día/ft	0.001	1.000	0.012
m²/día	0.116	80.520	1.000

Conversión de pies y pulgadas, a metros												
ft, in/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.000	0.025	0.051	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.279
1	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584
2	0.610	0.635	0.660	0.686	0.711	0.737	0.762	0.787	0.813	0.838	0.864	0.889
3	0.914	0.940	0.965	0.991	1.016	1.041	1.067	1.092	1.176	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7,696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.60 1	9.627	9.652	9.677	9.703	9.728
32	9.754	9.779	9.804	9.830	9.855	9.881	9.906	9.931	9.957	9.982	10.008	10.033
33	10.058	10.084	10.109	10.135	10.160	10.185	10.211	10.236	10.262	10.287	10.312	10.338
34	10.363	10.389	10.414	10.439	10.465	10.490	10.516	10.541	10.566	10.592	10.617	10.643
35	10.668	10.693	10.719	10.744	10.770	10.795	10.820	10.846	10.871	10.897	10.922	10.947

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

Tabla de conversión de pulgadas a milímetros								
Pulgadas	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0	0	3.175	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	22.225
1	25.4	28.575	31.75	34.925	38.1	41.275	44.45	47.625
2	50.8	53.975	57.15	60.325	63.5	66.675	69.85	73.025
3	76.2	79.375	82.55	85.725	88.9	92.075	95.25	98.425
4	101.6	104.775	107.95	111.125	114.3	117.475	120.65	123.825
5	127.0	130.175	133.35	136.525	139.7	142.875	146.05	149.225
6	152.4	155.575	158.75	161.925	165.1	168.275	171.45	174.625
7	177.8	180.975	184.15	187.325	190.5	193.675	196.85	200.025
8	203.2	206.375	209.55	212.725	215.9	219.075	222.25	225.425
9	228.6	231.775	234.95	238.125	241.3	244.475	247.65	250.825
10	254.0	257.175	260.35	263.525	266.7	269.875	273.05	276.225
11	279.4	282.575	285.75	288.925	292.1	295.275	298.45	301.625
12	304.8	307.975	311.15	314.325	317.5	320.675	323.85	327.025
13	330.2	333.375	336.55	339.725	342.9	346.075	349.25	352.425
14	355.6	358.775	361.95	365.125	368.3	371.475	374.65	377.825
15	381.0	384.175	387.35	390.525	393.7	396.875	400.05	403.225
16	406.4	409.575	412.75	415.925	419.1	422.275	425.45	428.625
17	431.8	434.975	438.15	441.325	444.5	447.675	450.85	454.025
18	457.2	460.375	463.55	466.725	469.9	473.075	476.25	479.425
19	482.6	485.775	488.95	492.125	495.3	498.475	501.65	504.825
20	508.0	511.175	514.35	517.525	520.7	523.875	527.05	530.225
21	533.4	536.575	539.75	542.925	546.1	549.275	552.45	555.625
22	558.8	561.975	565.15	568.325	571.5	574.675	577.85	581.025
23	584.2	587.375	590.55	593.725	596.9	600.075	603.25	606.425
24	609.6	612.775	615.95	619.125	622.3	625.475	628.65	631.825
25	635.0	638.175	641.35	644.525	647.7	650.875	654.05	657.225
26	660.4	663.575	666.75	669.925	673.1	676.275	679.45	682.625
27	685.8	688.975	692.15	695.325	698.5	701.675	704.85	708.025
28	711.2	714.375	717.55	720.725	723.9	727.075	730.25	733.425
29	736.6	739.775	742.95	746.125	749.3	752.475	755.65	758.825
30	762.0	765.175	768.35	771.525	774.7	777.875	781.05	784.225

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

Centígrados a Fahrenheit	°F=9/5°C+32
Fahrenheit a Centígrados	°C=5/9 (°F-32)
Réaumur a Centígrados	°C=5/4 °R
Fahrenheit a Réaumur	°R=4/9 (°F-32)
Réaumur a Fahrenheit	°F=9J4°R+32
Celsius a Kelvin	°K=273.15+^{0}C
Fahrenheit a Rankine	°Ra=459.67+°F
Rankine a Kelvin	°K=5/9°Ra

Factores químicos de conversión					
	A	B	C	D	E
Constituyentes	epm a ppm	ppm a epm	epm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm $CaC0_3$
calcio Ca^{+2}	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe^{+2}	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg^{+2}	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K^{+1}	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na^{+1}	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato $(HCO_3)^{-1}$	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato $(CO_3)^{-2}$	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro $(Cl)^{-1}$	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido $(OH)^{-1}$	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrato $(NO_3)^{-1}$	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato $(PO_4)^{-3}$	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato $(SO_4)^{-2}$	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio $Ca(HCO_3)_2$	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio ($CaCO_3$)	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio ($CaCl_2$)	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio ($CaSO_4$)	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico $Fe(HCO_3)_3$	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico $Fe_2(CO_3)_3$	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico $Fe_2(CO_4)_3$	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico $Mg(HCO_3)_2$	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico ($MgCO_3$)	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio ($MgCl_2$)	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio $Mg(OH)_2$	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio ($MgSO_4$)	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

epm = equivalentes por millón
ppm = partes por millón
gpg = granos por galón
p.p.m. $CaC0_3$ = partes por millón de carbonato de calcio



Ilustraciones

Ilustración 1.1	Línea de conducción con entrega del agua a un tanque de regulación	1
Ilustración 1.2	Línea de conducción con entrega del agua a la red de distribución	2
Ilustración 3.1	Volumen de control simplificado (adaptado de Sotelo, 1997)	10
Ilustración 3.2	Diagrama universal de Moody, coeficiente de fricción para cualquier tipo y tamaño de tubo (adaptado de Moody, 1944)	12
Ilustración 3.3	Nomograma para determinar la longitud equivalente (adaptado de Valdez, 1990)	16
Ilustración 3.4	Gradiente hidráulico	18
Ilustración 3.5	Curvas de funcionamiento de válvulas de admisión y expulsión de aire con orificios de 1" a 3”	20
Ilustración 3.6	Curvas de funcionamiento de válvulas de admisión y expulsión de aire con orificios de 4" a 12"	20
Ilustración 3.7	Curvas de funcionamiento de válvulas eliminadoras de aire con orificios de $^{3}/_{32}$" y $^{1}/_{8}$"	21
Ilustración 3.8	Curvas de funcionamiento de válvulas eliminadoras de aire con orificios de $^{3}/_{16}$" y $^{7}/_{32}$"	21
Ilustración 3.9	Esquema para el ejemplo de verificación de diseño	25
Ilustración 3.10	Línea de gradiente hidráulico sobre el terreno para el Ejemplo 3.3.	30
Ilustración 3.11	Arreglo típico de una instalación de bombeo para servicio de agua	31
Ilustración 3.12	Esquema ejemplo de calculo de potencia de bomba	31
Ilustración 4.1	Esquema para ejemplo de diámetro óptimo	37
Ilustración 4.2	Costos a valor presente del ejemplo	42
Ilustración 4.3	Factores que intervienen en el costo de la tubería	46
Ilustración 4.4	Curva típica de tensión-deformación circunferencial para tubería de poliéster r eforzado con fibra de vidrio (adaptado de AWWA M45, 2013)	48
Ilustración 4.5	Curva típica de tensión-deformación axial para tubería de poliéster reforzado con fibra de vidrio (adaptado de AWWA M45, 2013)	48
Ilustración 4.6	Curva general de tensión-deformación para tuberías de PE (AWWA M55, 2006)	49
Ilustración 4.7	Zanja transversal tipo para tubería de PVC (adaptado de AWWA M23, 2002)	52
Ilustración 4.8	Crecimiento de la demanda en función del tiempo	53
Ilustración 5.1	Metal protegido contra corrosión mediante una batería y un ánodo inerte (adaptado de AWWA M27, 2013)	57
Ilustración 5.2	Protección catódica, equipos y medición de resistencia de ánodos	57
Ilustración 5.3	Protección catódica por ánodos galvánicos (adaptado de AWWA M27, 2013)	59
Ilustración 5.4	Protección catódica a base de ánodos galvánicos en el que se muestra un punto de prueba para medición (adaptado de AWWA M27, 2013)	61

Ilustración 5.5	Medición del potencial de corrosión electroquímico de la estructura a proteger, con un electrodo de referencia (adaptado de AWWA M 27, 2013)	61
Ilustración 5.6	Protección catódica por corriente impresa de un tanque de almacenamiento enterrado (adaptado de AWWA M 27, 2013)	66
Ilustración 5.7	Rectificador de corrientes impresas	66
Ilustración 5.8	Protección catódica por corriente impresa (adaptado de AWWA M 27, 2013)	68
Ilustración 5.9	Corrosión debida a la falta de protección catódica por discontinuidad eléctrica (adaptado de AWWA M27, 2013)	68
Ilustración 5.10	Corrosión por corrientes vagabundas provocadas por un sistema de protección catódica por corriente impresa (adaptado de AWWA M27, 2013)	69
Ilustración 5.11	Protección catódica por corriente impresa para un tanque de acero, misma que ha sido utilizada para proteger una tubería aledaña mediante un puenteo (adaptado de AWWA M27, 2013)	69
Ilustración 5.12	Detalle de la disposición de un ánodo inerte (grafito) para un sistema de protección catódica por corriente impresa (adaptado de AWWA M27, 2013)	70
Ilustración 5.13	Recubrimiento anticorrosivo en tubería de agua	77
Ilustración 5.14	Recubrimiento de plástico	78
Ilustración 5.15	Recubrimiento por pintura	79
Ilustración 5.16	Representación gráfica de un sistema de recubrimiento convencional y de alto rendimiento	88
Ilustración 5.17	Sistema anticorrosivo de tres recubrimientos	90
Ilustración 5.18	Limpieza de superficie	94
Ilustración 5.19	Limpieza por chorro de arena	98
Ilustración 5.20	Pistola para la atomización convencional con aire, sin aire o mediante presión hidráulica de recubrimientos	107
Ilustración 5.21	Patrones de atomización: A) normal; B) con poros; C) desigual; D) boquilla en ángulo produciendo sobreatomización y E) sobreatomización	107
Ilustración 5.22	Terminación de la superficie	110
Ilustración 6.1	Vaciado accidental a gasto nulo (adaptado de Guarga *et al*. 1985)	111
Ilustración 6.2	Ubicación de válvulas para controlar el vaciado accidental a gasto nulo (adaptado de Guarga *et al*. 1985)	112
Ilustración 6.3	Estructura vertedora (adaptado de Guarga *et al*. 1985)	112
Ilustración 6.4	Vaciado accidental a gasto parcial (adaptado de Guarga *et al*. 1985)	113
Ilustración 6.5	Operación como canal de una sección (adaptado de Guarga *et al*. 1985)	113
Ilustración 6.6	Ubicación de orificios disipadores en flujos con gasto parcial (adaptado de Guarga *et al*. 1985)	114
Ilustración 6.7	Curvas descriptivas de la operación de la bomba (adaptado de Mays, 2000)	115
Ilustración 6.8	Bombas operando en paralelo (Mays, 2000)	115
Ilustración 6.9	Curva característica de dos bombas en serie (ANSI/HI 1.3)	116
Ilustración 6.10	Curva típica para una bomba de velocidad variable (adaptado de Mays, 2000)	117

Ilustración 6.11	Determinación de los puntos de operación para una sola velocidad de la bomba con variación de los valores de h_{stat} (Mays, 2000)	117
Ilustración 7.1	Válvulas de control (adaptado de Tullis, 1989)	122
Ilustración 7.2	Válvulas de no retorno (adaptado de Tullis, 1989)	126
Ilustración 7.3	Válvulas de aire (adaptado de Tullis, 1989)	127
Ilustración 8.1	Clasificación de flujo a superficie libre (adaptado de Sotelo, 2002)	131
Ilustración 8.2	Esquema representativo de los elementos de un canal (adaptado de Sotelo, 2002)	132
Ilustración 8.3	Gráfica de la energía específica (adaptado de Sotelo, 2002)	137
Ilustración 8.4	Distribución de velocidades en sección transversal (adaptado de Chow, 1994)	138
Ilustración 8.5	Distribución de velocidades en la sección longitudinal (adaptado de Chow, 1994)	138
Ilustración 8.6	Volumen diferencial para derivar la ecuación dinámica de flujo gradualmente variado (adaptado de Sotelo, 2002)	141
Ilustración 8.7	Diferentes perfiles de flujo a superficie libre que se presentan en un canal (adaptado de Sotelo, 2002)	145
Ilustración 8.8	Perfil de flujo del ejemplo	148
Ilustración 8.9	Salto hidráulico y su efecto en la energía específica (adaptado de Sotelo, 2002)	151
Ilustración 8.10	Transición de régimen supercrítico a subcrítico (adaptado de Sotelo, 2002)	152
Ilustración 8.11	Formas de un salto hidráulico	152
Ilustración 8.12	Esquemas de la forma del salto hidráulico con relación al número de Froude según el USBR	154
Ilustración 8.13	Localización del salto hidráulico en dos tramos de canal (adaptado de Arteaga *et al*., 2006)	156
Ilustración 8.14	Perfil de canal para ejemplo de salto hidráulico en sección rectangular	158
Ilustración 8.15	Salto hidráulico en cambio de pendiente de canal rectangular para ejemplo	160
Ilustración 8.16	Bordo libre para canales con revestimiento de superficie dura, membrana enterrada y tierra (Sotelo, 2002).	163
Ilustración 8.17	Secciones típicas de un canal	165
Ilustración 8.18	Otras secciones típicas para un canal con diversas formas estructurales y geométricas (adaptado de Mosonyi, 1963)	167
Ilustración 8.19	Esquema de un trazo de canal de conducción que cuenta con puente canal y túnel (adaptado de Mosonyi, 1963)	168
Ilustración 8.20	Esquemas de acueductos para salvar puntos bajos de topografía en el trazo de una conducción (adaptado de Mosonyi, 1963)	169
Ilustración 8.21	Esquema de sifón invertido en el cruce de un canal principal con un arroyo	169
Ilustración 8.22	Relaciones generales para salto hidráulico oblicuo	171
Ilustración 8.23	Sobreelevación de una curva simple a régimen supercítico	173
Ilustración 8.24	Perfiles de flujo en bifurcaciones en una separación a régimen subcrítico	173
Ilustración 8.25	Perfiles de flujo en bifurcaciones en una separación a régimen supercrítico	175
Ilustración 8.26	Perfiles de flujo en una unión con transición de régimen subcrítico a supercrítico	175



Tablas

Tabla 3.1	Rugosidades absolutas para algunos materiales (Sotelo, 1997)	13
Tabla 3.2	Valores de k para cálculo de pérdidas locales (Sotelo, 1997)	15
Tabla 3.3	Valores de k_c para una contracción brusca (Brater et al., 1996)	15
Tabla 3.4	Módulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (μ) y magnitud tentativa de la celeridad de onda (a) para materiales de tubería (Sanks, 1998)	18
Tabla 3.5	Iteraciones realizadas en el paso 5	26
Tabla 3.6	Cálculo de la pérdida de carga H_f y el gradiente hidráulico S_f	28
Tabla 3.7	Gastos y velocidades para diferentes diámetros de la tubería del Ejemplo 3.3	28
Tabla 4.1	Tarifa H-M, obtenida de la página electrónica de CFE (cfe.gob.mx) en el apartado tarifario	36
Tabla 4.2	Tarifas, del 1º de mayo al sábado anterior al último domingo de octubre (cfe.gob.mx)	36
Tabla 4.3	Tarifas, del último domingo de otubre al 30 de abril (cfe.gob.mx)	36
Tabla 4.4	Diámetros analizados para el ejemplo	38
Tabla 4.5	Evolución de la población y demanda anual debombeo	38
Tabla 4.6	Desglose de conceptos y precios unitarios para ejemplo de línea de 12 pulgadas en PEAD.	41
Tabla 4.7	Resumen de análisis de costo a valor presente para tubería de 12 pulgadas en PEAD	41
Tabla 4.8	Resumen de análisis de costo a valor presente para todos los diámetros analizados en PEAD	42
Tabla 4.9	Resultados obtenidos con el análisis de costo anual equivalente en el ejemplo	44
Tabla 4.10	Información de tuberías de acuerdo al mercado nacional	46
Tabla 5.1	Serie galvánica o electromotriz (adaptada de AWWA M27, 2013)	59
Tabla 5.2	Protección catódica del acero (adaptado de AWWA M 27, 2013)	61
Tabla 5.3	Ánodos galvánicos (adaptado de AWWA M 27, 2013)	62
Tabla 5.4	Factores de los ánodos de magnesio (adaptada de AWWA M 27, 2013)	63
Tabla 5.5	Tipos de ánodo	71
Tabla 5.6	Hoja técnica del producto	91
Tabla 5.7	Abrasivos y perfil de anclaje	98
Tabla 7.1	Descripición de válvulas de uso frecuente (adaptado de Tullis, 1989)	120
Tabla 8.1	Elementos geométricos de secciones prismáticas para conductos a superficie libre (adaptada de Chow, 1994)	133
Tabla 8.2	Elementos geométricos de secciones circular y herradura para conductos a superficie libre (adaptada de Chow, 1994)	134
Tabla 8.3	Resultados obtenidos del ejemplo 9.1	148
Tabla 8.4	Secciones hidráulicas óptimas (adaptada de Chow, 1994)	161
Tabla 8.5	Espesores de revestimiento, bordos libres y anchos de corona en canales revestidos (adaptada de Arteaga, 1997)	163