

Comisión Nacional del Agua

**MANUAL DE AGUA POTABLE,
ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO**

**DISEÑO, SELECCIÓN E INSTALACIÓN DE TUBERÍAS DE ACERO
PARA LÍNEAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE**

Diciembre de 2007

www.cna.gob.mx

ADVERTENCIA

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente.

Esta publicación forma parte de los productos generados por la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, cuyo cuidado editorial estuvo a cargo de la Gerencia de Cuencas Transfronterizas de la Comisión Nacional del Agua.

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

Edición 2007

ISBN: 978-968-817-880-5

Autor: Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174-4000
www.cna.gob.mx

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

Impreso en México
Distribución gratuita. Prohibida su venta.

Comisión Nacional del Agua

Ing. José Luis Luege Tamargo
Director General

Ing. Marco Antonio Velázquez Holguín
Coordinador de Asesores de la Dirección General

Ing. Raúl Alberto Navarro Garza
Subdirector General de Administración

Lic. Roberto Anaya Moreno
Subdirector General de Administración del Agua

Ing. José Ramón Ardavín Ituarte
Subdirector General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Ing. Sergio Soto Priante
Subdirector General de Infraestructura Hidroagrícola

Lic. Jesús Becerra Pedrote
Subdirector General Jurídico

Ing. José Antonio Rodríguez Tirado
Subdirector General de Programación

Dr. Felipe Ignacio Arreguín Cortés
Subdirector General Técnico

Lic. René Francisco Bolio Halloran
Coordinador General de Atención de Emergencias y Consejos de Cuenca

M.C.C. Heidi Storsberg Montes
Coordinadora General de Atención Institucional, Comunicación y Cultura del Agua

Lic. Mario Alberto Rodríguez Pérez
Coordinador General de Revisión y Liquidación Fiscal

Dr. Michel Rosengaus Moshinsky
Coordinador General del Servicio Meteorológico Nacional

C. Rafael Reyes Guerra
Titular del Órgano Interno de Control

Responsable de la publicación:
Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Coordinador a cargo del proyecto:
Ing. Eduardo Martínez Oliver
Subgerente de Normalización

La Comisión Nacional del Agua contrató la Edición 2007 de los Manuales con el

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA según convenio
CNA-IMTA-SGT-GINT-001-2007 (Proyecto HC0758.3) del 2 de julio de 2007
Participaron:

Dr. Velitchko G. Tzatchkov
M. I. Ignacio A. Caldiño Villagómez

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	1
“MANUAL DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE TUBERÍA DE ACERO PARA LINEAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE”	3
1. CONSIDERACIONES GENERALES	4
1.1. ALCANCE	4
1.2. CAMPO DE APLICACIÓN.....	4
1.3. DEFINICIONES.....	4
1.4. NORMAS Y CODIGOS APLICABLES.....	12
2. MATERIALES	14
2.1. GENERALIDADES.....	14
2.2. ACERO.....	15
2.2.1. Introducción.....	15
2.2.2. Calidad del acero.	20
2.2.3. Fabricación de tuberías de acero	35
2.3. NEOPRENO.....	44
2.3.1. Procesamiento	44
2.3.2. Propiedades	45
2.3.3. Aplicación en tuberías	45
2.4. RECUBRIMIENTOS.....	45
2.4.1. Recubrimientos para tuberías superficiales.....	45
2.4.2. Recubrimientos para tuberías enterradas	46
3. SELECCIÓN DE TUBERÍA	53
3.1. GENERALIDADES.....	53
3.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN	53
3.2.1. Económico.....	53
3.2.2. Resistencia mecánica.....	56
3.2.3. Resistencia a la corrosión	56
3.2.4. Facilidad de instalación	58
3.2.5. Vida útil.....	58
4. BASES DE DISEÑO	60
4.1. GENERALIDADES.....	60
4.1.1. Información general.....	60
4.2. CONDICIONES DE DISEÑO	61
4.2.1. Presión	62
4.2.2. Temperatura.....	62
4.2.3. Efectos dinámicos	62
4.2.4. Efectos del peso.....	63
4.3. CRITERIOS DE DISEÑO	63
4.3.1. Generalidades.....	63
4.3.2. Especificación de materiales	64
4.3.3. Condiciones normales de operación	64
4.3.4. Variaciones de las condiciones normales de operación	64
4.3.5. Corrosión.....	65
4.3.6. Esfuerzos permisibles	65
5. ACCIONES	67

5.1. GENERALIDADES	67
5.2. ACCIONES INTERNAS.....	67
5.2.1. Presión de operación.....	67
5.2.2. Golpe de ariete.....	67
5.2.3. Fuerza debida a los cambios de dirección	69
5.3. ACCIONES EXTERNAS EN TUBERÍA ENTERRADA.....	70
5.3.1. Carga muerta debida al peso del relleno.....	70
5.3.2. Carga viva por tránsito de vehículos en la superficie	71
5.3.3. Carga viva por transito de ferrocarril en la superficie	74
5.3.4. Carga viva por tránsito de maquinaria y equipo pesado.....	75
5.3.5. Sismo	78
5.4. ACCIONES EXTERNAS EN TUBERIA SUPERFICIAL.....	85
5.4.1. Carga muerta debida al peso propio del tubo, agua, y accesorios.....	85
5.4.2. Temperatura.....	85
5.4.3. Sismo	86
5.4.4. Viento	88
6. ANALISIS Y DISEÑO	105
6.1. GENERALIDADES	105
6.2. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE PARED DEL TUBO	105
6.2.1. Determinación del espesor por presión interna.....	105
6.2.2. Determinación del espesor por efectos transitorios (golpe de ariete).....	106
6.2.3. Espesor mínimo por manejo.....	106
6.2.4. Revisión del espesor por presión de colapso atmosférico.....	106
6.2.5. Esfuerzos permisibles	108
6.3. TUBERÍA ENTERRADA.....	108
6.3.1. Determinación de la deflexión vertical	108
6.3.2. Análisis de pandeo	109
6.3.3. Criterios límites de aceptación	109
6.4. TUBERÍA SUPERFICIAL	113
6.4.1. Cálculo de esfuerzos.....	113
6.4.2. Combinación de esfuerzos	115
6.4.3. Determinación de los esfuerzos permisibles	115
6.5. SOPORTERIA.....	116
6.5.1. Tipos de soporte.....	116
6.5.2. Claros entre soportes	116
6.5.3. Silletas.....	119
6.5.4. Tuberías sin anillos rigidizantes	119
6.5.5. Tuberías con anillos rigidizantes	122
6.5.6. Tubos parcialmente llenos.....	135
6.6. ATRAQUES.....	136
6.6.1. Fuerza por cambio de dirección	138
6.6.2. Fuerza en pendiente	138
6.6.3. Cambio de sección.....	139
6.7. JUNTAS DE EXPANSIÓN.....	140
6.8. REFUERZO EN CONEXIONES.....	142
7. OBRAS ESPECIALES.....	146
7.1. GENERALIDADES	146

7.2. CRUCES CON OTRAS LÍNEAS.....	146
7.3. CRUCES CON CAMINOS Y CARRETERAS.....	146
7.3.1. Cruces con camisa.....	147
7.3.2. Cruces con marcos cerrados de concreto.....	150
7.3.3. Conformación del plano de cruce.....	150
7.4. CRUCES CON FERROCARRIL.....	154
7.4.1. Conformación del plano de cruce.....	154
7.5. CRUCES CON RÍOS.....	156
7.5.1. Fuerzas de flotación.....	161
7.5.2. Espesor de lastre de concreto.....	162
7.5.3. Densidad de lastre de concreto.....	162
7.6. CRUCES CON PANTANOS.....	163
7.7. CRUCES CON BARRANCAS.....	163
7.7.1. Tubería superficial.....	163
7.7.2. Tuberías autosoportables.....	164
7.7.3. Tuberías apoyadas en estructuras existentes.....	164
7.7.4. Tuberías con estructuras de soporte.....	164
7.8. CRUCES CON CANALES DE RIEGO.....	165
8. TUBERÍAS SUBMARINAS.....	167
8.1. GENERALIDADES.....	167
8.2. PROCESO DE DISEÑO.....	167
8.3. PROCEDIMIENTOS DE TENDIDO.....	169
8.3.1. Método de la barcaza convencional de tendido.....	170
8.3.2. Barcaza de tambor.....	172
8.3.3. Método de remolque.....	174
8.4. ANÁLISIS DE TENDIDO.....	175
8.5. ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA.....	178
8.6. PROTECCIÓN CATÓDICA.....	185
9. PRINCIPIOS DE LA CORROSIÓN.....	195
9.1. TEORÍA GENERAL DE LA CORROSIÓN.....	195
9.2. CORROSIÓN EXTERNA DE TUBERÍAS.....	198
9.2.1. Corrosión galvánica.....	198
9.3. CORROSIÓN ELECTROLÍTICA.....	202
9.4. SEVERIDAD DE LA CORROSIÓN.....	205
9.4.1. Mediciones de resistividad en campo.....	205
9.5. MÉTODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN EXTERNA.....	206
9.5.1. Recubrimientos anticorrosivos.....	206
9.5.2. Ánodos de sacrificio.....	207
9.5.3. Corriente impresa.....	209
9.5.4. Corrosión interna.....	209
10. TRANSPORTE, INSTALACIÓN Y PRUEBA.....	210
10.1. GENERALIDADES.....	210
10.2. TRANSPORTE Y MANEJO.....	210
10.2.1. Camión.....	210
10.2.2. Ferrocarril.....	210
10.2.3. Barco.....	211
10.2.4. Helicóptero.....	211

10.2.5. Carga y descarga	211
10.2.6. Descarga a lo largo de derecho de vía.....	211
10.3. ZANJADO.....	212
10.3.1. Profundidad	212
10.3.2. Ancho	212
10.4. CAMA Y RELLENO DE ZANJA.....	212
10.4.1. Cama.....	212
10.4.2. Relleno	213
10.5. PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN	213
10.5.1. Preparación de la tubería	213
10.5.2. Manejo y tendido	215
10.5.3. Ensamble de la tubería.....	216
10.5.4. Soldaduras de uniones.....	216
10.5.5. Recubrimiento de juntas de campo	216
10.6. PRUEBA HIDROSTÁTICA DE CAMPO	216
10.6.1. Tapones	217
10.6.2. Venteos	217
10.6.3. Defectos permisibles	217
10.6.4. Desinfección de las tuberías	218
11. SOLDADURAS DE UNIONES. (CON MATERIAL DE APORTE)	219
11.1. GENERALIDADES.....	219
11.1.1. Parámetros técnicos requeridos en la elaboración del procedimiento de soldadura.....	222
11.2. CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS.....	235
11.2.1. Calificación de procedimiento de soldadura para la fabricación de tubería en taller y para el montaje de tubería en campo	235
11.2.2. Criterios de aceptación de las pruebas para calificación de procedimiento de soldadura de tubería en taller y campo	235
11.3. CALIFICACIÓN DE SOLDADORES.....	240
11.3.1. Calificación de soldadores para tubería de producción en taller (ASME Sección 9)	240
11.3.2. Criterios de aceptación de las pruebas para calificación de soldadores en taller y campo	242
11.4. EVALUACIÓN DE UNIONES DE PRODUCCIÓN EN TALLER Y EN CAMPO	243
11.4.1. Ensayos para la evaluación de las uniones de producción en taller	243
11.4.2. Criterios de aceptación de uniones de producción en taller	244
11.4.3. Ensayos para la evaluación de uniones de campo	245
11.4.4. Criterios de aceptación de uniones de campo.....	246
12. INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO	248
12.1. GENERALIDADES.....	248
12.2. INSPECCIÓN	248
12.2.1. Inspección visual del derecho de vía.....	249
12.2.2. Medición de espesores en puntos discretos.....	249
12.2.3. Inspección de la pintura anticorrosiva	250
12.2.4. Inspección del recubrimiento anticorrosivo.....	250
12.2.5. Inspección del Sistema de Protección Catódica.....	251

12.2.6. Inspección de dispositivos de seguridad y control.....	254
12.2.7. Inspección de cruces.....	255
12.3. MANTENIMIENTO	256
12.3.1. Derecho de vía	256
12.3.2. Dispositivos de seguridad y control	256
12.3.3. Tuberías superficiales	257
12.3.4. Cruces	257
12.3.5. Soportes	257
12.4. REPARACIONES	257
12.4.1. Límites de imperfecciones.....	257
12.4.2. Procedimiento de estimación de la resistencia remanente de tuberías corroídas	258
12.4.3. Reparaciones permisibles en tuberías	260
12.4.4. Métodos de reparación.....	260
12.5. PLAN DE CONTINGENCIAS	261
"GUIA DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE TUBERÍA DE ACERO PARA LINEAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA"	263
1. INTRODUCCIÓN	264
2. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE TUBERÍA.....	267
2.1. GENERALIDADES.....	267
2.2. CÁLCULO DE SOBREPRESION (P) POR EL FENOMENO TRANSITORIO ..	267
2.3. CÁLCULO DE ESPESORES	268
2.4. REVISIÓN DE ESPESOR MÍNIMO POR MANEJO	270
3. TUBERÍA ENTERRADA	271
3.1. GENERALIDADES.....	271
3.2. CARGA MUERTA DEBIDA AL PESO DEL RELLENO	271
3.3. REVISIÓN POR PANDEO Y DEFLEXION VERTICAL	271
3.4. REVISIÓN DE ESFUERZOS POR SISMO	273
4. TUBERÍA SUPERFICIAL.....	276
4.1. GENERALIDADES.....	276
4.2. FUERZA POR SISMO EN TUBERÍA SUPERFICIAL.....	276
4.3. FUERZA POR VIENTO EN TUBERÍA SUPERFICIAL	277
4.4. REVISIÓN DE ESFUERZOS	279
4.4.1. Determinación de esfuerzos.....	279
4.4.2. Combinación de esfuerzos (ver sección 6.4.2del manual).	281
4.4.3. Comparación con esfuerzos permisibles para tubo API-L-Gr B (ver sección 6.4.3 del manual).....	281
4.5. REVISIÓN DE ESFUERZOS EN LA ZONA DEL APOYO.....	281
4.5.1. Revisión de esfuerzos en tuberías en apoyos sin anillo rigidizante.....	281
4.5.2. Revisión de esfuerzos en la tubería en la zona de apoyo, utilizando anillo rigidizante.....	283
4.5.3. Revisión de esfuerzos en tubería parcialmente llena	286
4.6. JUNTAS DE EXPANSIÓN.....	289
4.7. RAMALES	290
5. OBRAS ESPECIALES.....	298
5.1. GENERALIDADES.....	298
5.2. CRUCE CON CARRETERA.....	298

5.2.1. Carga muerta provocada por el peso de relleno	298
5.2.2. Carga viva por tránsito de vehículos en la superficie	299
5.2.3. Carga viva por maquinaria y equipo	299
5.2.4. Determinación de la deflexión vertical y pandeo	300
5.3. CRUCE CON FERROCARRIL	301
5.3.1. Carga viva por tránsito de ferrocarriles en la superficie.....	301
5.3.2. Determinación de la deflexión vertical y pandeo	302
5.3.3. Cruce con perforación horizontal.....	303
5.3.4. Cruce con el método de hincado	304
5.4. CRUCE CON BARRANCA Y RÍO	307
5.4.1. Determinación de las fuerzas que actúan en un ataque ocasionadas por el cambio de dirección de la tubería.....	307
5.4.2. Socavación en el cauce del río (km 13+050 al 13+397).....	308
5.4.3. Lastre de concreto en el cruce con el río.....	311
5.5. SEÑALIZACIÓN	312
6. CORROSIÓN	313
7. UNIONES SOLDADAS	321
7.1. GENERALIDADES	321
7.2. SOLDADURA EN TALLER.....	321
7.2.1. Ensayos destructivos.....	322
7.2.2. Calificación de personal	323
7.2.3. Inspección	323
7.2.4. Supervisión.....	323
7.3. SOLDADURA EN CAMPO	324
7.3.1. Ensayos destructivos.....	325
7.3.2. Calificación de personal	325
7.3.3. Inspección	326
8. INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO	327
8.1. GENERALIDADES	327
8.2. INSPECCIÓN VISUAL DEL DERECHO DE VÍA.....	327
8.3. MEDICIÓN DE ESPESORES EN PUNTOS DISCRETOS DE LA TUBERÍA ...	327
8.3.1. Campo de aplicación	327
8.3.2. Definiciones	327
8.3.3. Equipo requerido	328
8.3.4. Responsabilidades	328
8.3.5. Actividades principales	328
8.3.6. Excavación	331
8.3.7. Sistema de referencia.....	331
8.3.8. Limpieza en los puntos de medición	331
8.3.9. Medición de espesores.....	331
8.3.10. Reparación en la zona de medición	331
8.3.11. Revisión de mediciones.....	331
8.3.12. Mapeo de zonas corroídas	332
8.4. INSPECCIÓN DE PINTURA Y RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO	332
8.4.1. Campo de aplicación	332
8.4.2. Definiciones	332
8.4.3. Equipo requerido	332

8.4.4. Responsabilidades	333
8.4.5. Actividades principales	333
8.5. INSPECCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA	334
8.5.1. Medición de potenciales tubo - suelo	334
8.5.2. Inspección de rectificadores	336
8.5.3. Medición de corriente de salida de ánodos inertes	338
8.5.4. Inspección de cruces.....	340
9. TUBERÍA SUBMARINA.....	354
9.1. GENERALIDADES	354
9.2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UNA TUBERÍA SUBMARINA	354
9.3. SELECCIÓN DE LA RUTA.....	354
9.4. APROXIMACIÓN A LA COSTA	355
9.5. CÁLCULO DE FUERZAS HIDRODINÁMICAS	355
9.6. DISEÑO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA.....	362
9.7. REVISIÓN DE ESFUERZOS EN LA ZONA DE CURVATURA SUPERIOR DURANTE EL TENDIDO.....	367
10. DIAGRAMAS DE FLUJO.....	369
10.1. ANÁLISIS Y DISEÑO	369
10.2. SOBREPRESIÓN POR EL FENÓMENO TRANSITORIO (GOLPE DE ARIETE)	370
10.3. CARGA MUERTA DEBIDA AL PESO DEL RELLENO	371
10.4. FUERZA SÍSMICA EN TUBERÍA SUPERFICIAL	372
10.5. FUERZA POR VIENTO EN TUBERÍA SUPERFICIAL	373
10.6. CARGA VIVA POR TRANSITO DE VEHÍCULOS	374
10.7. CARGA VIVA POR TRANSITO DE MAQUINARIA Y EQUIPO PESADO	375
10.8. CARGA VIVA POR TRANSITO DE FERROCARRIL	376
10.9. SOCAVACIÓN EN UN RÍO	377
10.10. LASTRE DE CONCRETO EN CRUCE CON RÍO	378
10.11. DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA	379
10.12. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE TUBERÍA SUBMARINA.....	380
10.13. ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA	382
10.14. PROTECCIÓN CATÓDICA DE TUBERÍA SUBMARINA	386
ANEXO A "ASPECTOS PRÁCTICOS DE LA CORROSIÓN"	388
ANEXO B "PLANOS"	414

INTRODUCCIÓN

El presente Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, será el instrumento de referencia y consulta de los proyectistas, dependencias, empresas y organismos operadores relacionados al sector agua potable para la elaboración de los proyectos para las obras nuevas, reparaciones, mantenimiento o ampliaciones de líneas de conducción de acero.

En esta parte del Manual se cubren las líneas de conducción de acero destinadas a la conducción de aguas potables y residuales, que comprende desde la obra de toma hasta los tanques de regulación para su distribución.

En apoyo al Programa Nacional Hidráulico, donde se plantea a necesidad de incrementar y mejorar los servicios de agua a nivel nacional, se vio la necesidad de elaborar el presente Manual, con el propósito de proporcionar a los técnicos relacionados con la materia, los lineamientos para la elaboración de los proyectos estructurales de las líneas de conducción utilizados en los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento.

En el presente Manual se han recopilado el material y las normas actualizadas, tanto nacionales como extranjeras, que rigen a este tipo de estructuras y que se consideran útiles para el diseño estructural de las líneas, procurando reunirlos en una sola publicación, dando las recomendaciones que se consideran pertinentes para lograr un buen diseño y construcción. Se anexan Tablas y Figuras para proporcionar un auxiliar de diseño al proyectista, así mismo se incluye bibliografía 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.

El contenido de este Manual esta íntimamente relacionado con las diferentes áreas que rigen a las líneas de conducción, por lo que para el diseño funcional, mecánico, hidráulico y geotécnico deberán consultarse las diferentes secciones.

El presente Manual esta dividido en dos partes. La primera contiene la parte teórica y los procedimientos recomendados; la segunda es una guía con el propósito de ilustrar la aplicación del Manual.

En la primera parte se establecen algunas consideraciones generales como son el alcance, campo de aplicación, definiciones, normas y códigos aplicables, materiales y bases de diseño. Se indican también las acciones internas y externas tanto en la tubería aérea como superficial. En lo referente al análisis y diseño se incluyen secciones para la determinación del espesor de pared del tubo; deflexión vertical y pandeo para líneas enterradas; cálculo, combinación y esfuerzos permisibles para tubería superficial; tipos de soportes, atraques, juntas de expansión y refuerzos en conexiones. Se dedica un capítulo a las obras especiales que se encuentran en los proyectos de líneas de conducción de agua. Dichas obras especiales consisten en cruces con otras líneas, carreteras, ferrocarriles, ríos, pantanos y barrancas.

Aunque comúnmente no se presentan líneas de conducción de agua en el mar, en algunos casos específicos podría requerirse de un diseño de este tipo, por lo que se incluye un capítulo sobre el diseño de líneas submarinas. También se dedica un capítulo a la corrosión que se presenta en las tuberías de acero. Los últimos capítulos tratan sobre el transporte instalación, prueba, soldadura de uniones, inspección y mantenimiento.

En la segunda parte se desarrolla un ejemplo de una línea terrestre, cubriéndose los aspectos principales que intervienen en el análisis y diseño. También se presenta un ejemplo del diseño de una línea submarina. Al final de la guía se incluyen diagramas de flujo que pueden utilizarse en las diferentes etapas del proyecto.

PARTE UNO

“MANUAL DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE TUBERÍA DE ACERO PARA LINEAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE”

1. CONSIDERACIONES GENERALES

1.1. ALCANCE

El presente manual tiene como propósito establecer los requisitos mínimos de seguridad que deben cubrirse para el diseño y selección de material, así como los lineamientos generales para la construcción, prueba, inspección y mantenimiento de tuberías de acero destinadas a la conducción de agua; que comprende desde la obra de torna, hasta los tanques de regulación para su distribución. Además de lo indicado en este manual, deben cumplirse los requisitos establecidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, y por Ferrocarriles Nacionales de México, cuando la línea de conducción interfiera con las vías de comunicación. Cuando por condiciones especiales deban cumplirse requisitos de seguridad más estrictos, es conveniente que éstos se especifiquen en las bases de diseño indicadas en el capítulo 4 "Bases de diseño" del manual.

Asimismo, se establece que el cumplimiento de todos los lineamientos estipulados en el manual, no exime al contratista de su responsabilidad para proporcionar un producto capaz de cumplir con el servicio deseado.

Cabe señalar que en este manual no se incluyen los aspectos hidráulicos del diseño, como son los cálculos de las pérdidas de energía por fricción, resistencia al flujo, diámetro económico de la tubería, etc.

1.2. CAMPO DE APLICACIÓN

Los lineamientos especificados en este manual son aplicables a los proyectos y construcción de tuberías de acero para la conducción de agua de 6" de diámetro y mayores.

1.3. DEFINICIONES

ABRACION: Proceso de raspar, esmerilar o desgastar por fricción.

ACERO: Aleación maleable de hierro y carbono que contiene generalmente ciertas cantidades de manganeso.

ACERO AL CARBÓN: Aleaciones de hierro y carbono con un contenido de este último elemento de 0.08% a 2% en peso.

ACERO CALMADO: Acero desoxidado por un fuerte agente desoxidante como Si o Al.

AFINIDAD: Facilidad de reacción entre dos o más elementos.

ALARGAMIENTO MÍNIMO ESPECIFICADO: Es el alargamiento mínimo, expresado, en por ciento, de una longitud calibrada en el espécimen para la prueba de tensión prescrita por la especificación, bajo la cual se adquiere el material de la fábrica.

ALEACIÓN: Es la combinación de otros elementos con un metal, con el fin de realzar sus propiedades.

ALTO HORNO: Horno, de tiro en el que se quema combustible sólido con una inyección de aire, para fundir mineral en una operación continúa.

AMPERAJE: Rango de la corriente eléctrica, cuya unidad es el ampere.

ARCO: Es el proceso mediante el cual se crea un efecto que se produce cuando el electrodo o material de aporte hace contacto con la pieza. Al cerrar el circuito y separar los conductores se origina el arco eléctrico.

AREA HIDRAULICA: Superficie de la sección transversal que ocupa el líquido dentro del ducto, canal, ríe, etc.

ARRABIO: Hierro de primera fusión.

ATESTIGUAR: Observación o verificación de una prueba o acción mediante la presencia física.

BASES DE DISEÑO: Es la información que se debe proporcionar para que pueda desarrollarse un proyecto.

BISEL: Preparación de las superficies del material a soldar.

CALIZA: Mineral de calcio, que se utiliza principalmente como desoxidante.

CEMENTADO: Aleación ferrosa. Porción exterior que se ha endurecido más que la parte interior o corazón por cementación.

COLADA: Vaciar metal fundido dentro de un molde para producir un objeto de una forma deseada.

CONCAVIDAD INTERNA: Es la distancia perpendicular entre una extensión de la superficie de la pared del tubo y el punto más bajo del área del cordón de soldadura.

COQUE: Carbón altamente resistente a la compresión a temperatura elevada, que se utiliza en hornos metalúrgicos, no solo como combustible sino también para soportar el peso de la carga.

CORRIENTES PARASITAS: Corrientes que fluyen a través de otros medios diferentes del circuito.

CORROSION: Es un ataque destructivo de los metales que puede ser de naturaleza química o electroquímica.

CORROSION ATIVOSFERICA: Es la que se genera por causas del medio ambiente, y generalmente se presenta en instalaciones aéreas.

CORROSION LOCALIZADA: En este tipo de corrosión ni la superficie ni el medio son homogéneos, los productos insolubles generados se precipitan, formando películas en la superficie del metal, las cuales no son uniformemente perfectas.

CRISOL: Vasija hecha de material refractario o de un metal con alto punto de fusión, que se utiliza para fundir metales u otras sustancias.

DEFECTO: Una condición que menoscaba la calidad de un producto total o una parte.

DEFORMACIÓN: Medida del cambio de la forma del cuerpo, referido a su tamaño original.

DEPOSITO SOL.: (Depósito de electrodo)- El peso en gramos de un electrodo que se deposita por unidad de longitud del mismo.

DERECHO DE VÍA: Franja de terreno de ancho mínimo, requerida para la construcción, reconstrucción, ampliación, protección y, en general, para el uso adecuado de una línea de conducción o alguna vía de comunicación.

DESGASIFICANTE: Sustancia que se puede agregar al metal fundido para eliminar gases solubles, los cuales de otra manera quedarían absorbidos o entrampados en el molde durante la solidificación.

DESOXIDANTE: Sustancia que puede ser agregada al metal fundido, con el fin de eliminar el oxígeno libre combinado.

DISCONTINUIDAD: Defecto de un material, causado por fracturas o deformaciones..

DUREZA: Resistencia de un metal a la deformación plástica, regularmente por indentación.

EFEECTO DINÁMICO. Desplazamientos y esfuerzos inducidos por cargas que varían con el tiempo; por ejemplo, vibración de bombas y equipos rotatorios, sismos, etc.

ELÁSTICO: Un material puramente elástico es aquel que cumple con la ley de Hooke, donde el esfuerzo cortante es proporcional a la deformación unitaria de corte.

ELECTRODO: Se conoce como material de aporte, el cual se utiliza para la unión de dos materiales, mediante el proceso de fundición del mismo.

ELONGACIÓN: Es una indicación de la ductilidad del material.

ESCORIA: Producto no metálico que resulta de la disolución mutua de fundente e impurezas no metálicas, aunadas a la fusión o refinación del acero.

ESFUERZO: Fuerza dividida entre el área de la sección transversal del material.

ESFUERZO A LA TENSIÓN: Es la carga axial dividida entre el área de la sección transversal original del espécimen de prueba.

ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL: Es el esfuerzo producido por la presión de un fluido en la pared de un tubo, que actúa circunferencialmente en un plano perpendicular al eje longitudinal del tubo.

ESFUERZO RESIDUAL: Esfuerzo presente en un cuerpo que está libre de fuerzas externas o gradientes térmicos.

ESPECIFICACIÓN DE UN MATERIAL: Parámetro que indica el servicio para el cual está destinado un material, generalmente señalado por una norma de fabricación, por ejemplo: tubería API 51-X42 es la especificación para tubería de alta resistencia grado X42.

EUTECTICO: Es una reacción isotérmica reversible, en la cual una solución líquida es convertida en dos o más sólidos íntimamente mezclados en el enfriamiento; siendo el número de sólidos formados igual al de componentes del sistema.

EXPRESIÓN: Conformación de un metal por compresión, al hacerlo fluir a través de un dado o molde.

FALLA: Fluencia o fractura que sufre un elemento al ser expuesto a esfuerzos.

FATICA: Es el deterioro gradual de un material que está sujeto a cargas repetidas.

FORJA: Método de trabajo en caliente para la formación de piezas.

FRACILIDAD: Calidad de un material, que conduce a una propagación de rotura sin una apreciable deformación plástica.

FUNDENTE: Es un material que se usa para quitar substancias indeseables como arena, cenizas y polvo, en la forma de una mezcla fundida.

FUSIÓN: Es la unión de elementos. Químicos en estado líquido, para modificar sus propiedades.

GRADIENTE TÉRMICO: Diferencia de temperatura entre dos puntos.

HIERRO: Elemento 26 de la tabla periódica; los materiales a base de éste, no se comprenden en la clasificación de aceros.

HIERRO COLADO: Hierro que contiene carbón en exceso de la cantidad soluble, en austenita a la temperatura eutéctica.

HORNO DE CORAZÓN ABIERTO (HOGAR): Horno de fundición de reverbero con un hogar superficial y techo bajo. Se utiliza para la fabricación de aceros estructurales.

IMPUREZA: Sustancia no deseable en un compuesto.

INERTE: Sustancia sin actividad química

LAMINA: Producto de metal rolado plano, de cierto espesor máximo y ancho mínimo, dependientes arbitrariamente del tipo de metal.

LAMINACIÓN: Metal defectuoso con separaciones o partes debilitadas, que en general están alineadas paralelamente a la superficie de trabajo del metal.

LINGOTE: Vaciado adecuado para trabajarse o refundirse.

MALEABLE: Característica de los metales que permite deformaciones plásticas en compresión o tensión sin ruptura.

MANDATORIO: Reglas y formas que describen el cumplimiento de un proceso definido.

MANDRIL: Barra que se emplea para retener la cantidad en productos de metal huecos mientras se trabaja; barra alrededor de la cual otro metal puede ser fundido, doblado o laminado.

MANIPULAR: Acción de controlar o dirigir.

MAQUINADO: Proceso o método de fabricación del material, para darle cierta forma.

METAL BASE: Es el metal presente en mayor proporción en una aleación o metal que va a ser soldado.

MOLDE: Forma hecha en metal, arena u otros materiales, la cual contiene una cavidad dentro del cual el metal fundido es vaciado para producir un colado de formas definidas.

NÓDULO: Aglomeración esférica de carbono en la estructura del hierro.

OBRAS DE CONDUCCIÓN: Se requieren para conducir o llevar el agua captada desde su fuente hasta el lugar de su almacenamiento, tratamiento o distribución.

Pueden ser por gravedad, para lo cual se emplean tuberías y canales; o por bombeo, a través de tuberías.

OVALAMIENTO: Pérdida de concentricidad de un tubo.

OXIDACIÓN: Reacción mediante la cual se produce un incremento de valencia, como resultado de una pérdida de electrones.

PENETRACIÓN: Desplazamiento interno que se emplea en máquinas de forjado horizontal, para la producción de piezas.

PLANCHÓN: Pieza de metal, intermedio entre el lingote y la placa, cuyo ancho, es dos veces mayor que el espesor.

PLÁSTICO: Propiedad que tienen los metales para ser moldeados y modelados permanentemente.

POLARIDAD: Sentido de conducción de la corriente eléctrica.

POSICIÓN DISÍMIL: Posición diferente.

PRESIÓN DE DISEÑO: Es la presión máxima permitida y determinada por los procedimientos aplicables al diseño y a los materiales.

PRESIÓN DE PRUEBA MÁXIMA PERMITIDA: Es la presión interna máxima de un fluido permitida por este manual para efectuar la prueba hidrostática del ducto.

PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN: Es la presión máxima que se tiene cuando el flujo en el ducto es del 100% durante el ciclo anual de operación normal. No debe exceder la presión de diseño.

PROTECCIÓN DE SOBREPRESIÓN: Es la que proporciona un equipo o aparato instalado, con el propósito de impedir que una presión superior a un valor determinado se presente en una línea de conducción.

PRUEBAS DESTRUCTIVAS: Son aquellas en las que las propiedades físicas de un material son alteradas y sufren cambio en la estructura. Generalmente se emplean para medir propiedades físicas del material, como la resistencia, o para observar su comportamiento en condiciones extremas, como la prueba de doblez.

PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS: Son aquellas en las que las propiedades físicas de un material no se alteran ni sufren cambio en su estructura. Estas pruebas se aplican para medir propiedades del material, y, con mayor frecuencia, para detectar la presencia de defectos internos o externos.

PUENTE ELÉCTRICO: Es una conexión metálica diseñada para el control del intercambio de la corriente eléctrica entre estructuras metálicas.

PUNTO EUTECTICO: Temperatura de transformación de estructuras cristalinas (996.15 °K o 723 °C)

REFINACIÓN: Purificar metales crudos o impuros.

RELEVADO DE ESFUERZO: Es un tratamiento térmico de revenido o de normalización, que se aplica para aliviar a los materiales de tensiones residuales originadas por esfuerzos internos, inducidos durante los procesos a que son sometidos en la fabricación, construcción y reparación.

RESINAS EPÓXICAS: Resina compuesta que se utiliza en recubrimientos de tipo esmaltado y se aplica después del primario.

RESISTENCIA A LA FLUENCIA: Es el esfuerzo específicamente delimitado al desviarse la proporcionalidad lineal de los esfuerzos y las deformaciones. Cuando el material no presenta un comportamiento lineal, la fluencia se define como el esfuerzo medido cuando el material alcanza una deformación predeterminada.

RESISTENCIA MÍNIMA ESPECIFICADA A LA FLUENCIA: Es la resistencia mínima a la fluencia, establecida por la norma aplicable.

RESISTENCIA MINIMA ESPECIFICADA A LA TENSIÓN: Es la resistencia mínima a la tensión, acorde con las normas bajo las cuales se ha fabricado el material.

REVENIDO: Es un tratamiento mediante el cual se calienta el material entre 513.15 °K y 998.15 °K (240 °C y 725 °C), para después enfriarse lentamente.

ROLADO: Reducción del área seccional de un metal; darle cualquier otra forma a productos metálicos por medio del uso de rodillos giratorios.

SEGREGACIÓN: Distribución no uniforme de elementos de aleación, impurezas o microfases.

SOCAVACIÓN: Surco que se produce en el metal base adyacente al borde de la soldadura, y que queda sin rellenar por el metal de aporte.

SOLAPA: Placa de refuerzo.

SOLDABILIDAD: Adaptabilidad de un metal para unirse bajo condiciones específicas.

SOLDADURA: Es la unión de metales que se produce por calor a temperatura apropiada, seguida de solidificación, con o sin aplicación de presión y de metal de aporte.

SOLDADURA A TOPE: Es la soldadura que se deposita en la ranura entre dos elementos situados en el mismo plano (o tope), cuyos bordes están en contacto. Pueden ser rectangulares, en "V" (simple o doble) o en "V" (simple o doble)

SOLDADURA AUTOMATICA: Soldadura con equipo que realiza toda la operación de soldado sin una observación y ajuste constante de los controles por parte de un operador.

SOLDADURA DE ALUMINIOTERMIA: Consiste en una mezcla pulverizada de

Óxido de cobre, aluminio y pólvora, que se activa mediante una chispa y se utiliza en campo para soldar conductores eléctricos a estructuras metálicas.

SOLDADURA DE FILETE: Soldadura de sección triangular, depositada entre dos superficies en Angulo recto, en una junta a traslape o en te.

SOLDEO: Acción de soldar.

SOPORTE: Elemento que soporta cargas estáticas, dinámicas de la tubería y equipos al cual están asociados.

SUPLEMENTARIO: Reglas y normas opcionales para el cumplimiento de un proceso definido.

TOCHO=BILLET: Producto sólido, redondo o cuadrado, que puede ser trabajado en caliente por forja, laminado o extrusión.

TRABAJO EN FRÍO: Deformación permanente que se genera por una fuerza externa en un metal, abajo de su temperatura de recristalización.

TUBO CON SOLDADURA EN ESPIRAL: Se produce rolando la placa, de manera que los extremos por soldar formen una hélice alrededor del tubo. Se fabrica soldado por fusión eléctrica, junta a tope, de traslado y plegada. Especificaciones típicas:

NMX-13-1 82 (ASTM A-1 34)
NMX-13-1 83 (ASTM A-139)
NMX-13-507 (AP 5L B-507)

NMX-13-1 77 (ASTM-A53)
NMX-13-54 (ASTM A-211)

TUBO EXPANDIDO EN FRIO: Es un tubo de fábrica, con o sin costura, formado y expandido en frío, de manera que la circunferencia se incremente, permanentemente, mínimo un 0.5%.

TUBO SIN COSTURA: Tubo cuya fabricación es a partir de un lingote caliente y se produce por alargamiento basado en el golpeteo de un mandril que va formando el tubo, si es necesaria se le da un terminado en frío. Especificaciones típicas:

NMX-13-177
NMX-13-178
NMX-13-507

TUBO SOLDADO CON DOBLE ARCO SUMERCIDO: Tubo que tiene una junta a tope longitudinal, soldada a dos pasos, uno de los cuales es por el interior del tubo. La coalescencia se produce por el calentamiento de un arco o arcos eléctricos entre el metal del electrodo desnudo y la pieza que se trabaja. La soldadura se protege con una cubierta de material granular, no se aplica presión y el metal de aporte se obtiene de los electrodos, tanto por el lado exterior como por el interior. Especificaciones típicas:

ASTM A381
NMX-13-507

TUBO SOLDADO POR RESISTENCIA ELÉCTRICA: Tubo elaborado con placa en tramos individuales, o en producción continua, usando placa en rollo para cortar tramos de tubo subsecuente. Se sueldan longitudinalmente en una junta a tope, en donde se produce la coalescencia por el calor obtenido de la resistencia del tubo al flujo de la corriente eléctrica en un circuito, en el cual el tubo es parte y además por prensado de la junta. Las especificaciones típicas de estos tubos son las siguientes:

NMX-13-177
NMX-13-184
NMX-13-507

VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE: Tienen por objeto admitir o eliminar el aire que se va almacenando en las partes altas de las curvas verticales de las líneas de conducción de agua potable. Este aire puede reducir parcialmente la eficiencia de la línea. El aire en el interior se origina porque las bombas lo inyectan o porque se va liberando el que va disuelto en el agua.

VALVULAS DE SECCIONAMIENTO: Dispositivo que se utiliza para aislar tramos de tubería para reparación, mantenimiento o emergencia del ducto, y que se encuentra ubicada según proyecto.

1.4. NORMAS Y CODIGOS APLICABLES

Con relación a los requisitos para los materiales, fabricación, pruebas, inspección, reparación, identificación y transporte, el manual hace referencia a las secciones aplicables de las últimas ediciones de los siguientes códigos y normas:

- a) NW-B-507-1994. -Tubería de línea.
- b) API 1104. -Soldaduras de tuberías e instalaciones relacionadas.
- c) API 1111.- Práctica recomendada para el diseño, construcción operación y mantenimiento de tuberías de hidrocarburos costafuera.
- d) ASME B31.1.- Tubería para manejo de vapor en sistemas de generación de energía.
- e) ASME Sección IX.- Recipientes y calderas a presión. Calificación procedimientos de soldadura.

- f) NMX-B-252-1995. - Requisitos Generales para Planchas, Perfiles, Tabla, estacas y Barras de Acero Laminado para Uso Estructural.
- g) NMX-B-254-1993 Acero Estructural.
- h) NMX-B-177-1989.- Tubos de Acero con o sin Costua, Negros o Galvanizados por Inmersión en Caliente.
- i) NMX-B-281-1994. - Planchas y Perfiles de Acero al Carbono para uso Estructural, con Baja e Intermedia Resistencia a la Tensión.
- j) NMX-B-347-1989. - Lámina de Acero al Carbono Laminada en Caliente, para Uso Estructural.
- k) NMX-B-284-1994. -Acero Estructural de Alta Resistencia, Baja Aleación al Niobio-Vanadio.
- l) NMX-1-1-172. - Procedimientos para Soldar Acero Estructural.
- m) AWWA C203. - Estándar para recubrimientos protectores. Interiores y exteriores de alquitrán de hulla, para tuberías de acero para transporte de agua, esmalte y cinta, aplicado en caliente.
- n) AWWA M1 L. - Tubería de acero-guía para el diseño e instalación.
- o) DNV Reglas para, el diseño, construcción e inspección de tubería submarina y ductos ascendentes.

donde:

A.P.I.	American Petroleum Institute.
A.S.M.	American Society of Mechanical Engineers.
A.S.T.M	American Society for Testing and Materials.
A.W.S.	American Welding Society.
A.W.W.A.	American Water Works Association.
D.N.V.	Det Norske Veritas.

2. MATERIALES

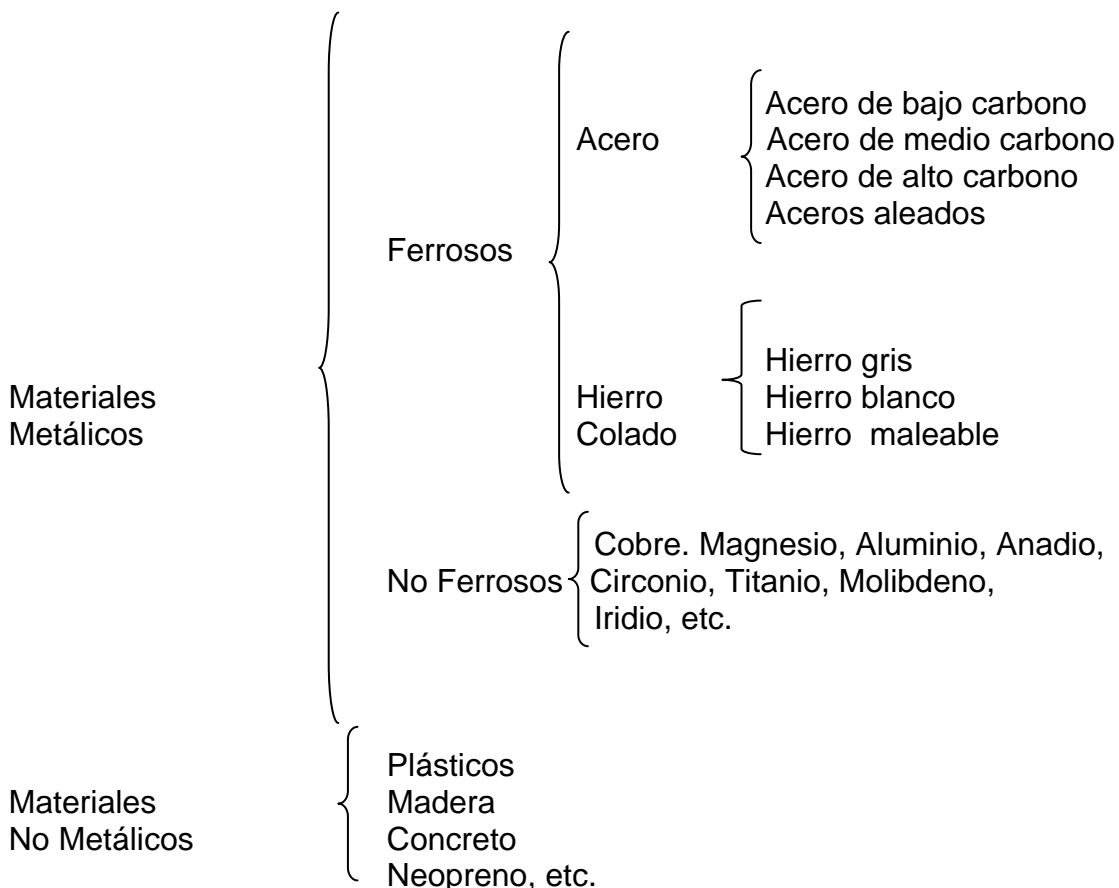
2.1. GENERALIDADES

El continuo avance de la tecnología industrial, ha creado la necesidad de mejorar las propiedades físicas de los materiales, mediante el aprovechamiento de diversos factores, tales como la composición química, procesos de fabricación, condiciones de operación, etc. Esto con la finalidad de que los productos finales tengan un desempeño satisfactorio.

Por esta razón, es necesario conocer cuáles son los factores más importantes que deben considerarse en la selección de materiales para el diseño de un equipo y/o proceso específico.

En el caso particular de la fabricación de tuberías, se deberán considerar las condiciones de operación a que están sometida, tales como presión, tipo de fluido, medio ambiente, etc., a fin de realizar la evaluación de los materiales disponibles que reúnan las características físicas y químicas requeridas para esta aplicación, obteniéndose buena calidad a bajos costos de fabricación.

La amplia gama de materiales usados industrialmente, se resumen en la tabla de clasificación, que a continuación se presenta:



En la instalación de tuberías; además del acero, se ven involucrados materiales como el neopreno y diferentes clases de recubrimientos que se emplean para brindar protección a la tubería. Adicionalmente, se consideran las soldaduras que se emplean en la unión de las secciones de tubería y de accesorios.

Estos materiales serán estudiados en detalle en los incisos correspondientes de este capítulo. Con referencia a las soldaduras se deberá consultar el capítulo 11 de este manual, el cual se dedica exclusivamente al desarrollo de este tema.

2.2. ACERO

2.2.1. Introducción

Los materiales que más se utilizan son los metálicos, debido principalmente a su gran variedad de propiedades, entre las que destacan la composición química, resistencia a la tracción, dureza, ductilidad, etc.

Los materiales de mayor interés para la fabricación de tubería, son los ferrosos, particularmente los aceros, mismos que pueden ser de bajo, medio y alto carbono, sin la necesidad de que presenten elementos de aleación, no obstante también pueden ser materiales aleados que presentan propiedades mecánicas superiores con el consiguiente incremento en el costo.

Por esta razón, es de suma importancia conocer las propiedades mecánicas de los aceros que se pueden obtener mediante la variación de su composición química, y con ello, precisar que tipo de material es el que se debe seleccionar para un uso determinado.

Composición química

El aspecto más importante en cualquier tipo de acero para fabricación de tubería es su composición química, puesto que sus propiedades mecánicas están estrechamente relacionadas con esta característica. Para ser satisfactorio, un inspector de obra debe estar familiarizado con la relación entre composición y propiedades mecánicas, ya que estas últimas varían en función del tipo de elementos químicos que conforman el acero y de la cantidad que este presente (%).

Para elegir el acero apropiado para fabricación de tubería, es necesario conocer las características requeridas en el tubo, tales como: resistencia mecánica, porcentaje de elongación, resistencia a la corrosión, etc., mismas que están dadas por los elementos aleantes que se describen en la Tabla 2.1.

La resistencia a la corrosión es uno de los efectos más importantes de la composición química, principalmente para la selección de materiales en la fabricación de tubería.

Tabla 2.1

Elemento	Propiedades que proporciona al acero
Carbono (C)	Aumenta la resistencia a la tracción, abrasión y dureza. Nota: generalmente no se considera aleante.
Manganeso (Mn)	Sirve como desoxidante, al combinarse con el azufre Aumenta a la facilidad de maquinado, la resistencia a la tracción y abrasión, dureza y facilidad de cementado. Disminuye la tendencia de inestabilidad durante la solidificación.
Fósforo (P)	Aumenta dureza y facilidad de maquinado, sin embargo, produce fragilidad.
Azufre (S)	Aumenta la facilidad de maquinado y fragilidad. Disminuye la facilidad de soldar y la tenacidad
Silicio (Si)	Es desoxidante y desgasificante, aumenta la resistencia a la tracción, dureza y permeabilidad magnética
Cromo (Cr)	Aumenta resistencia a la tracción, dureza, tenacidad y resistencia a la abrasión y desgaste. Produce resistencia a la corrosión y oxidación.
Níquel (Ni)	Aumenta resistencia la tracción y dureza sin sacrificar tenacidad.
Molibdeno (Mo)	Aumenta resistencia a la tracción, dureza y tenacidad.
Tungsteno (W)	Aumenta dureza y tenacidad. Produce resistencia a temperaturas elevadas.

Propiedades mecánicas

Los materiales metálicos, y sobre todo los aceros, se emplean en su mayoría como elementos para soportar cargas en maquinaria, estructuras y equipos sometidos a presión, aunque puedan tener otros muchos usos; para las tuberías, la principal condición que deben satisfacer es que resistan la presión del fluido sin presentar deformaciones o fallas por efecto de ésta, ya que toda fuerza que se aplique a un miembro resistente es exactamente contrarrestada por dicho miembro al deformarse, y así crear fuerzas internas que pueden producir fallas en el miembro si los valores de estas son excesivos.

El acero es por todos conocido como un material elástico, con gran resistencia a la tensión, misma que fluctúa de 294 a 588 MPa (3,000 a 6,000 kg/cm²) y en su límite de fluencia entre 196 a 294 MPa (2,000 a 3,000 kg/cm²), este límite generalmente marca una frontera superior e inferior en la concepción de diseño, mientras que otros materiales que se utilizan en la fabricación de tubos con funciones similares tienen resistencia a la tensión directa mucho más baja. Esta resistencia del acero tiene también la ventaja de ser permanente con el tiempo.

El acero es un material dúctil, lo cual nos indica que es susceptible de deformarse en gran cantidad antes de fracturarse. Los diseñadores de líneas de conducción toman como factor principal al elegir los materiales, aquellas propiedades mecánicas en las que se tenga alta resistencia.

Las propiedades mecánicas de mayor importancia para nuestro estudio se muestran en la Tabla 2.2.

Es responsabilidad del fabricante de tubería, verificar mediante las pruebas mecánicas, que el material cumpla con los requerimientos normativos, dichos ensayos deberán ser atestiguados por un inspector autorizado por el comprador.

2.2.1.1. Clasificación de materiales.

Los materiales metálicos, salvo unas cuantas excepciones, nunca se emplean en forma pura, sino aleados con otros elementos a fin de mejorar sus propiedades y aptitudes, por lo que diferentes instituciones normativas han clasificado a los materiales de acuerdo a sus propiedades químicas y físicas, entre las que tenemos a:

API - Instituto Americano del Petróleo.

ASTM - Sociedad Americana de Prueba de Materiales.

A pesar de existir otras instituciones relacionadas con el mismo tipo de actividades, para fines de este estudio sólo nos son de interés las mencionadas anteriormente, ya que en sus especificaciones se encuentran localizados los materiales que deben ser empleados para la fabricación de tubería de acero para conducción de agua.

Considerando los materiales que son de interés para este trabajo, las especificaciones ASTM clasifican a éstos de acuerdo a la presentación que se obtenga como producto final, tal como se muestra en la Tabla 2.3.

Es importante hacer notar que en la clasificación anterior, ASTM considera el espesor de pared hasta 31.75 mm. y en el caso de un requerimiento mayor, será necesario recurrir a las especificaciones particulares.

Tomando en cuenta a los materiales que son de interés para este estudio, la especificación API los clasifica de acuerdo a sus propiedades físicas y químicas; independientemente del proceso de manufactura de la tubería, esta clasificación puede observarse en la Tabla 2.4.

Tabla 2.2

Propiedad	Características
Resistencia a la tensión	Es la carga máxima sostenida por la probeta, dividida por el área de la sección transversal original de la probeta (esfuerzo = fuerza/área). Es decir, es la capacidad de un material de soportar carga sin fallar, ésta se evalúa mediante la prueba de tensión (gráfica esfuerzo-deformación).
Ductilidad	Es la propiedad que permite a un material ser
Tenacidad	La cual puede ser medida mediante la realización de la prueba charpy o de impacto.
Dureza	Es la resistencia de un material a la penetración, sobre la superficie de éste con una esfera pequeña, cono o pirámide de otro material con mayor dureza.
Punto de cedencia	Es el esfuerzo aplicado a un material que provoca una deformación plástica permanente, sin presentar falla, ésta se evalúa a través de la prueba de tensión (gráfica esfuerzo-deformación)

En la Figura 2.1 se muestra la curva esfuerzo-deformación y sus puntos de mayor importancia, como referencia para la evaluación del comportamiento del material y sus resultados numéricos.

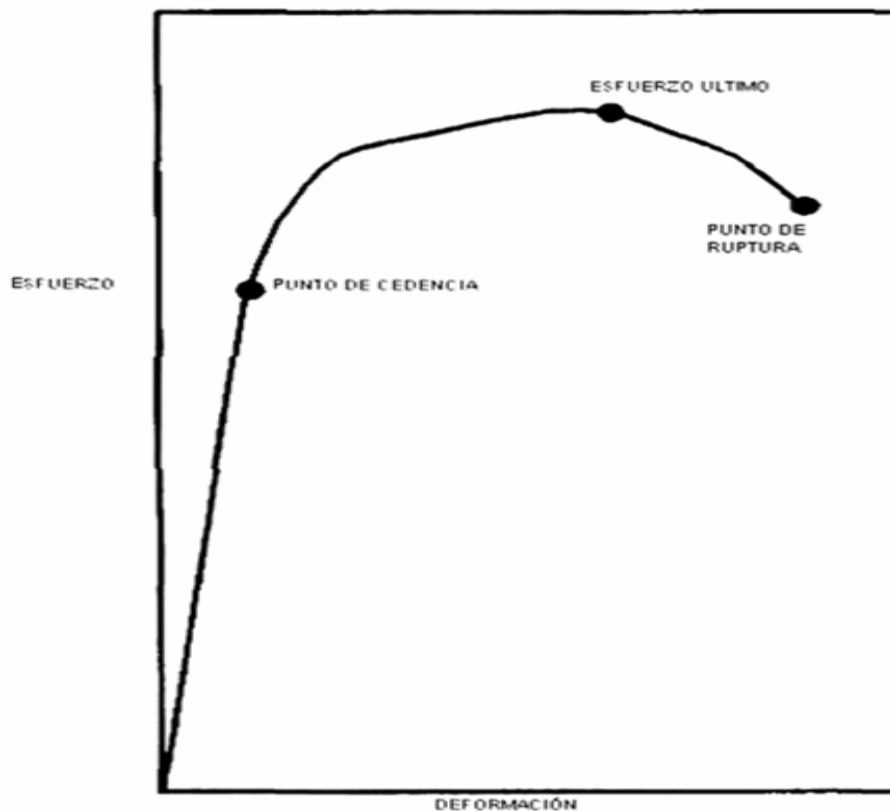


Figura 2.1 Grafica Típica de Esfuerzo-Deformación en un Acero al Carbón

Tabla 2.3

Especificación	Grado	1 Comp. química	Rt (mín) MPa	fy (mín) MPa	Producto
A-36		C(máx): 0. 2 5 Mn:0.80-1.20 P(máx): 0.04 S(máx): 0.05	400	248	Placa
A-53	A B	C: 0. 2 5 -0.3 0 W:0.95 - 1.20 P(máx): 0.05 S(máx): 0.06	331 414	207 241	Tubo
A-283	A B C D	C(máx):O. 14, 0.17, 0.243 0.77 Mn (máx):0.90 P (máx) 0.04 S (máx) 0.05	310 345 379 414	165 186 207 228	Placa
A-570	30 33 36 40 45 50	C (máx)= 0. 2 5 Mn= 0.90-1.35 P (máx)= 0.04 S (máx)= 0.05	338 359 365 379 414 448	207 228 248 276 310 345	Placa
A-572	42 50 60	C (máx)= 0.21 Mn (máx)=1.35 P (máx)= 0.04 S (máx)= 0.05 Si=0.40 C (máx)= 0.23 Idem C (máx)= 0.26 Idem	414 448 517	290 345 414	Placa

Tabla 2.4

Especificación	Grado	Comp. química	Rt (min) MPa	fy (min) MPa	Producto
API	B	C(máx)=0.26 Mn (máx)=1.15 P (máx)=0.03 S (máx)=0.03	413	241	Tubo con costura
API	X-42	C (máx)=0.28 Mn (máx)=1.25 P (máx)= 0.03 S (máx)= 0.03	413	289	Tubo con costura
API	X-52	C (máx)= 0.30 Mn (máx)=1.35 P (máx)=0.30 S (máx)=0.30.	455	358	Tubo con costura
API	X-65	C (máx)=0.26 Mn (máx)=1.40 P (máx)=0.03 S (máx)=0.03	530	448	Tubo con costura

donde:

Rt es la resistencia mínima a la tensión

fy es el esfuerzo mínimo de cedencia

Ni Níquel

C Carbono

Mn Manganeso

P Fósforo

Si Silicio

Cu Cobre

S Azufre

Mo Molibdeno

V Vanadio

Nota: Es importante hacer mencionar que para los grados X-42 a X-65, por cada reducción de 0.01% del carbón especificado se permite un aumento de 0.05% de Mn hasta obtener como máximo 1.45% de Mn.

2.2.2. Calidad del acero.

2.2.2.1. Obtención del acero.

La aceración es el resultado de la separación de las impurezas indeseables que contiene el arrabio. Se debe recordar que el hierro de primera fusión contiene apreciables porcentajes de los llamados elementos normales, de los cuales el fósforo y el azufre son notoriamente perjudiciales por los efectos negativos que producen, aun en pequeñas cantidades.

La eliminación de las impurezas se realiza por medio de la oxidación de éstas, ya que tienen mayor afinidad por el oxígeno que el hierro. El hierro también se oxida, pero mucho después que las impurezas, y al eliminarse éstas, se efectúa un proceso de desoxidación para excluir el oxígeno del hierro residual.

Son varios los procesos que se llevan a cabo para efectuar esta oxidación; así por ejemplo, en los procesos Bessemer o Thomas, la oxidación se realiza inyectando aire a presión o una mezcla de aire y oxígeno, en los respectivos convertidores. En el proceso Martín-Siemmens o de hogar abierto, el óxido de hierro añadido como Fe_2O_3 , es el principal agente oxidante. La purificación en estos procesos pueden realizarse únicamente por oxidación, o también combinando la oxidación con el uso de una base fuerte (CaO). Cuando solo se utiliza la pura oxidación, el proceso se conoce como "Ácido"; en este caso, únicamente podrán eliminarse los elementos carbono, manganeso, y silicio, quedando disueltos el fósforo y el azufre en el hierro; pero, si aparte de la oxidación se le agrega una base fuerte, el proceso se llama básico y en esta forma se excluyen el fósforo y el azufre que realmente interesa en la aceración. El proceso de aceración en un horno de arco eléctrico es más cómodo, la oxidación y reducción, son procesos indispensables para desterrar las impurezas.

Se conocen seis procesos para purificar el hierro de primera fusión:

- 1) Proceso Bessemer ácido.
- 2) Proceso Bessemer o Thomas básico.
- 3) Proceso Martín-Siemmens o de hogar abierto ácido.
- 4) Proceso Martín-Siemmens o de hogar abierto básico.
- 5) Proceso en horno eléctrico de arco ácido.
- 6) Proceso en horno eléctrico de arco básico.

Cada uno produce aceros distintos de los demás y por consiguiente, requieren cada uno de un hierro colado exclusivo.

En el proceso ácido, el carbono se elimina como Bióxido de carbono (CO_2) que es un gas; el Manganeso (Mn) y el Silicio (Si) forman óxidos no volátiles y se escorifican entre si.

Para la eliminación del fósforo, primero se oxida éste, agregando oxígeno al baño, ya sea como óxido de hierro o atacando al baño de aire o una mezcla de oxígeno con aire (convertidores), y después de unos minutos, se añade cal, agitando vigorosamente al baño para facilitar las reacciones y se retira tan pronto como sea posible la escoria formada a fin de evitar así la re-disolución del fósforo en el baño.

Una vez eliminado el fósforo se eleva la temperatura del baño, y para separar el azufre se prepara una escoria básica reductora, mezclando cal con carbón a partes iguales y agregándolas al baño, el resultado será una escoria, la cual es rápidamente eliminada para evitar el regreso del azufre en el baño.

Antes de vaciar el acero, el uso de los desoxidantes es vital para eliminar en lo posible la totalidad de las escorias, reemplazándolas por otras nuevas para evitar así el retroceso de las impurezas al baño, al añadir los desoxidantes, desde la salida del acero del horno hasta la cuchara o tina de recepción del acero. Como desoxidantes se utilizan: ferro-silicio; silicio-manganeso y aluminio en cantidades sólo

indispensables. Durante el vaciado también se agregan los elementos aleados, cuando se trata de producir aceros especiales.

Producción de arrabio

La materia prima más importante para todos los productos ferrosos es el arrabio, producto del alto horno, que se obtiene fundiendo el mineral de hierro con coque y piedra caliza; su análisis final depende, ante todo, de la clase de mineral utilizado.

La hematita (Fe_2O_3) es el mineral de hierro de que más se utiliza. Se dispone de grandes cantidades de pirita de hierro (FeS_2), pero no se utiliza, debido a su alto contenido de azufre que requiere ser eliminado por un procedimiento adicional de tostación.

Alto horno

Un alto horno tiene en promedio ocho, o más metros de diámetro y hasta 60 metros de altura. La producción de dichos hornos oscila entre los 700 y 1,600 toneladas de arrabio por día. La mena, el coque y piedra caliza como materias primas, se llevan a la parte superior del horno mediante un transportador inclinado por medio de vagones. La carga total necesaria para producir 1,000 toneladas de arrabio consiste aproximadamente de 2,000 ton de mena, 800 ton de coque obtenido del carbón bituminoso, 500 ton de piedra caliza y 4,000 ton de aire caliente. La materia prima sólida se carga en capas alternadas.

El propósito del aire caliente es el de permitir al coque quemarse más eficientemente y facilitar la formación de monóxido de carbono, que a su vez reacciona con el mineral de hierro para producir hierro y bióxido de carbono. El empleo del aire caliente en sustitución del frío, reduce en más de un 70% la cantidad de coque utilizado. El aire se calienta hasta 823.15 °K (550°C), aproximadamente, en precalentadores o estufas que consisten en unas estructuras cilíndricas muy altas, que queman el monóxido de carbono gaseoso que sale del alto horno. El flujo del aire caliente penetra al horno a través de tuberías colocadas alrededor, precisamente arriba del crisol.

La piedra caliza, añadida en la carga, sirve como fundente y reacciona con la ganga del mineral para convertirla en una escoria fluida. La escoria flota en el metal fundido y se extrae a períodos frecuentes. El hierro se extrae con menos frecuencia a intervalos de cinco, a seis horas. Por cada tonelada de hierro, se producen: 0.5 ton de escoria y 6 ton de gas. La escoria puede ser utilizada para agregarla al concreto y para hacer lana mineral para aislamiento. El gas se lava y se utiliza para precalentar el aire, generar potencia y servir como combustible para otros hornos de la planta.

Se puede controlar la composición del arrabio, regulando las condiciones del proceso y seleccionando convenientemente las mezclas de menas, ver Figura 2.2.

Reducción directa

El proceso de reducción directa emplea agentes reactivos de reducción, sólidos o gaseosos con mena de hierro, que producen un hierro esponjoso.

El proceso de reducción directa en la fabricación de hierro era anteriormente conocido como la invención del alto horno. Menos del 2% del arrabio mundial es fabricado por este método. El proceso consiste en la trituración de mena de hierro reactivándose, en general, a una temperatura elevada con el agente reductor, el cual puede ser coque, gas natural, aceite combustible, monóxido de carbono, hidrógeno o grafito. Se obtiene hierro esponja de forma granular, así como escoria de hulla que es utilizada para

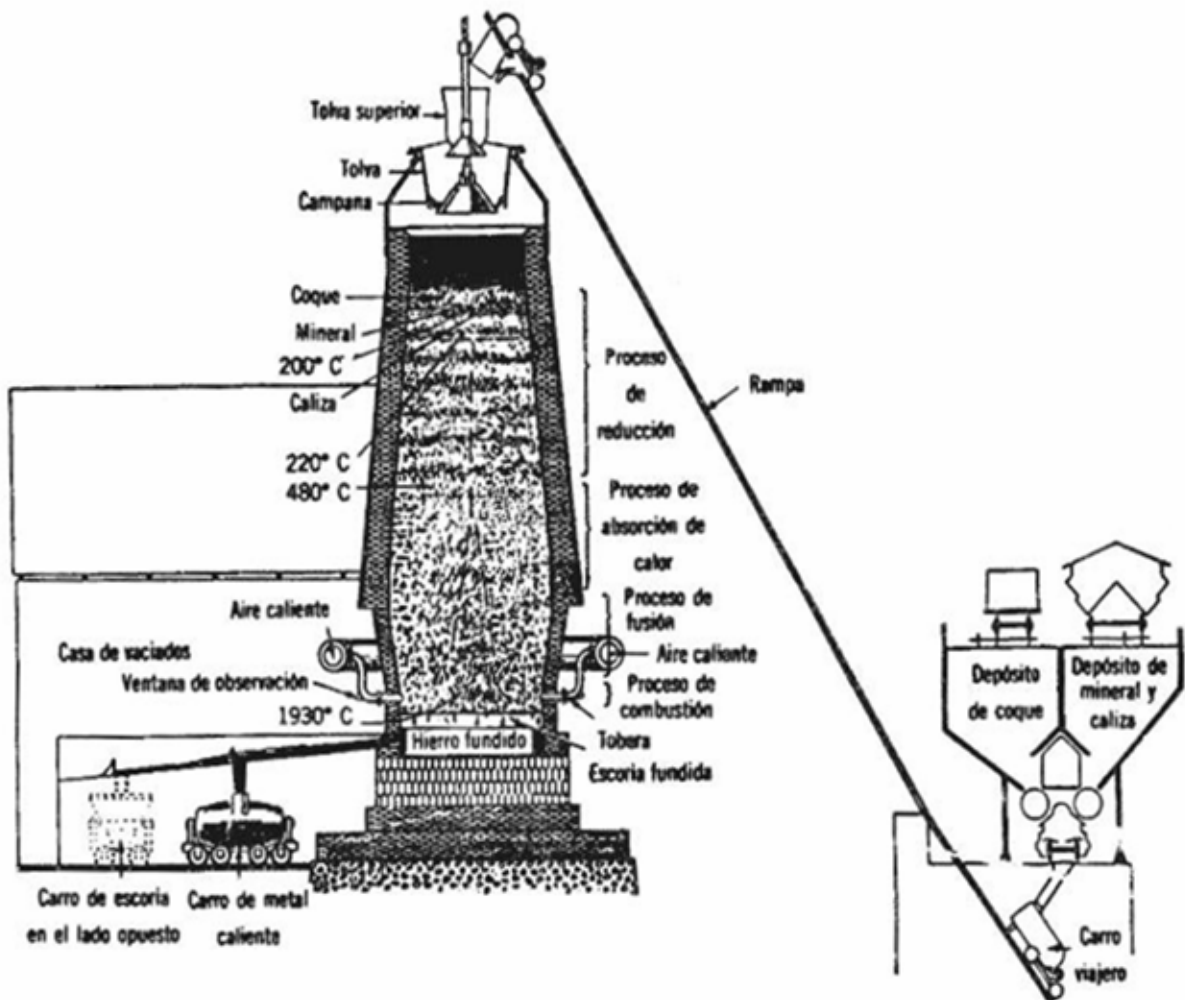


Figura 2.2 Alto Horno

Fabricar polvos de metal y en la producción de hierro puro, o acero en hornos de arco eléctrico, ver Figura 2.3.

Hornos para conversión de arrabio

El arrabio se moldea en moldes permanentes por derretido, o se lleva en vagones de cucharón caliente derretido hacia el horno, donde puede ser refinado para manufacturar hierro dulce, acero, hierro fundido, hierro, maleable o nodular. La diferencia principal en metales ferrosos es la cantidad de carbono que contienen. Aunque el acero puede tener hasta 2.0% de carbono, aplicaciones prácticas limitan este contenido de carbono a solo 1.4%

La mayoría de la producción del acero se hace en tres hornos: oxígeno básico, arco eléctrico y de hogar abierto. Estas clases de hornos no son intercambiables ya que cada cisterna requiere diferentes materiales y fuentes de energía. La fabricación del acero en todos los procesos, refina el arrabio con el propósito de un control adecuado de sus componentes.

Horno de Oxígeno Básico

Utiliza como materia prima el arrabio (65%-80%) de alto horno, además de agregarse chatarra y cal. Se hace pasar una corriente de oxígeno por encima de la superficie de la carga, la cual se calienta de acuerdo, con el calor que produce la oxidación de las impurezas. La carga que contiene un 30% de chatarra, se introduce en una olla forrada de refractario básico, como se muestra en la Figura 2.4. El metal caliente se vacía en la boca de olla inclinada. Una lanza enfriada por agua y que conduce oxígeno, se baja entre uno a tres metros bañando a la olla colocada ya en posición vertical. Con el oxígeno soplado sobre la superficie, comienza inmediatamente la ignición, elevándose la temperatura hasta 1,923.15 °K (1,650 °C) aproximadamente.

Las impurezas que exhiben mayor afinidad por el oxígeno, como el silicio y el manganeso se oxidan primeramente y posteriormente lo hace el carbono. Se agregan cal y flourita para que se combinen con las impurezas y se eliminen en forma de escoria.

El tiempo de vaciado entre dos ollas consecutivas es de 45 minutos aproximadamente, con una producción de 270 toneladas de acero. El oxígeno necesario para producir una tonelada de acero es alrededor de 50 m³.

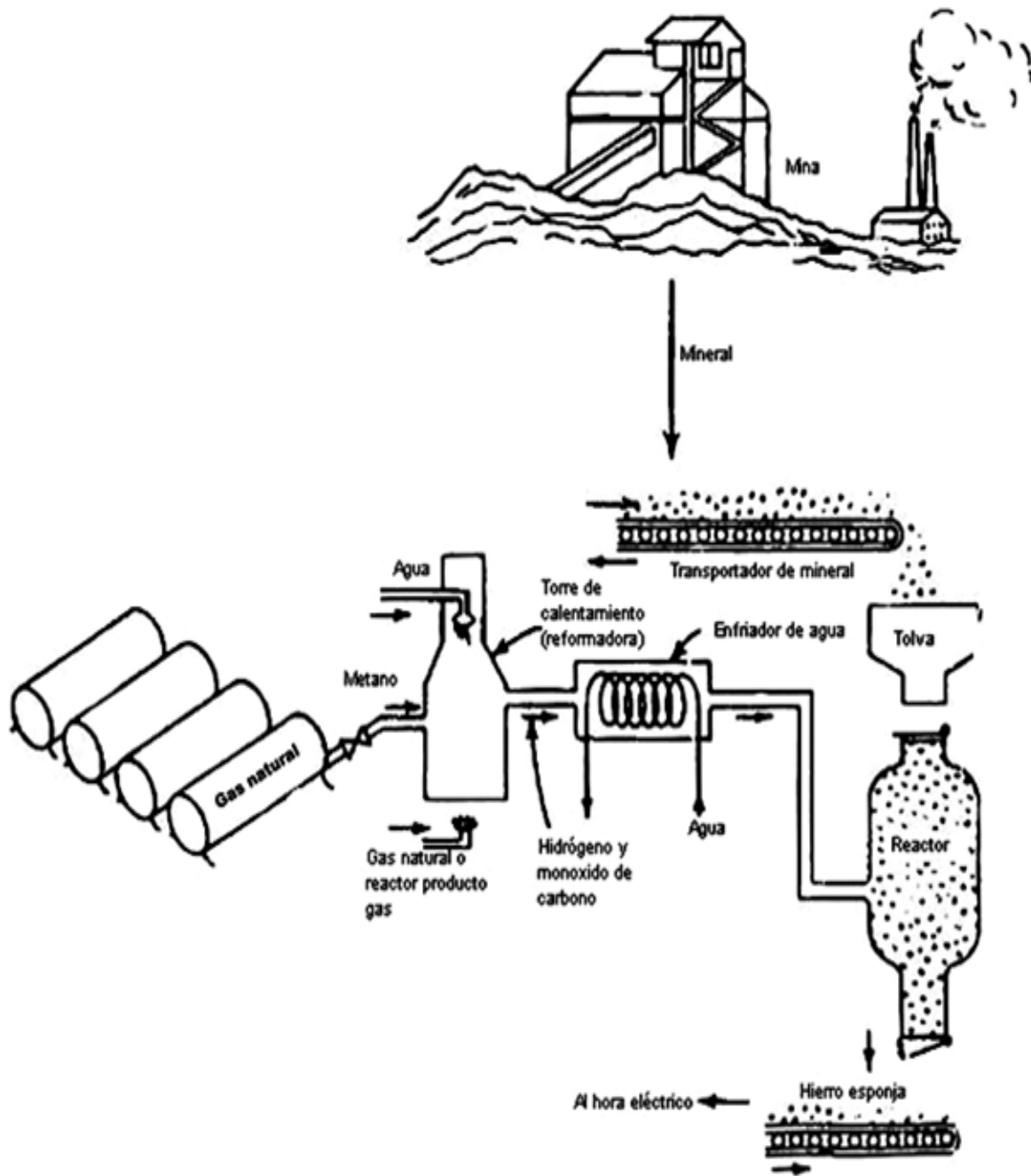


Figura 2.3 Proceso de Reducción Directa para Producir Hierro Esponja

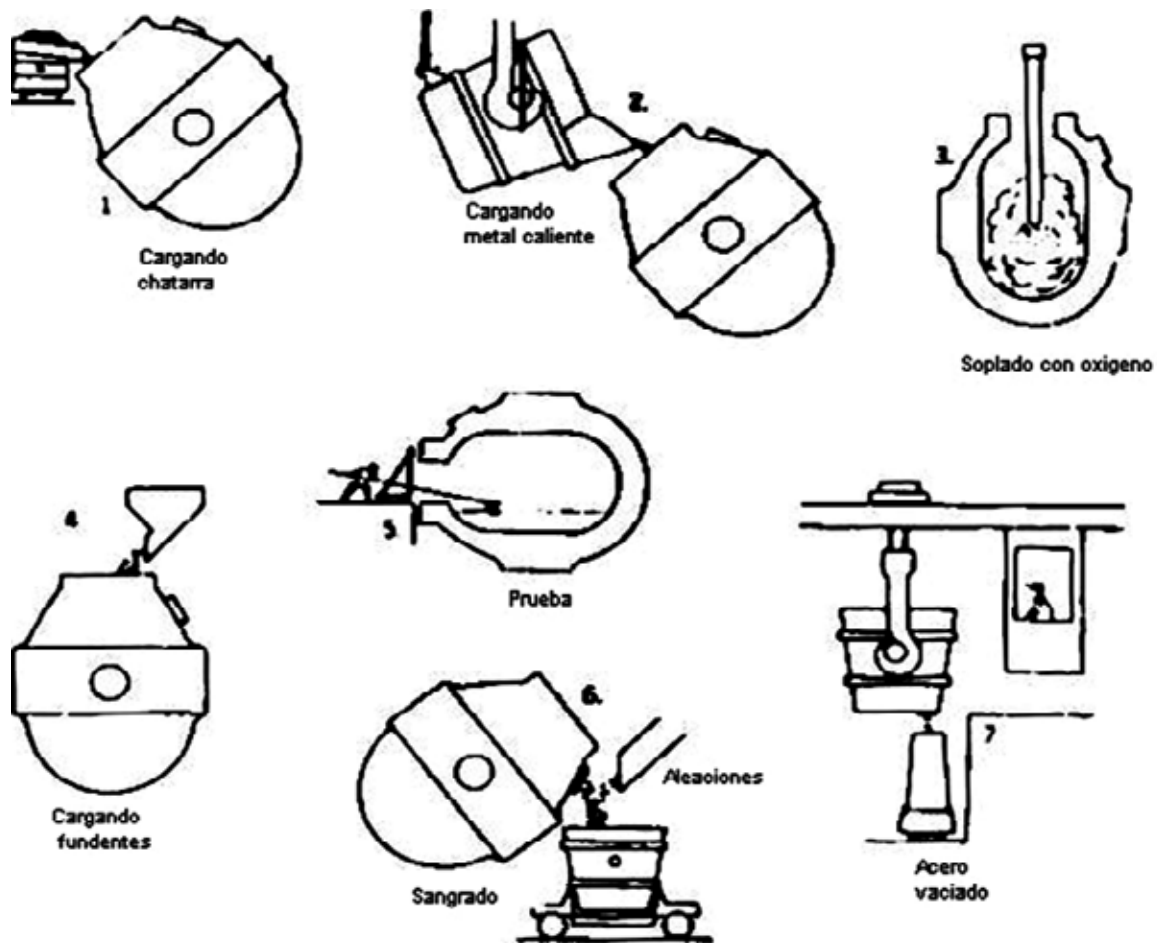


Figura 2.4 Proceso de Horno de Oxígeno Básico

En la Figura 2.5, se muestra una planta de oxígeno para la producción de acero.

Proceso Bessemer Ácido

El convertidor de este proceso presenta un revestimiento ácido formado por sílice, para evitar su corrosión por escoria, ya que el principal elemento termógeno es el silicio, cuya oxidación provoca la gran elevación de temperatura que favorece la operación.

Proceso Bessemer o Thomas Básico

El revestimiento del convertidor Thomas, es básico con base en dolomita, que es un carbonato doble de magnesio y calcio usado para las fundiciones blancas fosforosas pobres en sílice, donde el elemento termógeno es el fósforo.

Horno Eléctrico

El horno eléctrico se usa actualmente para la manufactura de aceros de herramienta de alto grado y aceros de aleación. Aún cuando la electricidad es una fuente de calor

costosa, la utilización de cedacería de grado medio, que es barata, hace posible este proceso, ya que las condiciones favorecen la remoción del fósforo y del azufre. El alto costo de la electricidad queda hasta cierto punto compensado.

El horno empleado es del tipo de arco, que emplea electrodos de carbón que forman un arco con la carga (Figura 2.6). El revestimiento puede ser ácido o básico, si bien este último se usa más generalmente, en particular cuando el objeto del proceso es refinar la pedacería que se carga y en consecuencia deben usarse escorias básicas.

En el proceso básico, la carga se funde bajo una escoria básica oxidante que consiste de cal y escamas de laminadora. Estas condiciones duplican en realidad las que se obtienen en el proceso básico de hogar abierto. En consecuencia, el silicio, el manganeso y fósforo presentes, se absorben en la escoria completamente, de manera que la única impureza presente en el acero, en cantidades apreciables al final del proceso es el azufre. Se forma ahora otra escoria, sobre la superficie del baño, pero esta vez es una escoria básica reductora, compuesta de cal y antracita. Todos los demás procesos de fabricación son oxidantes durante la etapa de refinación y sería imposible, por la presencia del oxígeno atmosférico, favorecer las condiciones de reducción. En el horno eléctrico, sin embargo, las condiciones se encuentran bajo un control completo y la producción de una escoria reductora básico es comparativamente simple. La principal función de esta escoria es la remoción completa y efectiva del azufre y este proceso es el único en la producción de acero, en que ocurre lo anterior.

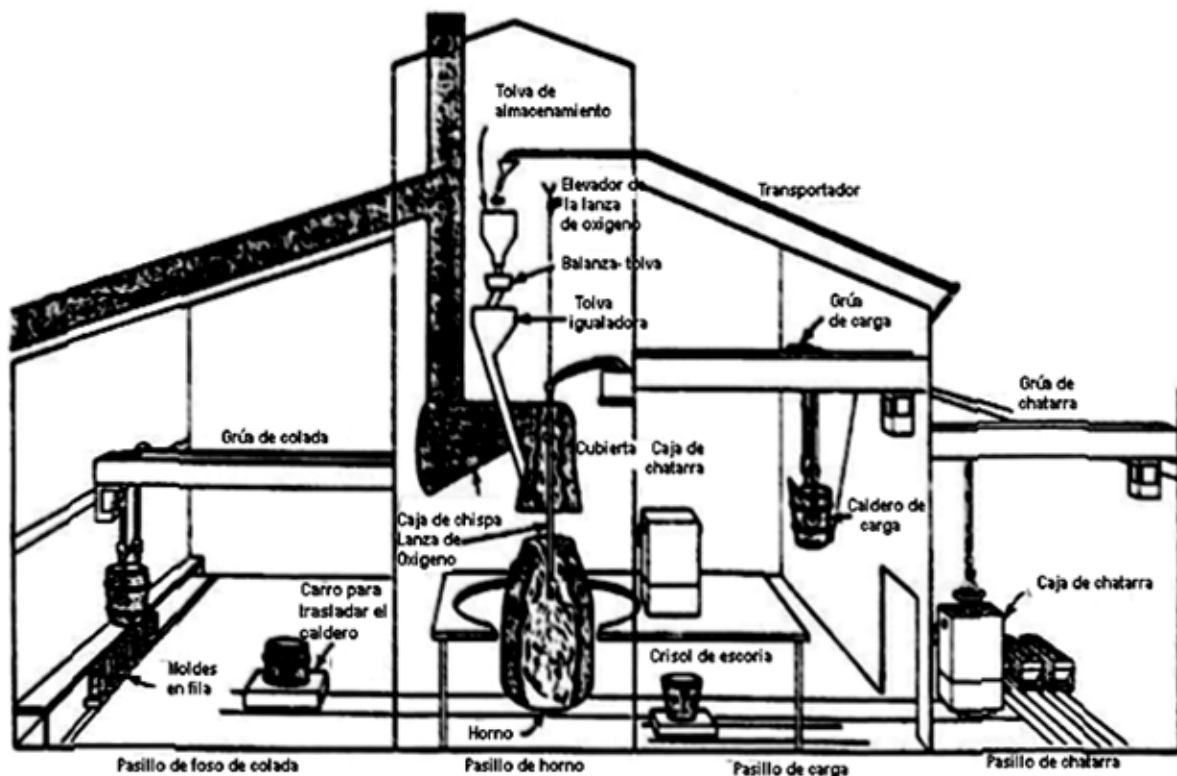


Figura 2.5 Planta de Oxígeno para Producción de Acero

Las principales ventajas del proceso eléctrico son:

- a) Remoción definida y efectiva del azufre.
- b) Las condiciones son químicamente limpias y no puede haber contaminación de la carga, la cual es posible con los combustibles gaseosos.
- c) La atmósfera del horno y la escoria pueden hacerse oxidantes o reductoras a voluntad.
- d) La temperatura se puede controlar fácilmente.
- e) El contenido de carbono del acero se puede mantener constante, haciendo posible el ajuste dentro de límites estrechos.
- f) La adición de elementos de aleación se puede hacer con precisión.

Horno De Hogar Abierto (Proceso Siemens-Martín)

Este proceso puede ser de naturaleza ácida o básica, dependiendo del tipo de carga empleado y, en consecuencia, la naturaleza de la escoria producida. El horno de hogar abierto se calienta por medio de gas natural o gas coque (producto secundario de la manufactura de coque para alto horno), o por medio de combustible líquido. Esta fuente de calor independiente, permite una variación algo mayor en la composición de la carga, puesto que no se necesitan ya las impurezas, para actuar como combustible.

Con objeto de obtener la temperatura necesaria y para economizar en combustible, se usa un sistema de regeneración para precalentar el aire y el gas de entrada. El horno, junto con su sistema regenerativo, está ilustrado en forma diagramática en la Figura 2.7. Las estufas de panal que se ven a la derecha, se recalientan empleando los gases calientes que abandonan el horno. Cuando han alcanzado una temperatura entre 1,173.15 y 1,473.15 °K (900 y 1,200 °C), se operan las válvulas de cambio con el objeto de invertir el flujo de gases de manera que las estufas de la izquierda, que hasta ahora han estado calentando los gases de entrada (enfriándose ellas mismas en el proceso), reciban ahora los gases de salida y comiencen a calentarse. Mientras tanto el par de estufas de la derecha, entran en acción, para precalentar el gas y el aire de entrada. El cambio opera aproximadamente cada media hora.

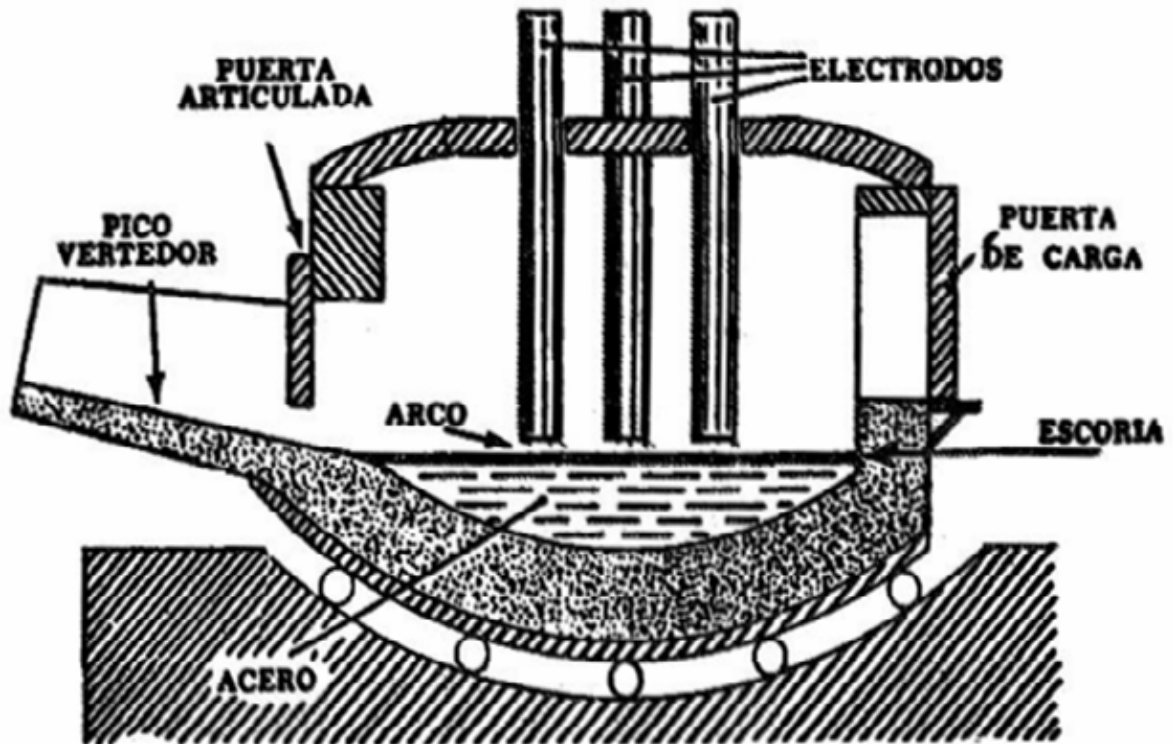


Figura 2.6 Horno de Arco Eléctrico

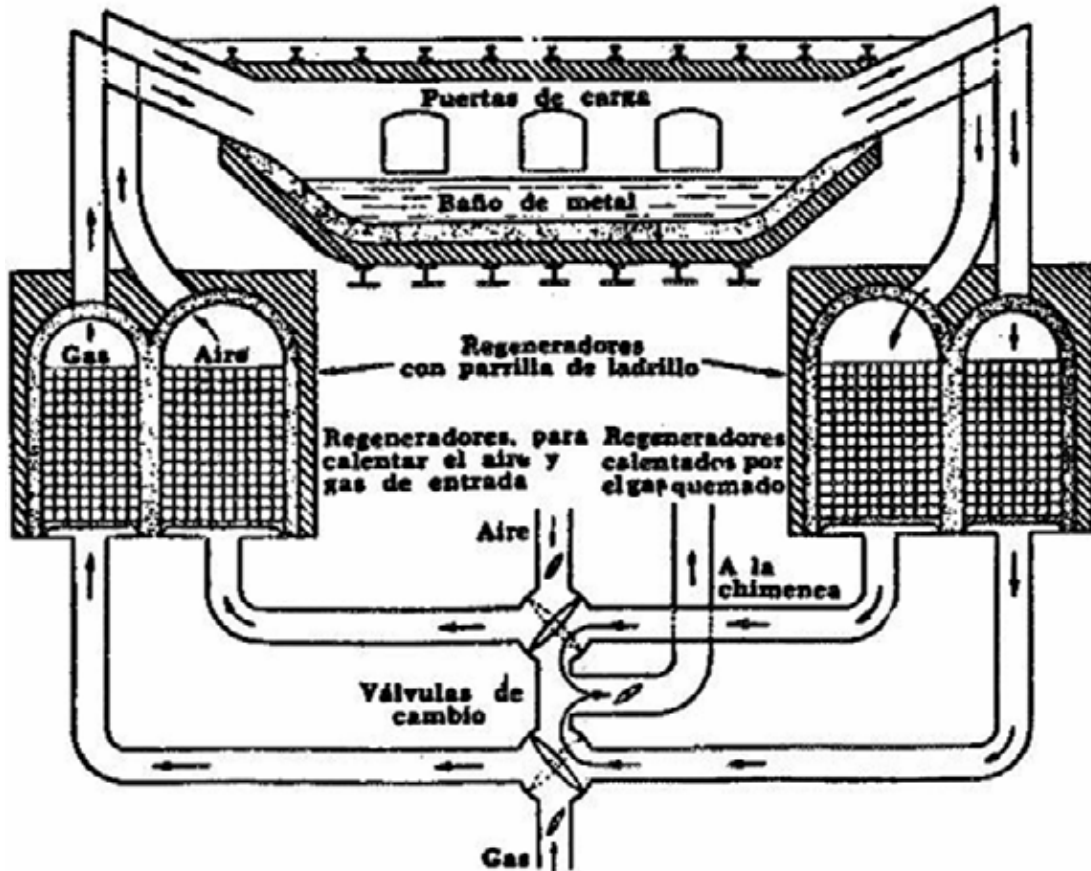


Figura 2.7 Horno de hogar abierto

El horno consiste esencialmente de un hogar, que tiene la forma de un recipiente alargado, y que puede contener de 60 a 300 toneladas de acero, según el tamaño. A lo largo de uno de los costados, se tiene una hilera de puertas de carga, mientras que en el otro, que contiene el agujero de purga, está el orificio de sangrado. En cada extremo se tiene un par de puertas, (o entradas) respectivamente para gas y aire.

Los requisitos principales que debe llenar la materia prima para. el proceso de hogar abierto, son: que su contenido de azufre y fósforo sea bajo, ya que estos elementos no se eliminan durante el proceso. El proceso de fogón abierto, sin embargo, es el más adaptable a todos los procesos de fabricación de acero; ya que aparte del azufre, el contenido de impurezas no es crítico. Aún de azufre es permisible una pequeña cantidad (hasta un 0.05% en total), si bien su remoción no es tan definida como la del fósforo. El azufre debe eliminarse en forma de sulfuro, de manganeso (MnS), y para facilitar lo anterior, el contenido de manganeso debe ser elevado. La carga básica para hogar abierto, consiste en pedacería de acero, arrabio fosfórico y caliza quemada.

Cuando la carga, ya sea ácida o básica, se funde, se agrega mineral de oxido o escamas de laminadora como portadores de oxígeno, mientras que en el proceso básico, se puede agregar algo de caliza en esta etapa. Periódicamente, pueden tomarse muestras de metal fundido, ya que el tiempo total para el proceso es de 6 a 14 horas.

El hogar abierto ácido se usa principalmente para la producción de acero de alta calidad, en la fabricación de ejes, cables de alambre, resortes, fundiciones, bielas de émbolo y acero de aleación, mientras que el hogar abierto básico se usa principalmente para la producción de acero en una amplia gama de trabajos de menos costo. En la práctica moderna la calidad del acero del hogar abierto básico, puede ser muy alta.

Horno de Cubilote

La obtención del hierro se logra al fundir chatarra junto con arrabio, en un horno llamado cubilote. La construcción de este horno es simple, de operación económica y funde hierro continuamente con un mínimo de mantenimiento. En ocasiones, el metal se funde con el combustible, provocando que algunos elementos se integren mientras otros se pierden. Esto afecta la composición final del metal y se hace necesario cerrar la regulación del cubilote dificultando el control del proceso de obtención del hierro fundido especial y aleado, además que el cierre de control de temperatura complica su mantenimiento. La construcción de este horno es simple, consiste en un tubo vertical recubierto con material refractario, con la disposición necesaria para introducirle una corriente de aire cerca del fondo.

Todo el cubilote descansa sobre una placa circular que es soportada arriba del piso, mediante cuatro columnas separadas convenientemente para que unas puertas con

bisagras en el borde inferior puedan caer libremente manteniéndose en posición horizontal por medio de una estaca vertical. La puerta de carga está localizada más o menos a la mitad de la cubierta vertical y la parte superior del cubilote queda abierta, a excepción de una pantalla de metal parachispas, ver Figura 2.8.

Las aberturas para introducir el aire a la cama de coque se conocen como toberas. La práctica común es tener sólo una serie de toberas en una circunferencia paralela a la pared, aun cuando algunos cubilotes grandes tienen dos hileras. Las toberas, de forma acampanada, tienen el extremo mayor en el interior del horno, con el fin de permitir que el aire se difunda uniformemente, y van distribuidas a la distancia adecuada, para obtener la distribución del aire tan uniforme como sea posible. El número de toberas varía según el diámetro del cubilote, siendo desde cuatro en los cubilotes pequeños, hasta ocho o más, en las grandes instalaciones. El área combinada de las entradas es aproximadamente igual a la cuarta parte del área de la sección recta del cubilote.

Alrededor del cubilote y en las zonas de las toberas, se encuentra una caja o chaqueta para el suministro de aire. El aire es suministrado por un ventilador centrífugo de desplazamiento positivo y entra por un lado de la caja de los vientos. Opuestas a cada tobera se encuentran unas pequeñas ventanas cubiertas con mica, de tal forma que puedan inspeccionarse las condiciones dentro del cubilote.

A la abertura a través de la cual fluye el metal hacia el vertedor se le llama agujero de sangrar. Opuesto al vertedor de colada en la parte de atrás del cubilote, se encuentra otro para la escoria. Esta abertura está colocada abajo de las toberas, para evitar que la escoria penetre a ellas y se presente un posible enfriamiento de la misma, provocado por la corriente de aire.

Para la operación, una cámara de coque es encendida, cargándose en forma alterna en proporción de una parte de coque por ocho a diez partes de hierro, esta relación es en mata. Se agregan fundentes, por lo general piedra caliza (CaCO_3), espato flúor (CaF_2), cenizas de sosa (Na_2CO_3); con objeto de eliminar impurezas en el hierro, protegerlo de la oxidación y hacer a la escoria más fluida para retirarla con mayor facilidad del cubilote. En el caso de la piedra caliza, se emplean alrededor de 40 kg por cada tonelada de hierro. La cantidad de aire que se requiere para fundir una tonelada de hierro, depende de la calidad del coque y de la relación coque-hierro. Teóricamente se requieren 5.78 m^3 de aire a una presión de 0.1 MPa Y $288.65 \text{ }^\circ\text{K}$ ($15.5 \text{ }^\circ\text{C}$) para consumir un kilogramo de carbono.

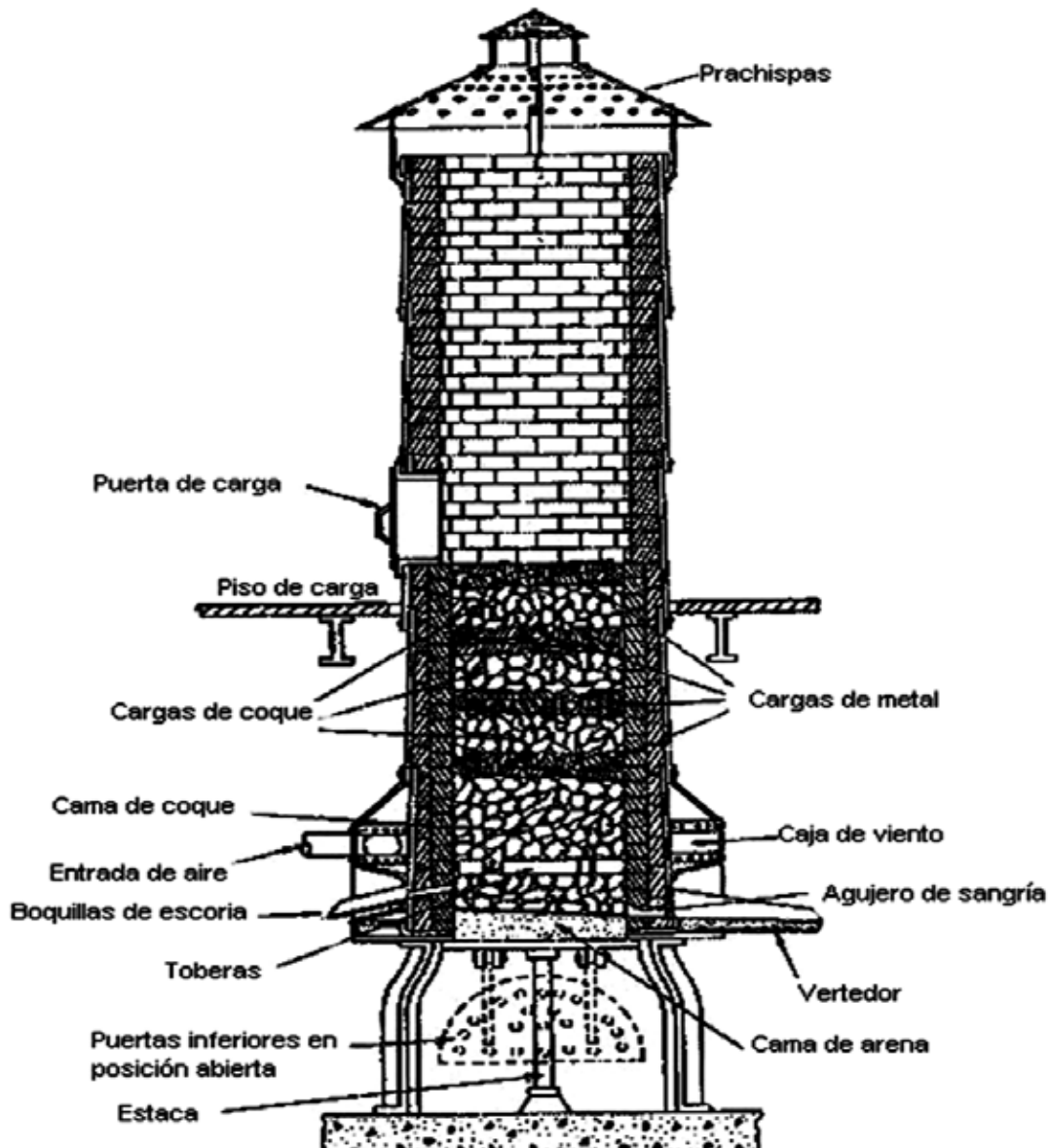


Figura 2.8 Vista Seccional de un Horno de Cubilote

La presión de aire que debe mantenerse depende del tamaño del cubilote, lo compacto de la carga, la clase de hierro que se va a fundir y la temperatura. Los cubilotes pequeños requieren presiones solamente de 0.00118 MPa a 0.00196 MPa; los cubilotes grandes trabajan hasta 0.00696 MPa de presión.

Se puede mejorar apreciablemente la combustión en el cubilote mediante el precalentamiento del aire, como en los hornos de fusión de tipo regenerativo, conocidos como cubilote de aire caliente. Uno de los procedimientos para precalentar el aire es recoger los gases de la chimenea del cubilote, precisamente abajo de la puerta de carga y completa su combustión en un horno adyacente al cubilote. El aire de entrada pasa por un precalentador colocado en este horno y de ahí, a la caja de aire del cubilote, con una temperatura alrededor de 573.15 °K (300 °C). Otro procedimiento es precalentar el aire en un horno separado, sin recibir ningún calor

del funcionamiento del cubilote. Una ventaja de este último es que el aire caliente está disponible tan pronto como se inicie el trabajo del cubilote. Ambos métodos mejoran la rapidez de la fundición y logran una economía apreciable sobre la cantidad de combustible utilizado.

Los costos de control de la contaminación son significativos en la operación del cubilote por lo que en algunas fundiciones se utilizan hornos rotatorios (cubilotes rotatorios) horizontales, alimentados con petróleo para fabricar hierro gris. Es importante mencionar que los hornos de este tipo utilizan aire a compresión para combustible atomizado y funden arriba de 25 ton. por día, a una temperatura de más o menos 1,813.15 °K (1,540 °C). El costo y mantenimiento inicial de las unidades es relativamente bajo, pudiendo utilizarse chatarra en forma de viruta, producida por mecanizado.

2.2.2.2.Fabricación de placa.

Los lingotes de acero que no son refusionados y fundidos en moldes se convierten en productos utilizables en dos pasos:

1. Laminado del acero en formas intermedias (lupias, tochos y planchas).
2. Procesando lupias, tochos y planchas en placas, láminas, barras, formas estructurales u hojalata.

El acero permanece en las lingoteras hasta que su solidificación es casi completa, es decir cuando los moldes son removidos. Mientras permanece caliente, los lingotes se colocan en hornos de gas llamados fosos de recalentamiento, en donde permanecen hasta alcanzar una temperatura de trabajo uniforme de alrededor de 1,473.15 °K (1,200 °C) en todos ellos. Entonces, los lingotes se llevan al tren de laminación, en donde debido a la gran variedad de formas terminadas por hacer, son primero laminadas en formas intermedias como lupias, tochos o planchas. Una lupia tiene una sección transversal con un tamaño mínimo de 1 50Xl 50 mm. Un tocho es más pequeño que una lupia y puede tener cualquier sección, desde 40 x 40 mm hasta el tamaño de una lupia.

Las planchas pueden laminarse tanto de un lingote como de una lupia. Tienen un área de sección transversal rectangular con un ancho mínimo de 250 mm y un espesor mínimo de 40 mm El ancho es siempre tres o más veces el espesor, que puede ser de 1,500 mm máximo. Placas, plancha para tubos y fleje se laminan a partir de planchas.

Un efecto del trabajo en caliente durante la operación de laminado es el refinamiento del grano causado por la recrystalización, ver Figura 2.9. La estructura gruesa es definitivamente despedazada y alargada por la acción del laminado. Debido a la alta temperatura, la recrystalización aparece inmediatamente y comienzan a formarse pequeños granos. Estos granos crecen rápidamente hasta que la recrystalización es completa.

La uniformidad de la temperatura es importante en todas las operaciones del laminado, puesto que controla el flujo del metal y la plasticidad.

La mayoría de los laminados primarios se hacen ya sea en un laminador reversible de dos rodillos o en uno de rolado continuo de tres rodillos ver Figura 2.10.

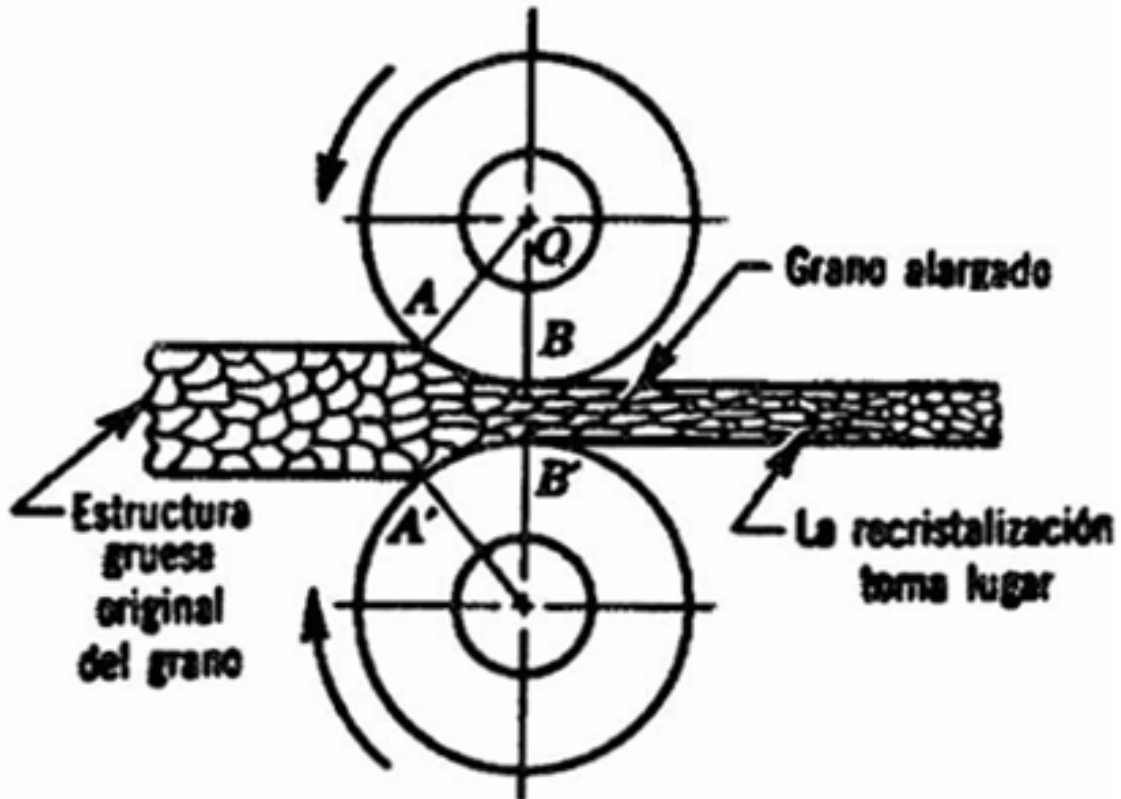


Figura 2.9 Efecto del Rolado en Caliente sobre la Estructura del Grano

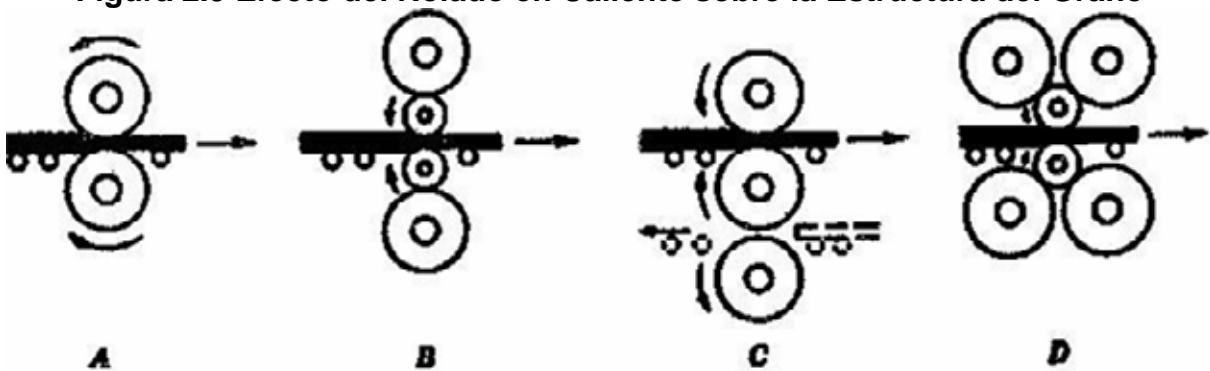


Figura 2.10 Posiciones en Trenes de Laminación

- A Laminador de Dos Rodillos Continuos o Reversibles.
- B. Laminador de Cuatro Rodillos para La minas Anchas, con Rodillos de Respaldo.
- C. Laminador de Tres Rodillos para Laminado de Vaivén.
- D. Laminador de Conjunto, Usando Cuatro Rodillos de Respaldo.

A intervalos frecuentes el metal se hace girar $\pi/4$ rad (90°) sobre su costado para conservar la sección uniforme y refinar el metal completamente. Se requieren de alrededor de treinta pasadas para reducir un lingote grande a una lupia.

Los tochos podrían laminarse en un gran laminador del tamaño que se utiliza para lupias, pero por razones económicas no se efectúa de esta manera. Frecuentemente, se laminan lupias en un laminador continuo de tochos, compuestos de alrededor de ocho estaciones de laminado en línea recta. Por último el acero formado, pasa a través del laminador, para posteriormente salir con un tamaño final de tocho, el cual es materia prima para las placas.

2.2.3. Fabricación de tuberías de acero

De acuerdo con normas Norteamericanas, se distingue entre tubos comunes (pipe) y tubos especiales (tubing). El tubo común se emplea en la conducción y conexión de líneas para transporte de fluidos, mientras que el especial es utilizado en serpentines para cambiadores de calor y calderas; así como en la industria aeroespacial.

Estas dos clases de tubos se fabrican por técnicas diferentes, a partir de las cuales se pueden clasificar en tubería con costura y en tubería sin costura. Para tubería con costura: soldadura por fusión eléctrica, soldadura por resistencia eléctrica, soldadura por arco eléctrico; para tubería sin costura: por perforado y cilindrado, martillado o forja, torneado y barrenado, y por forjado del hueco. Además, algunas fábricas están preparadas para hacer por extrusión tubos de pequeño diámetro y formas tubulares de variados perfiles geométricos, o para fundición de tubos de gran diámetro.

2.2.3.1. Tubería con costura

Este tipo de tubería se distingue por sus procesos de fabricación con material de aporte y que resultan ser los más recomendables por sus características tanto físicas como económicas y por su facilidad de producción; en donde se aplican métodos de depósito de soldadura continuos o intermitentes.

Soldadura por fusión eléctrica

La lámina plana, llamada plancha para tubos (skelp), se prepara al ancho y grueso apropiados para los diámetros interior y exterior de los tubos que se deseen. Se carga luego en un horno eléctrico y, cuando se alcanza la temperatura adecuada, se estira a través de una matriz o hilera, en forma de embudo, para que gradualmente vaya tomando la forma de tubo, obligando a los bordes de la plancha a juntarse para unirlos por fusión. Después se pasa el tubo por una serie de rodillos en los que se va estirando hasta obtener las dimensiones finales, ver Figuras 2.11 y 2.12.

Soldadura por resistencia eléctrica

Para tubos corrientes o especiales, se alimenta una tira a una serie de laminadores conformados con rodillos horizontales y verticales, dispuestos de modo que la tira

plana se convierte en tubo. Este se pasa luego por los electrodos de soldar, que son discos de cobre unidos al secundario de un grupo transformador giratorio. Dichos electrodos hacen contacto con cada lado de la forma tubular en que hay que hacer la costura; a través de ésta pasa una corriente eléctrica que provoca que la temperatura se eleve hasta el punto de fusión. La rebaba exterior se quita con una herramienta cortante, a medida que el tubo va saliendo de los electrodos; la rebaba interior se separa bien con un martillo neumático, o bien, pasando un mandril, por el tubo luego que este se haya enfriado, ver Figura 2.13.

Soldadura por arco eléctrico sumergido

Este procedimiento se emplea para tubos de 609.6 mm a 914.4 mm de diámetro exterior. Primeramente, se prensa la plancha hasta formar una U y luego una O. Este perfil en O se coloca en un soldador automático, soportado en su interior por una zapata de cobre enfriada con agua. Asimismo, se emplean dos electrodos muy próximos. La corriente pasa de uno a otro electrodo atravesando un fundente granular y la junta de los bordes de la plancha. La alta temperatura del arco calienta éstos; y justo sobre la costura se coloca una varilla de soldar, la cual se funde depositando su metal en la ranura. Después de hacer la soldadura exterior, se transporta el tubo hasta un soldador del interior, en el que se realiza una operación semejante; sin necesidad de la zapata soporte, ver Figuras 2.14 y 2.15.

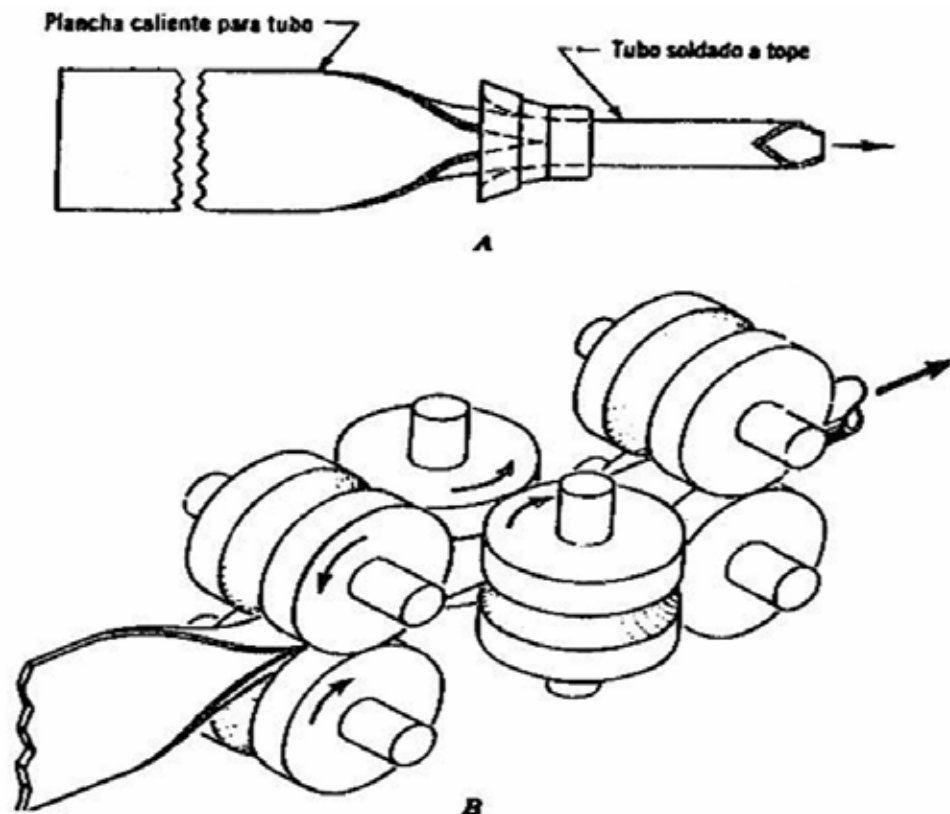


Figura 2.11 Producción de Tubo Soldado a Tope

- A. Plancha para Tubo Jalada a Través de una Campaña de Soldado
- B. Plancha para Tubo Continuo Soldado a Tope

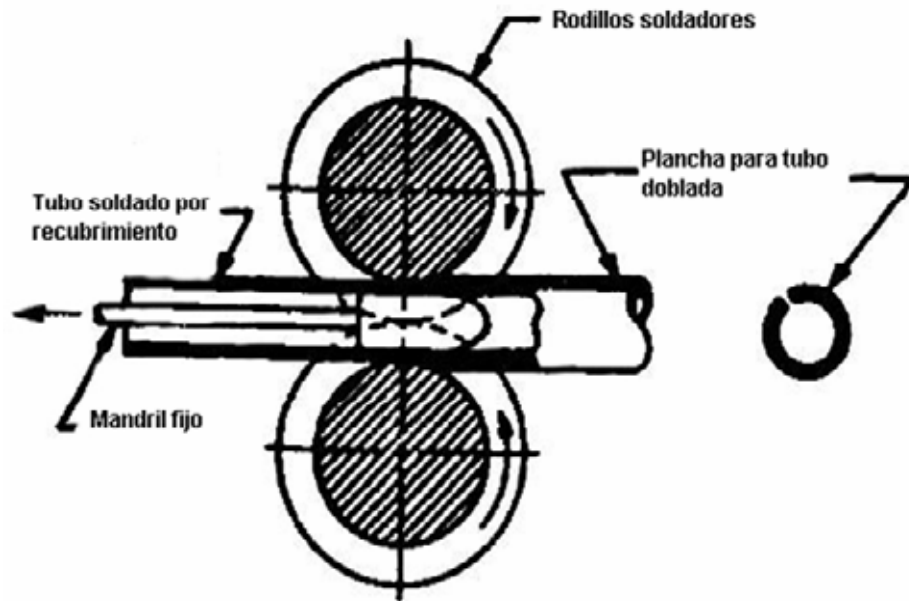


Figura 2.12 Tubo Soldado a Partir de Placa para Tubo

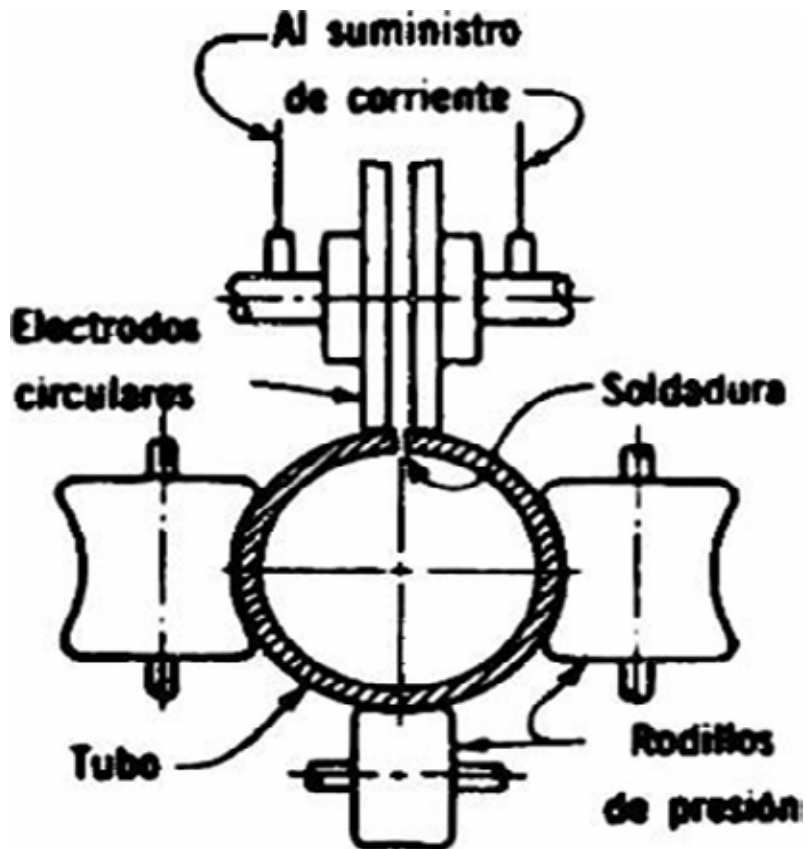


Figura 2.13 Soldadura Continua a Tope Por Resistencia Para Tubo de Acero

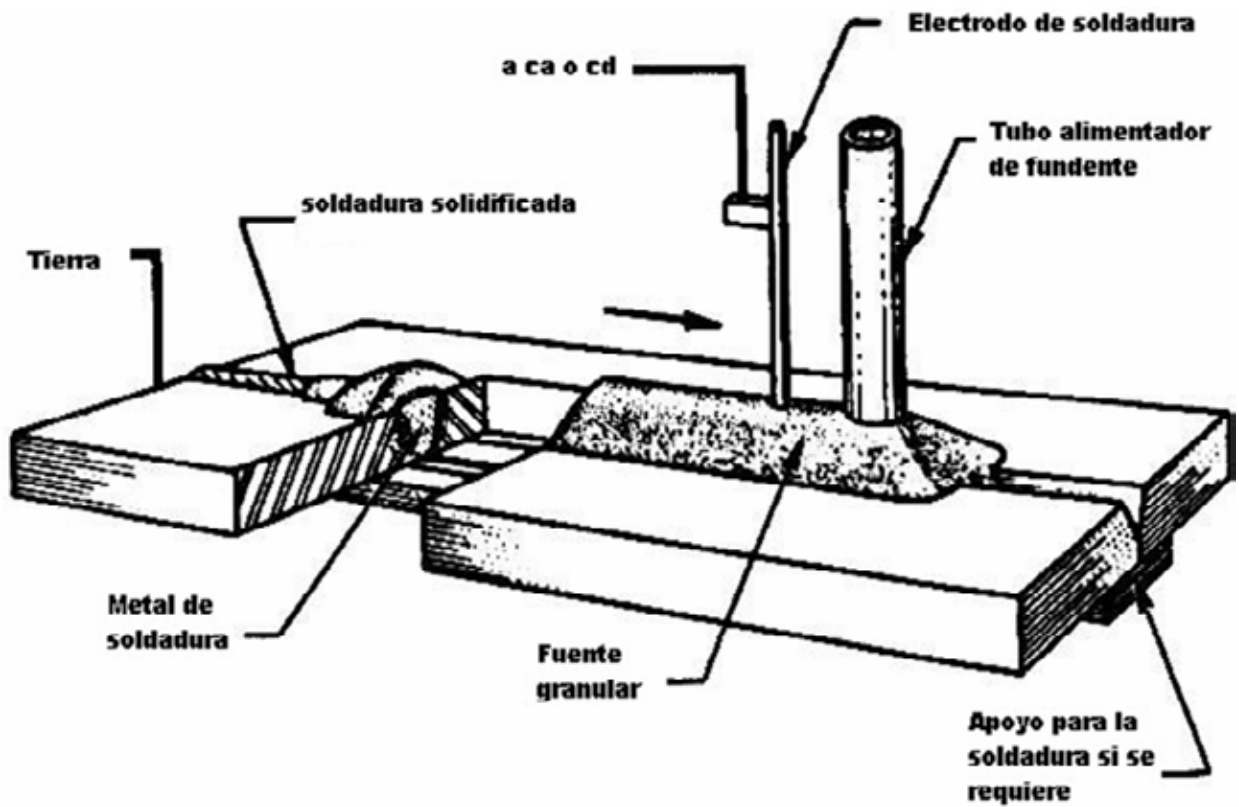


Figura 2.14 soldadura Por Arco Sumergido

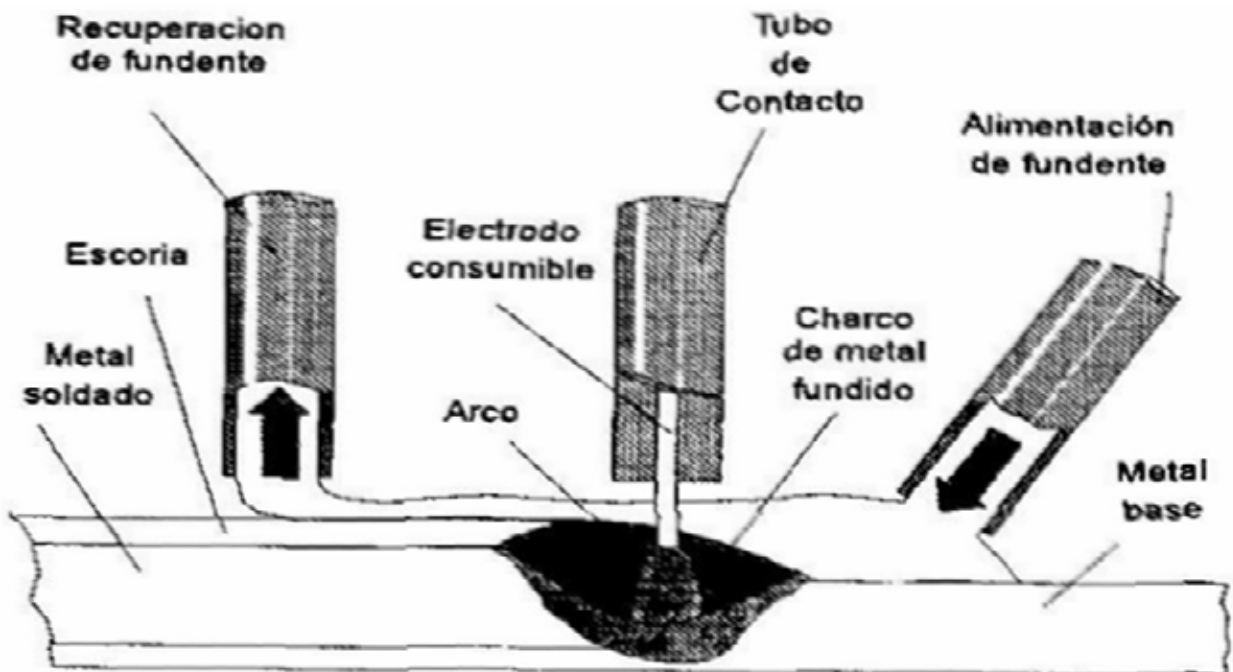


Figura 2.15 Soldadura de Arco Eléctrico Sumergido (SAW)

Soldadura por arco eléctrico manual (SMAW)

La soldadura de arco manual usa el calor de un arco eléctrico entre un electrodo de metal cubierto y la placa del tubo; la protección gaseosa proviene de la descomposición de la cubierta del electrodo y el metal de aporte es proporcionado por el electrodo. Es importante destacar que la placa que formará el tubo debe presentar una preparación en sus extremos laterales (bisel), a fin de facilitar la penetración del material de aporte, ver Figura 2.16.

Este procedimiento tiene como limitante que todas las manipulaciones de la soldadura, están controladas por el soldador, como son la inclinación del electrodo, el largo del arco, la velocidad y la oscilación. El soldador debe poner el amperaje apropiado en su fuente de energía y seleccionar la polaridad (sí es corriente directa).

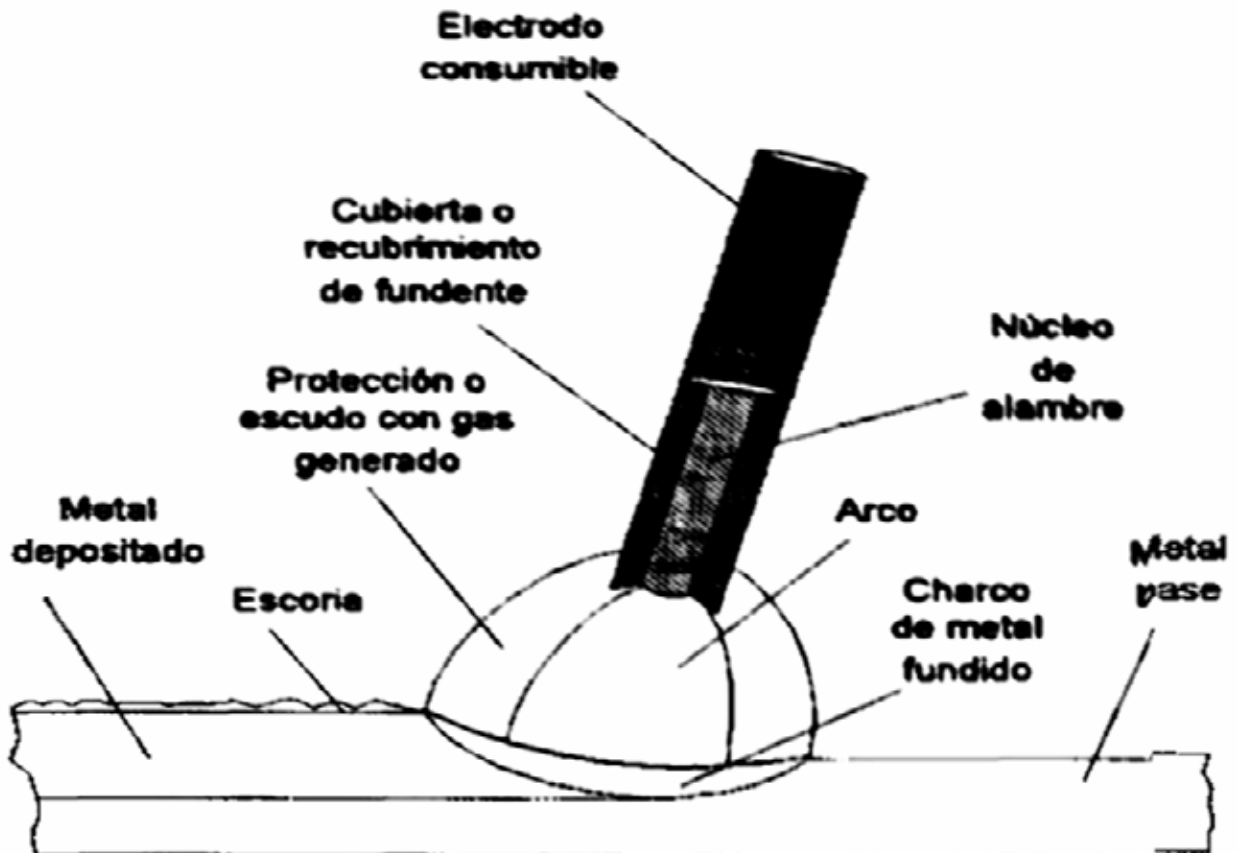


Figura 2.16 Soldadura de Arco Eléctrico Manual (SMAW)

Soldadura por arco eléctrico con protección de gas (SMAW)

La soldadura de arco con gas de protección (también llamada soldadura con gas inerte o MIG) emplea el calor de un arco eléctrico generado entre un electrodo continuo de metal de aporte y la pieza a soldar. La protección se obtiene mediante un gas o mezcla de gases inyectado a la zona de trabajo, como se muestra en la Figura 2.17.

Esto puede ser por medio de una maquina semiautomática o por procesos automáticos. En el modo semiautomático, el soldador controla la inclinación y la distancia de su pistola a la pieza de trabajo, así como la velocidad de viaje y manipulación del arco. Lo largo del arco y la alimentación del electrodo están controlados automáticamente por la fuente de energía y el alimentador de alambre.

Para la aplicación del proceso semiautomático se debe tener especial control en la habilidad del operador de soldadura, para evitar un corto circuito que produzca una fusión Incompleta.

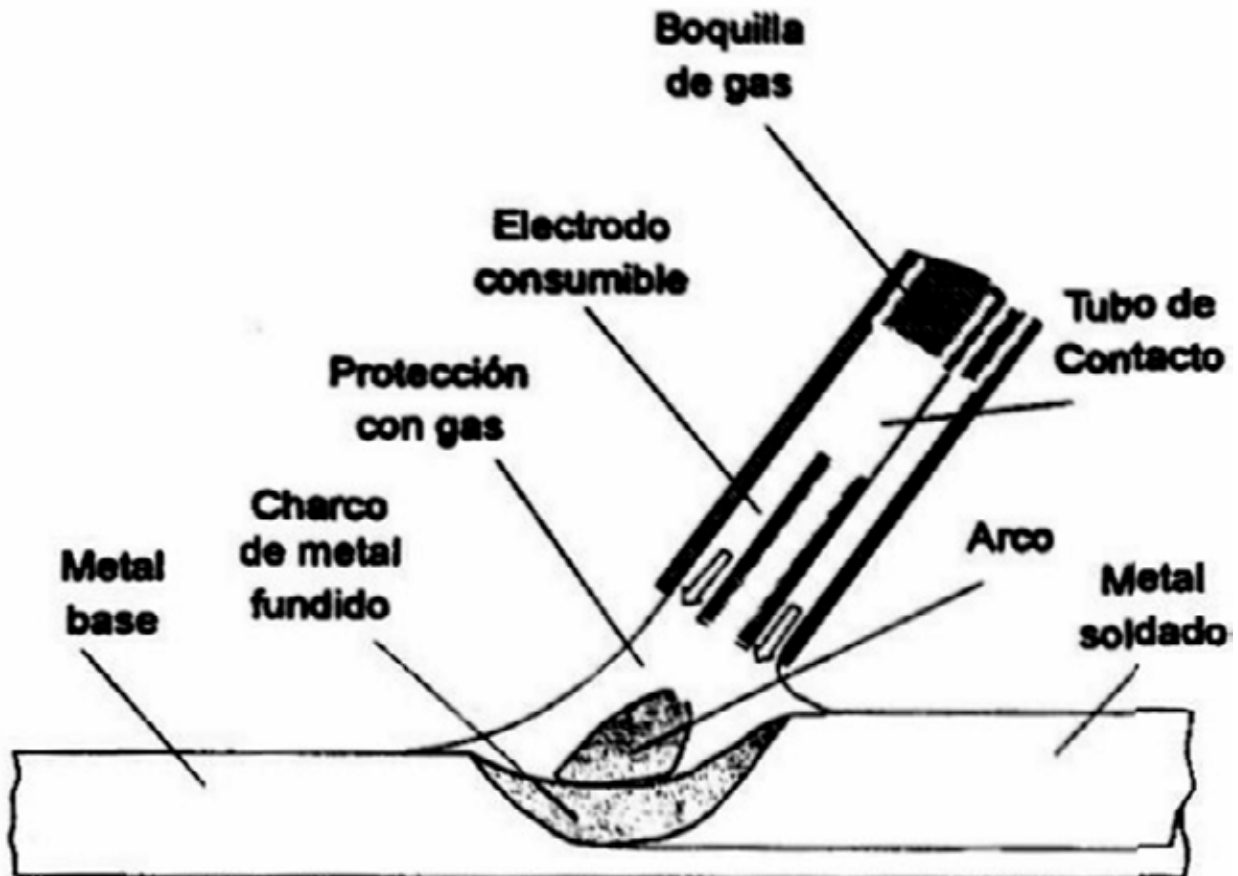


Figura 2.17 Soldadura de Arco Eléctrico con Protección de Gas (CMAW)

2.2.3.2. Tubería sin costura

Para producir un tubo sin costura se hacen pasar tochos cilíndricos de acero entre los rodillos de forma cónica, operando en la misma dirección, entre estos rodillos se fija un punto o mandril que ayuda en el perforado y controla el tamaño de agujero cuando el tocho está forzado sobre el, esto se realiza a temperatura de forja.

El método para extruir tubos de manera usual es el de extrucción directa, donde no se utiliza un mandril para formar el interior del tubo. Después de que todo el tocho se coloca dentro del equipo de extrucción, el vástago compresor avanza y destruye el metal a través del dado y alrededor del mandril. Pueden extruirse tubos de acero de

bajo carbono a temperatura cercana al ambiente, pero la mayoría de las aleaciones el tubo debe calentarse alrededor de $1,573.15 \text{ }^\circ\text{K}$ ($1,300 \text{ }^\circ\text{C}$).

Es importante hacer notar, que la utilización de tubería de este tipo no es recomendable para acueductos por su alto costo de fabricación.

Tubos comunes y especiales sin soldadura o costura

Se pone en contacto un tocho calentado con rodillos cónicos giratorios de modo que el tocho sea empujado, haciéndolo pasar por la separación que queda entre los rodillos (ver Figuras 2.18 y 2.19). En dicha separación se coloca un mandril; la parte central del tocho, que está blanda, posibilita que los rodillos lo estiren sobre el mandril, produciéndose una parte hueca. Cuando el tocho ha pasado por completo sobre el mandril, queda en forma de un tubo sin costura de pared gruesa. Este tubo se pasa luego por un laminador que lo estira hasta que tenga el diámetro exterior y el grueso de pared adecuados.

El procedimiento de fabricación descrito queda limitado en cuanto al diámetro y al grueso. Para tubos aleados sin soldadura y para tubos de acero al carbono de paredes gruesas, se emplea frecuentemente un procedimiento llamado de embutido y estirado. Una plancha plana circular, del diámetro y grueso apropiados, se coloca en una prensa hidráulica y es presionada por su símbolo, que lo hace pasar por una matriz. La copa embutida así formada, se recalienta y vuelve a prensarse a través de una matriz de menor diámetro, alargándose hasta que se convierte en corto cilindro con uno de sus extremos cerrados. Este cilindro se coloca después del recalentamiento necesario en un banco horizontal de estirar que, empujado por un émbolo, es obligado a pasar por matrices de diámetro cada vez menores, hasta que llegue a tener el diámetro exterior deseado.

Tubos especiales forjados, torneados y barrenados

En este procedimiento se calienta el lingote y se forja hasta que adquiere una forma cilíndrica, basta, de tamaño excesivo tanto en diámetro como en longitud. La pieza forjada se monta luego en un torno y se tornea al diámetro exterior deseado. Asimismo se cortan los extremos que han quedado bastos, de modo que se tenga la longitud necesaria. Se coloca el cilindro en una máquina taladradora y se le barrena hasta que tenga el espesor de pared que se requiera ver Figura 2.20.

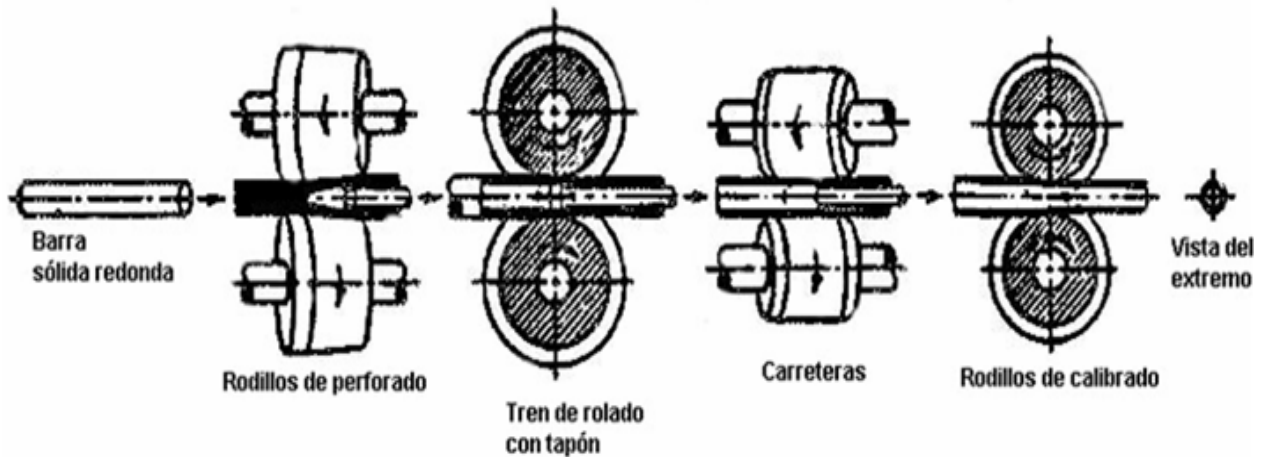


Figura 2.18 Principales Pasos en la manufactura de Tubería sin Costura

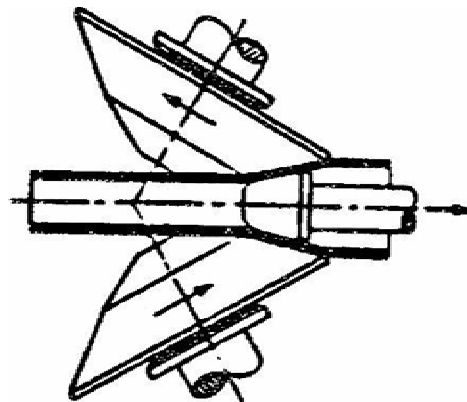


Figura 2.19 Proceso Para Grandes Tubos sin Costura

Tubos comunes y especiales por forjado del hueco

En este procedimiento se funden los lingotes y se recortan sus extremos; luego se colocan en un horno y se calientan hasta una temperatura determinada. El lingote calentado se pone en una prensa en la que es perforado. A este cilindro hueco, abierto por un extremo, se le quitan las cascarillas o costras y se estira sobre un mandril en un banco horizontal de estirar. El extremo cerrado se quita con el soplete y a la pieza hueca se le decapa químicamente. En seguida, se endereza la pieza, se monta en el torno y se tornea al diámetro exterior verdadero. El interior se rectifica para quitarle la costra (Ver Figura 2.21)

2.2.3.3. Tubería de gran diámetro

En la fabricación de tubería de diámetro mayor de 965.2 mm se deberán considerar algunos requerimientos adicionales para su manufactura, como por ejemplo, la colocación de crucetas en el interior del tubo, a fin de evitar el ovalamiento de éste, implantar mecanismos específicos de transportación y almacenamiento, así como un procedimiento específico para el montaje de esta tubería.

Es importante subrayar que para la tubería de gran diámetro, el proceso de manufactura más empleado es el de costura helicoidal, ya que por las características del equipo que se requiere ésta es la práctica más recomendable y económica; sin embargo, esto no es una limitante para el empleo de algún otro proceso.

2.2.3.4. Fabricación de piezas especiales

Se consideran piezas especiales todos aquellos elementos tubulares que son habilitados a partir de secciones de un tubo, tales como codos, bifurcaciones, múltiples de succión y descarga, etc., ya que en la mayoría de los casos no son elementos rectos de gran longitud.

Para la manufactura de este tipo de elementos es necesaria la aplicación de una gran cantidad de soldadura, a fin de dar la forma requerida. Los materiales que se recomiendan en este manual, proporcionan todos los elementos necesarios para realizar su fabricación con características óptimas de operación.

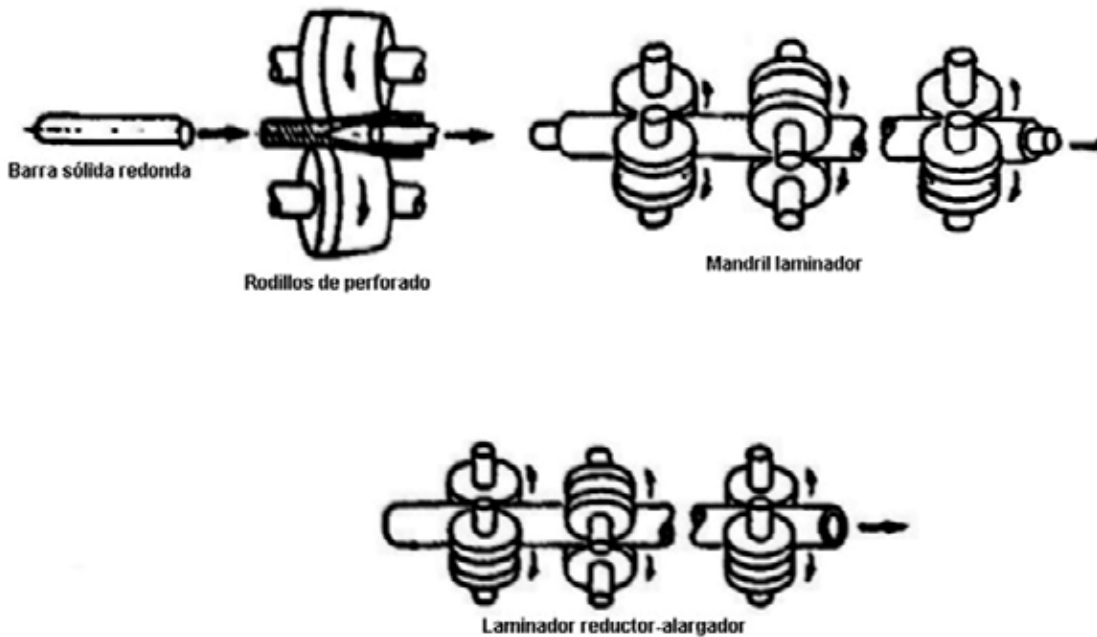


Figura 2.20 Principales Pasos en la Manufactura de Tubería Continua

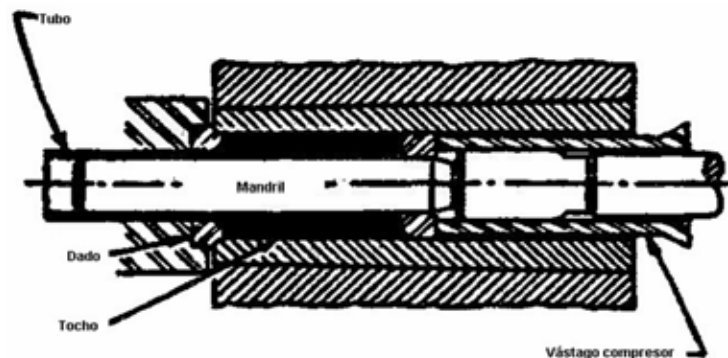


Figura 2.21 Extrusión de un Gran Tubo a Partir de un Tocho Caliente

2.3. NEOPRENO

El nombre genérico "Neopreno" significa "Nuevo Isopreno", con cuyo término se dio a conocer comercialmente el elastómero sintético a base del monómero cloropreno, desarrollado por la compañía Du-Pont; en la actualidad este producto es fabricado por otras compañías como Bayer, Goodrich, Unirroyal, etc.

En su estado original (crudo), el neopreno puede adquirirse en pacas u hojuelas, su color varía de crema a pardo, y se caracteriza porque al quemarse genera flama con base verde y al apagarse despiden humos blancos, dejando cenizas duras de color blanco.

El neopreno se emplea en la elaboración de adhesivos y en la fabricación de piezas sólidas como, empaques, mangueras, bandas, revestimiento, etc., para ello se utilizan los tipos W y G, según Du-Pont.

2.3.1. Procesamiento

Como todos los elastómeros, el neopreno tiene que vulcanizarse para adquirir propiedades mecánicas para el servicio al cual se destine, la vulcanización consiste en adicionar enlaces-puente de azufre a la estructura del cloropreno, para ello se emplea calor, con temperaturas que varían entre 433.15 °K y 291.15 °K (160 °C y 180 °C). Las características del producto dependerán de la fórmula preparada, donde la cantidad de "hule determina el contenido de los otros compuestos.

El proceso se inicia mezclando el cloropreno con los componentes de la fórmula, conocidos como cargas, neutralizadores, antioxidantes, aceleradores o retardantes. La mezcla puede efectuarse en mezcladores internos (Barnbury) o en molinos de rodillos, de cuya operación se obtiene un compuesto (hule crudo) en forma de lámina.

La lámina de hule crudo generalmente es de color negro, aunque puede prepararse en cualquier color, esto dependerá de las características de la carga o pigmento utilizado en la fórmula del compuesto. Las operaciones posteriores a que puede someterse son las siguientes:

- a) Moldeado
- b) Calandrado
- c) Extruido

El moldeado permite obtener piezas de formas normales o caprichosas, el calandrado se emplea para productos laminados de gran longitud, y con el extruido se obtienen tiras o perfiles.

2.3.2. Propiedades

El neopreno es uno de los elastómeros de mayor uso en ingeniería ya sea en diseño, construcción o manufactura, las propiedades físicas o mecánicas típicas del neopreno son las siguientes:

1)	Dureza, Shore-A	70±5 Puntos
2)	Resistencia a la tracción	19.99 MPa
3)	Alargamiento,	990%
4)	Compresión fija	35%
5)	Cambios debido a la inmersión en combustible, aceite ASTM No. 1	
	Resistencia a la tracción	-30%
	Alargamiento	-30%
	Dureza Shore A	+10
6)	Resistencia al ozono	100%

2.3.3. Aplicación en tuberías

El neopreno se utiliza principalmente en tuberías superficiales de acero como aislante entre los soportes de concreto o de metal y la tubería; Aunque también se puede utilizar como amortiguador de esfuerzos en tuberías que requieren flexibilidad. La selección de la placa de neopreno por utilizar (espesor y dureza) es función del diámetro y peso de la tubería; sin embargo, ésta se rige por la práctica común. Por ejemplo, para líneas de 1,219.2 (48 pulg) de diámetro se emplea placa de una pulgada de neopreno.

2.4. RECUBRIMIENTOS

2.4.1. Recubrimientos para tuberías superficiales

Las tuberías superficiales están sujetas a corrosión externa e interna, debido principalmente a su exposición al medio ambiente y agua. No obstante, una forma de prevenir la corrosión es mediante la aplicación de recubrimientos anticorrosivos.

En esta sección se exponen los sistemas de recubrimientos anticorrosivos que pueden ser empleados en los diversos componentes que están sujetos a corrosiones interna o externa. Es importante aclarar que las Tablas 2.5 a 2.8 son únicamente una guía para la selección del recubrimiento anticorrosivo, por lo que la opción definitiva debe contemplar un análisis detallado de factores tales como; propiedades químicas del recubrimiento, cualidades ecológicas, facilidad de aplicación en campo, costo, facilidad de reparación, etc.

2.4.1.1. Medios corrosivos

A continuación se indican algunos medios que pueden favorecer la corrosión de estructuras y tuberías metálicas:

- Ambiente húmedo con o sin salinidad y gases derivados del azufre
- Típico de zonas con humedad relativa mayor a 60%, puertos y refinerías.
- Exposición con agua no potable.
- Son las condiciones interiores de tanques y tuberías para agua no potable
- Exposición con agua potable
- Son las condiciones interiores de tanques y tuberías para agua potable
- Exposición a destilados tratados

Son las condiciones interiores de tanques para destilados dulces en las refinerías, plantas y terminales de almacenamiento.

2.4.1.2. Protección

En las Tablas 2.5 a 2.8 se describen las características de los sistemas de protección para cada condición de medio corrosivo, y además se incluyen el tipo de preparación de la superficie, tipo de primario y acabado, número de capas y espesor en milímetros de película seca por capa, así como el sistema de aplicación que se recomienda

2.4.2. Recubrimientos para tuberías enterradas

Para combatir la corrosión externa en tuberías enterradas que operan a baja temperatura (menor de 333.15 °K (60 °C)), comúnmente se emplea alquitrán de hulla aplicado en caliente, el cual consiste de pintura primaria seguida por una capa de esmalte de alquitrán de hulla, reforzada con una capa de fieltro de fibra de vidrio. Este recubrimiento se protege con una capa final de encalado resistente al agua o con una envoltura de papel "kraft", para el caso de esmaltado en planta.

2.4.2.1. Pintura primaria

Este tipo de pintura consiste de alquitrán de hulla residual negra y aceites de alquitrán de hulla refinado; no debe contener benceno u otros solventes volátiles o tóxicos, debe pasar las pruebas descritas en AWWA C-203, y satisfacer las características de la Tabla 2.9

El esmalte no debe contener asfalto o algún otro derivado del petróleo, además se deberán marcar en sus envases los datos siguientes; Esmalte sólido a base de alquitrán de hulla, temperatura óptima de aplicación, temperatura máxima de calentamiento, tiempo máximo antes de usarlo, resistencia dieléctrica en volts para un espesor de 24.0 mm (3/32 pulg) y nombre del fabricante.

Aplicación de pintura primaria y esmalte

La pintura primaria se puede aplicar con brocha, por aspersion o con maquina viajera, y debe ser uniforme, libre de chorreaduras, goteo, discontinuidades de espesor o cualquier otro defecto que interrumpa dicha uniformidad. Las superficies

pintadas se deben proteger contra la humedad, lluvia, polvo u otra materia extraña durante la aplicación del esmalte.

2.4.2.2. Aplicación de fieltros

Los fieltros, deben estar debidamente secos, con el fin de evitar que durante la instalación se produzcan gasificaciones o vacíos en la capa de esmalte debajo del fieltro.

El fieltro debe ser de un ancho apropiado al diámetro del tubo, uniforme, y aplicarse en espiral y con un traslape no menor de 25.4 mm (1 pulg).

Tabla 2.5 Sistemas recomendados para cada tipo de exposición

CONDICIONES DE EXPOSICION	PREPARACION DE LA SUPERFICIE	PRIMARIO			ACABADO			PROCEDIMIENTO DE APLICACIONES
		RECUBRIMIENTO	No. DE CAPAS	ESPESOR EN MILS POR CAPA SECA	RECUBRIMIENTO	No. DE CAPAS	ESPESOR EN MILS POR CAPA SECA	
Exposición al agua Salada (interior de tanques)	Limpieza chorro de abrasivos acabado metal blanco	RA. 5 "A" Alquitrán de hulla epóxico	2	6-8	No se usa			Aspersión
Exposición del agua Cruda y tratada (interior de tanques)	Limpieza chorro de abrasivos acabado metal blanco	RA-5"A"Alquitrán de hulla epóxico	2	6-8	No se usa			Aspersión
Exposición del agua Potable (interior del tanque de almacenamiento)	Limpieza chorro de abrasivos acabado Metal blanco	RP-7 Vinil epóxico modif. Rp-6	2	1	RA-22 Vinilico alto sólidos	2	3	Aspersión
		RP-6 Epóxico Catalizado	1	2	RA-26 Epóxicos altos sólidos	2	5	

Tabla 2.6 Sistemas recomendados para cada tipo de exposición

CONDICIONES DE EXPOSICION	PREPARACION DE LA SUPERFICIE	PRIMARIO			ACABADO			PROCEDIMIENTO DE APLICACIONES
		RECUBRIMIENTO	No. DE CAPAS	ESPESOR EN MILS POR CAPA SECA	RECUBRIMIENTO	NO. DE CAPAS	ESPESOR EN MILS POR CAPA SECA	
Ambiente seco	Limpieza manual	RP-2 Cromato de zinc	2	1.5	RA-20 Esmalte Alquiládico	2	1.5	Brocha o
		RP-2 Cromato de zinc	2	1.5	RA-24 Fanólico de Aluminio	2	1.5	Aspersión
Ambiente húmedo	Limpieza manual o Limpieza chorro de abrasivo acabado comercial	RP-2 Cromato de Zinc	2	1.5	RA-20 Esmalte alquiládico	2	1.5	Aspersión
	Limpieza chorro de abrasivos acabado a metal blanco	RP-3 Inorg. de zinc Poscurado	1	2-	RA-21 Esmalte Catalizado	2	1.5	
		RP-4 Inorg. de zinc autocurante						aspersión
		"A" base de agua	1	2-3	RA-22 Vinílico de			
	"B" base solvente	1	2-3	Altos sólidos	2	3		

Tabla 2.7 Sistemas recomendados para cada tipo de exposición

CONDICIONES DE EXPOSICION	PREPARACION DE LA SUPERFICIE	PRIMARIO			ACABADO			PROCEDIMIENTO DE APLICACIONES
		RECUBRIMIENTO	No. DE CAPAS	ESPESOR EN MILS POR CAPA SECA	RECUBRIMIENTO	No. DE CAPAS	ESPESOR EN MILS POR CAPA SECA	
Ambiente húmedo y salino	Limpieza chorro de Abrasivos acabado a metal blanco	RP-3 Inorg. de zinc poscurado	1	2-3	RA-21 Epóxico catalizado	2	2	
		RP-4 "A" Inorg. De zinc Autocurante base agua	1	2-3	RA-22 Vínibco do altos sólidos	2	3	Aspersión
		RP-41 "B" Inorp. de zinc autocurante base solvente	1	2-3	RA-26 Epóxico catalizado de altos sólidos	2	5	
Ambiente húmedo con o sin salinidad y gases derivados del azufre	Limpieza chorro de Abrasivosar-abado a metal blanco	RP-3 Inorg. de zinc poscurado	1	2-3	RA-21 Epóxico catalizado			
		RP-4"A" Inorg. de zinc autocuranto base agua	1	2-3	RA-22 Vinilico de altos sólido	2	3	Aspersión
		RP-4 "A" Inorg. de zinc auto curante base solvente	1	2-3	RA-26 Epóxico de altos sólidos	2	5	
		RP-6 Epóxico catalizado.	1	2				

Tabla 2.8 Sistemas recomendados para cada tipo de exposición

CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	PREPARACION DE LA SUPERFICIE	P R I M A R I O			A C A B A D O			PROCEDIMIENTO DE APLICACIONES
		RECUBRIMIENTO	No. DE CAPAS	ESPESOR EN MILS POR CAPA SECA	RECUBRIMIENTO	No. DE CAPAS	ESPESOR EN MILS POR CAPA SECA	
Interior de tuberías	Limpieza chorro de abrasivos acabado a metal blanco	RP-6 Epóxico catalizado	1	2	RA-26 Epóxico catalizado de altos sólidos	2	5	Aspersión

Tabla 2.9 Características del esmalte de Alquitran de Hulla

PRUEBA	ESMALTE TIPO I BAJA TEMPÉRATURA		ESMALTE TIPO II BAJA TEMPÉRATURA	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
Puntos de ablandamiento ASTM D36-64T	220°F	240 °F	220°F	240 °F
Residuos (Cenizas) ASTM D271-64	25%	35%	25%	35%
Finura Paso a través de la malla 200 ASTM D546-55	90%		90%	
Peso específico s 25 ° C ASTM D71-52	1.4	1.6	1.4	1.6
Penetración ASTM 45-56 a 77 ° F 100 g de peso en 5 seg.	5	10	5	10
a 115 ° F 50 g de peso en 5 seg.	12	30	15	55
Prueba de alta temperatura a 160 ° F (ceniza) AWWA C203, Sec.2.8.8.	3/32 pulg.		3/32 pulg.	
Prueba de baja temperatura a 10 °F (agrietamiento) AWWA C203, Sec.2.8.9. a - 20 °F (agrietamiento)	NA	NO NA	NA	NA NO
Prueba do flambeo (calentamiento incipientes) AWWA C203 , Sec.2.8.10 Agrietamiento inicial	0.5 Pulg		0.5 pulg.	
Prueba dE flambeo (después de 2 hr de calentamiento) AWWA C203, Sec.2.8.1 1.				
Agrietamiento inicial Desprendimiento de área	0.3 pulg.	8 pulg.	0.6 pulg.	5 pulg.
Prueba de impacto a 77 °F. Bola de 650 g cach 8 pies AWWA C203 Sec.2.8.13.				
Impacto directo Desprendimiento del área	16 pulg ²		10 pulg ²	
Impacto directo Desprendimiento del área	6 pulg ²		2 pulg ²	
Impacto directo Desprendimiento del área	6 pulg ²		2 pulg ²	
Prueba de disgregamiento AWWA C203, Sec.2.8.12. NA= NO APLICABLE	NO DISGREGA		NO DISGREGA	

3. SELECCIÓN DE TUBERÍA

3.1. GENERALIDADES

La selección de materiales de tubería para cualquier aplicación, 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 de los materiales que satisfagan las demandas del servicio particular.

3.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN

3.2.1. Económico

El criterio económico para la selección de tubería de acero para conducción de agua potable considera dos aspectos:

- Costo de adquisición 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 Figura 3.1.

El costo de la tubería en obras de conducción de agua llega a ser del 60% o más del costo total.

En diámetros pequeños (355.6 mm o menor) el costo de la tubería de acero con respecto a la tubería de asbesto-cemento tiende a ser mayor.

Por el contrario en diámetros mayores (609.6 mm o más) el costo de la tubería de acero tiende a ser igual al de la tubería de asbesto-cemento.

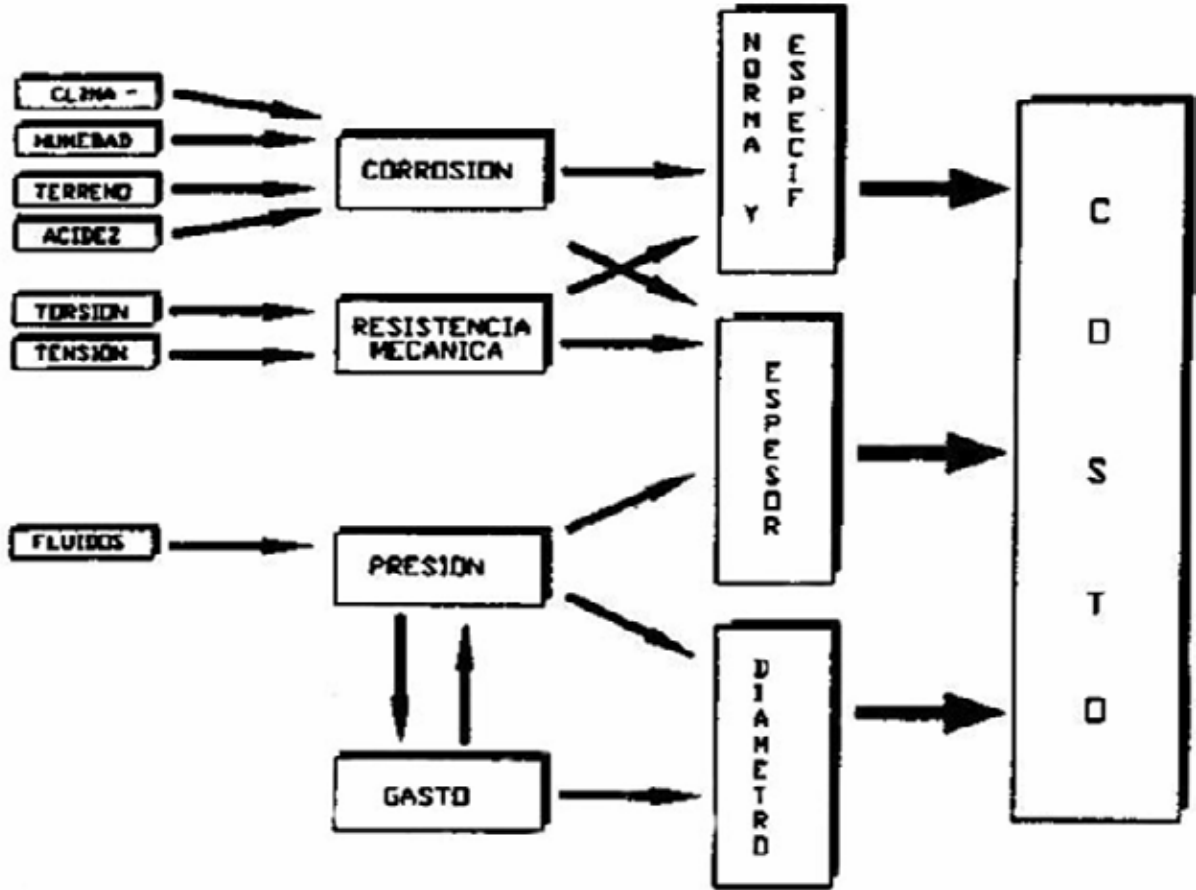


Figura 3.1 Factores que intervienen en el costo de la tubería

El costo de adquisición de la tubería, en función de las normas y especificaciones en el mercado nacional, de manera general se comporta de la siguiente forma:

NORMA	ESPECIFICACIÓN	COSTO	ESPESOR	RESISTENCIA
NMX	B -177-1989	MENOR	MAYOR	MENOR
API	GRADO B	MENOR		-
API	X-42	MENOR		-
API	X-52			-
API	X-65	MAYOR	MENOR	MAYOR

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

La Figura 3.2 muestra las dimensiones de tuberías que se fabrican en México.

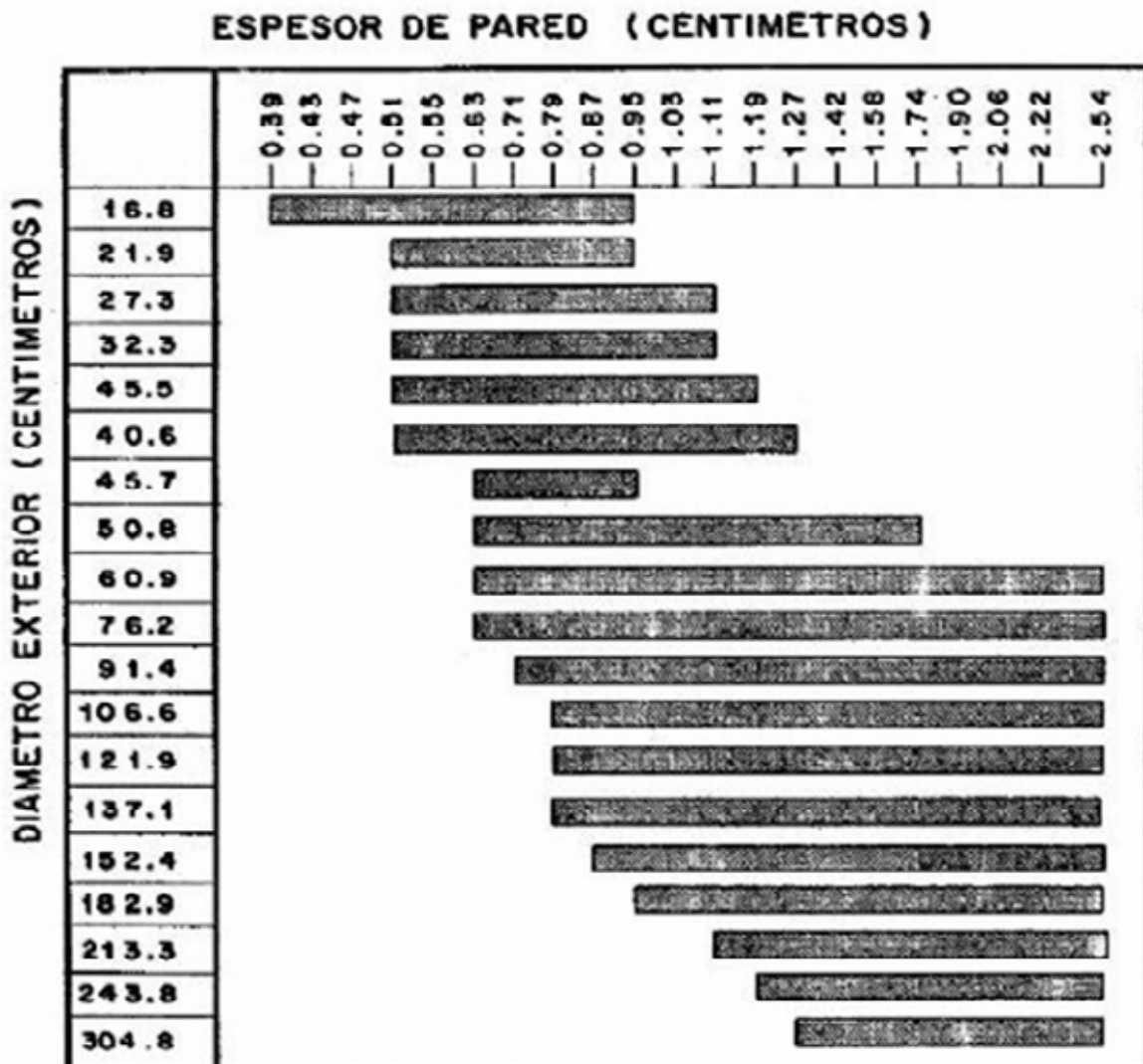
Un aspecto decisivo en la selección de la tubería es el costo de operación y mantenimiento.

En líneas de conducción por gravedad, el costo de operación es bajo pues se reduce la operación de válvulas para control de flujo y de medidores para determinación del volumen manejado.

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:



NOTA: Hasta 91.1 cm. diam. es de fabricación comercial, de 106.6 cm. a 304. 8cm. se rproducen sobre pedido.

Figura 3.2 Dimensiones de tubería fabricada en México

Operación

- Consumo de combustible por bombeo.
- Consumo, de energía eléctrica.
- Mano de obra de bombeo.

Mantenimiento

- Mano de obra de mantenimiento de equipo de bombeo.
- Refaccionamiento, partes de repuesto.
- Reposición de equipo.

3.2.2. Resistencia mecánica

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

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% 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

3.2.3. 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.

Estos tipos de corrosión se describen a detalle en el capítulo 9 de este manual.

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

3.2.3.1. Corrosión interna

Los factores primordiales que influyen en la corrosión son: las características del agua, la temperatura, la 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 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.

3.2.3.2. Corrosión externa

Al igual que el fenómeno de corrosión interna en tuberías de conducción de agua, la corrosión externa dependerá de varios factores (ver 4.1.1), entre los cuales destacan:

- El 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 mecánica, 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).

3.2.4. 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.

3.2.5. Vida útil

La selección de tubería de acero para conducción de agua es hecha en función de su vida útil, es decir, del período en que estará en operación y cubriendo a 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.

Como se mencionó en el inciso 3.1, para determinar el espesor, la norma y la especificación de la tubería a utilizar, se toman en cuenta factores como corrosión, resistencia mecánica, presión, temperatura, etc.

A medida que se incrementa el espesor o mejora 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. Para la determinación del diámetro óptimo de tubería se deberá consultar la Sección de Agua Potable del presente manual.

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 ó trabajar en forma independiente.

La Figura 3.3 muestra un ejemplo ficticio del crecimiento de la demanda y la capacidad de tubería.

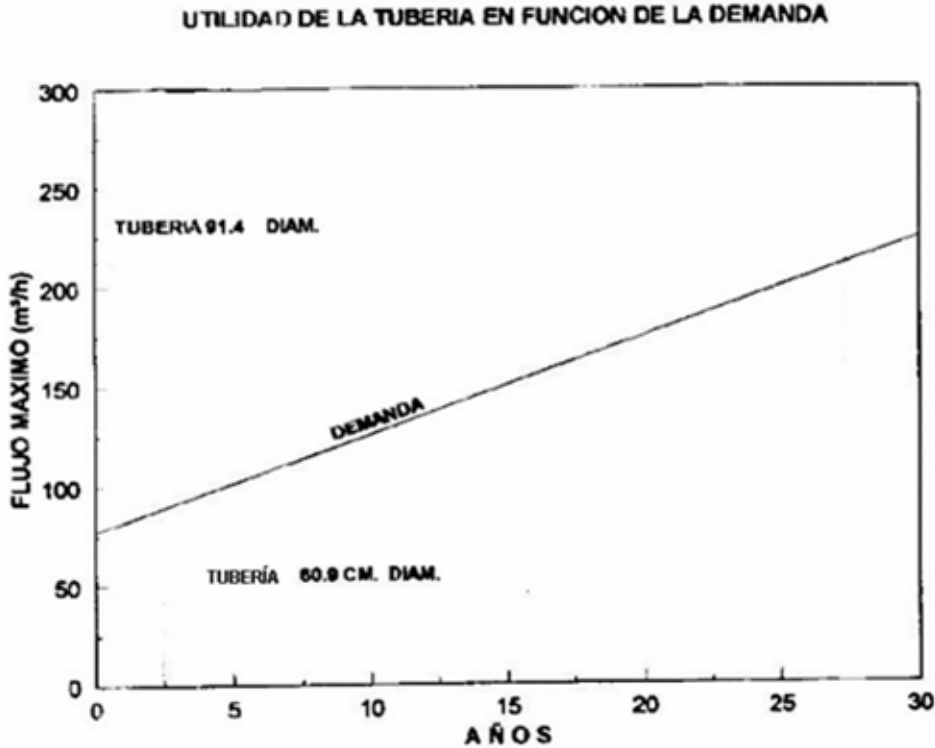


Figura 3.3 Crecimiento de la demanda y capacidad de tubería

4. BASES DE DISEÑO

4.1. GENERALIDADES

En este capítulo se señalan los elementos que conforman las bases de diseño; es decir, la información con la que el proyectista debe contar previamente a la realización de un diseño, así como los criterios y condiciones que se deben satisfacer para reunir los, requisitos de calidad necesarios en el diseño, construcción y operación.

La información previa es aquella que permitirá planear la localización de la línea, sus estructuras complementarias, y su dimensionamiento; por ejemplo: mapas, fotografías aéreas, etc. Los criterios y condiciones aplicables definirán los detalles de ingeniería y las condiciones de seguridad del sistema, como son: esfuerzos permisibles, cargas aplicables, etc.

4.1.1. Información general

Para el diseño de una línea de conducción se requiere de un plano topográfico, mostrando plantas y elevaciones; para lo cual, es necesario definir mediante una selección de alternativas la ruta sobre la que se efectuará dicho levantamiento y para ello el proyectista podrá ayudarse de información ya existente, como:

- a) Mapas de la región, topográficos, hidrográficos, geológicos, etc.
- b) Cartas de uso del suelo, normalmente editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Estas cartas permitirán definir posibles afectaciones sobre el derecho de vía propuesto.
- c) Fotografías aéreas, cuya toma podrá ser conveniente en caso de no contarse con mapas o cartas.

Una vez que el proyectista ha propuesto una ruta para la línea de conducción y ha definido la localización de las instalaciones complementarias, se procede a efectuar el levantamiento topográfico. Es importante señalar que a mayor diámetro se requiere mayor grado de detalle. Asimismo, los planos topográficos deberán contener como mínimo la siguiente información:

- a) Planta y perfil de la línea, con distancias horizontales y verticales.
- b) Localización de cambios de dirección, tanto horizontales como verticales.
- c) Radio de las curvas y longitud de tangentes.
- d) Localización de estructuras existentes y cercanas que pudieran interferir con la línea de proyecto.
- e) Interferencia con límites de propiedad, calles y caminos (al centro de línea de dichos caminos), guarniciones y todos los datos pertinentes que ayuden a definir claramente el derecho de vía de la línea, así como posibles afectaciones.

Para mayor amplitud sobre el terna de información general requerida, ver el Guía para el Manejo, Tratamiento y Disposición de Lodos Residuales de Plantas de Tratamiento, 1ª sección de agua potable y el Sistemas Alternativos de Tratamiento de Aguas Residuales y Lodos Producidos, 1ª sección de Estudios básicos de este manual.

Otro grupo de datos importantes son los relacionados con mecánica de suelos, cuyo levantamiento podrá hacerse paralela o posteriormente al levantamiento topográfico. Entre los estudios de mecánica de suelos que se requerirán están:

- a) Sondeos a lo largo de la ruta de la línea para:
 - 1. Clasificación de suelos.
 - 2. Pruebas de la resistencia del suelo, en el caso de cimentaciones de estructuras y los accesorios que requieran cimentación. Esto dependerá principalmente del diámetro de la línea; a mayor diámetro habrá mayor necesidad de estudios más detallados.
 - 3. Pruebas para definir métodos de excavación, movimientos de tierras, taludes en zanjas, etc.

El número de sondeos dependerá, como se ha mencionado antes, del diámetro de la línea y de la variabilidad de las condiciones del terreno.

Para, mayor amplitud sobre el terna de mecánica de suelos, ver el Sistemas Alternativos de Tratamiento de Aguas Residuales y Lodos Producidos, 3ª sección de Geotécnia de este manual.

Un tercer punto, de particular significancia para las líneas de conducción de acero, es la corrosividad del medio en el cual se instalará la línea. La corrosividad del medio depende del tipo de terreno, de sus características de resistividad eléctrica, de la humedad del ambiente, salinidad, contenido de oxígeno, P.H., actividad orgánica, etc. Dichos factores generalmente sufren variaciones estacionales. Por esta razón los parámetros ya señalados deberán investigarse considerando sus variaciones de una estación del año a otra.

4.2. CONDICIONES DE DISEÑO

El segundo grupo de información que conforma las bases de diseño, corresponde a aquellas condiciones que limitan las acciones que pudieran causar detrimento a las instalaciones. En esta sección se establecerán los criterios relativos a las cargas que actuarán sobre la tubería, y se describirán los diferentes tipos de esfuerzos que producen las cargas actuantes. Con respecto a los esfuerzos permisibles, se ha considerado que resulta de mayor claridad señalar el valor límite en la sección donde se muestra el procedimiento detallado de cálculo de cada tipo de esfuerzo y las combinaciones aplicables.

4.2.1. Presión

La tubería deberá diseñarse tanto por presión interna como externa, esto es, se seleccionará el espesor mínimo de la pared de la tubería, para limitar los esfuerzos circunferenciales de tensión a un cierto nivel permisible.

La presión interna de diseño, no será menor que la máxima presión de operación a la que pueda estar sujeta la tubería durante su vida útil, ni tampoco que la máxima presión en la condición estática más la presión requerida para vencer las pérdidas por fricción y cualquier contrapresión que pudiera presentarse (golpe de ariete). Las Figuras 5.1 y 5.2 (ver capítulo 5) muestran las líneas de gradiente hidráulico y las presiones a las que puedan estar sujetas líneas de gravedad y de bombeo, respectivamente.

La tubería también se debe diseñar, para resistir adecuadamente la presión externa. Se consideran presión externa todas aquellas cargas que son uniformes y actúan radialmente a la superficie exterior del tubo. Asimismo, las tuberías enterradas se diseñarán para resistir la presión provocada por el relleno de tierra, y en el caso de cruces, la presión provocada por la circulación de vehículos en la superficie.

4.2.2. Temperatura

Los cambios de temperatura pueden provocar expansiones o contracciones de la línea que, si no se toman en cuenta adecuadamente, pueden ocasionar fallas en la tubería. La expansión y contracción térmica son más marcadas en tuberías superficiales que en enterradas, por lo que se deberán tomar mayores precauciones con las primeras.

La temperatura de diseño será la máxima temperatura del metal (temperatura máxima de operación). La temperatura de instalación, es la temperatura del medio ambiente en el momento de la instalación (denominada también temperatura de referencia). Para revisar el diseño por temperatura se utilizará el gradiente de temperatura, que es la diferencia entre las temperaturas de diseño y la de instalación.

4.2.3. Efectos dinámicos

Se llaman efectos dinámicos a los esfuerzos y desplazamientos que se producen sobre la tubería por cargas que varían en el tiempo. Por ejemplo, cambios de presión intermitentes, sismos, vibración producida por bombas y equipo rotatorio. Algunos efectos dinámicos se pueden evitar o aliviar, en el caso de bombas; si se espera vibración, es posible insertar conexiones flexibles para aislar las vibraciones de la bomba. En otros casos, no es posible eliminar las causas de cargas dinámicas, como sucede con los sismos, donde necesariamente la tubería tendrá que diseñarse para resistir dichos efectos.

Como recomendación general, siempre que sea posible, el proyectista procurará eliminar los efectos dinámicos, si esto no fuera viable, entonces deberá diseñarse la línea tomando en consideración dichos efectos.

Para efectos de diseño, las cargas dinámicas que deberán tomarse en consideración son las siguientes:

4.2.3.1. Impacto

Las fuerzas de impacto causadas por condiciones externas o internas deberán considerarse en el diseño de los sistemas de tubería. Entre las fuerzas de impacto externas están las cargas ocasionadas por el paso de vehículos o ferrocarriles, y entre las internas, los efectos del golpe de ariete.

4.2.3.2. Viento

Bajo ciertas condiciones, el viento puede llegar a producir vibración de las tuberías. Esto solamente afecta a las tuberías superficiales, en cuyo caso se deberán investigar las condiciones de viento y diseñar para las mismas.

4.2.3.3. Sismo

El sismo se deberá considerar en el diseño de la tubería, de acuerdo con las zonas sísmicas indicadas en el mapa de regionalización de la República Mexicana.

4.2.3.4. Vibración

Los esfuerzos que ocasiona la vibración de la tubería, deberán considerarse en el diseño, y se tomarán medidas correctivas o preventivas para reducir la vibración a límites aceptados por las prácticas de ingeniería.

4.2.4. Efectos del peso

En el diseño de la tubería superficial se deberán considerar las cargas muertas, como son: peso de la tubería y del agua, de los recubrimientos, accesorios y componentes de la misma.

4.3. CRITERIOS DE DISEÑO

4.3.1. Generalidades

Los criterios de diseño, deben cumplir requisitos para un diseño seguro bajo condiciones normales de operación del sistema. Sin embargo, el proyectista debe proporcionar protección razonable, para prevenir daños ocasionados por condiciones externas inusuales, como puede ser el caso de cruces de ríos o pantanos, tubería submarina, zonas de tránsito pesado, o de suelo inestable, etc.

En el capítulo 7 se establecen algunos lineamientos para el diseño de obras especiales, que son aquellas que se aplicarán en las citadas condiciones inusuales. En el capítulo 8 se señalan los fundamentos del diseño de tubería submarina y se describe en forma general el proceso constructivo.

Esta sección de criterios de diseño está dedicada a describir las tolerancias de diseño, valores mínimos de diseño y variaciones permisibles de estos factores, así como criterios de esfuerzo.

4.3.2. Especificación de materiales

Se entiende por especificación de un material a la denominación que indica el servicio para el cual está destinado dicho material. Tal especificación contiene una serie de parámetros clave que señalan las capacidades de un material, además cada una de éstas corresponde a una norma dada. Por ejemplo: una tubería de especificación API 5L X-52 corresponde a una tubería fabricada bajo los requisitos de composición química y propiedades mecánicas relacionadas con la norma API 5L (especificación para tubería de alta resistencia; adicionalmente la denominación X-52 indica que el material tiene esfuerzo de fluencia (F_y) de 52 000 lb/plg² (3662 Kg/cm²).

Solamente podrán emplearse materiales, tubería y accesorios, cuya especificación corresponda, los aceptables para la A.W.W.A, o aquellas que designe la C.N.A. Asimismo, se prohíbe el uso de materiales, cuya especificación no está indicada claramente; y su procedencia sea dudosa o no corresponda a los materiales aceptados.

4.3.3. Condiciones normales de operación

Las condiciones normales de operación corresponden a la máxima presión de operación, es decir, aquella presión que no se ve afectada por sobrepresiones transitorias, como el golpe de ariete. La presión normal no deberá exceder la presión de trabajo especificada para la tubería y sus componentes.

4.3.4. Variaciones de las condiciones normales de operación

Si se esperan variaciones de la presión normal de operación, como las producidas por el golpe de ariete, se deben tomar las medidas de protección adecuadas.

El golpe de ariete en una línea de conducción se produce por un cambio brusco en la velocidad de la corriente, provocado por el paro de las bombas, cierre súbito de válvulas o por bloqueo en el movimiento de la corriente.

Las medidas de protección que se deben de tomar contra la sobrepresión son:

- a) Realizar cálculos para determinar el valor de la sobrepresión que se puede presentar. También se determinará el origen de dichas sobrepresiones.

- b) Revisar la tubería y sus componentes bajo el efecto de la sobrepresión, en cuyo caso se permite que el esfuerzo actuante en la tubería rebase el permisible, pero sin exceder el 75% del esfuerzo de fluencia, como se indica en el capítulo 6.

Por otra, parte, es posible seleccionar e instalar sistemas de control y equipos para aliviar la sobrepresión. En este caso, la tubería y sus componentes se deberán revisar para la presión de trabajo y de acuerdo con el efecto de dichos sistemas de control de sobrepresión.

4.3.5. Corrosión

La corrosión en los tubos de acero se presenta tanto en la superficie interna, ocasionada por la corrosividad del fluido que conduce, como en la externa, producto del medio ambiente que la rodea.

En el caso de corrosión interna, se recomienda efectuar un estudio de velocidades de corrosión, ya que las variaciones de composición del agua pueden resultar en diferentes velocidades de corrosión.

En el caso de corrosión externa, conviene no agregar espesor de acero adicional al determinado por los requisitos de resistencia aplicables. Aquí. Se diseñara un sistema de protección contra la corrosión, que deberá incluir como mínimo la aplicación de recubrimientos anticorrosivos y la instalación de un sistema de protección catódica. La selección de los recubrimientos y el diseño de la protección catódica está descrita en el capítulo 9. Se ha probado que es una mejor práctica y mucho más económico, proteger adecuadamente la tubería contra la corrosión que adicionar espesor de tolerancia por corrosión.

4.3.6. Esfuerzos permisibles

Se ha considerado por facilidad de interpretación, que es más conveniente indicar los valores de esfuerzo permisible para los diferentes tipos de acciones y sus combinaciones en el capítulo 6. "Análisis y Diseño", después de mostrar el procedimiento de cálculo correspondiente para cada caso.

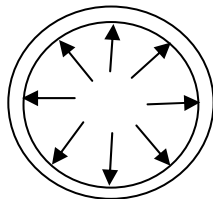
Sin embargo, se describirán los tipos de esfuerzo que actúan en una tubería sujeta a presión y se presentarán los criterios que norman los esfuerzos permisibles.

Desde la introducción de la tubería de acero para la construcción de líneas de conducción de agua potable, ha existido una evolución en la calidad de los materiales y en el proceso de fabricación y unión de los tubos. Originalmente se usaron los remaches para formar los tubos, en la actualidad, es la soldadura el proceso de unión más empleado. Asimismo, los procesos de fabricación del acero para tubos introdujeron mejoras que han elevado la calidad de dichos aceros.

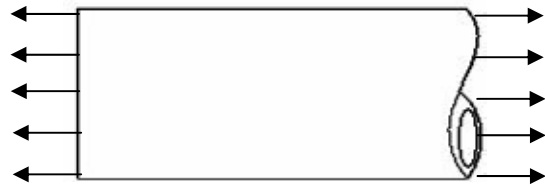
Esta evolución ha permitido que los factores de seguridad sean menos conservadores. Anteriormente a la difusión del proceso de soldadura, el factor de seguridad era comúnmente de cuatro a uno, con base en la resistencia a la tensión. Con la aceptación del proceso de soldadura se aceptó también el concepto de usar el 50% del esfuerzo de fluencia.

Los esfuerzos que actúan sobre un tubo de pared delgada son principalmente de dos tipos: esfuerzo circunferencial y esfuerzo longitudinal. Se considera que un tubo es de pared delgada cuando el espesor de pared del tubo no es mayor que 1/10 del radio interior del mismo tubo.

El esfuerzo circunferencial debido a la presión interna, es un esfuerzo de tensión que actúa en la dirección transversal del eje longitudinal del mismo. El esfuerzo longitudinal actúa en la dirección paralela al eje longitudinal del tubo. La Figura 4.1 muestra la situación de dichos esfuerzos. El esfuerzo circunferencial se debe a los esfuerzos de presión en caso de que la presión sea externa, el sentido será opuesto al señalado en la Figura 4.1. Los esfuerzos longitudinales se producen por varias causas, la presión es una de ellas, pero también están los esfuerzos de flexión por peso propio y del fluido, así como la expansión o contracción provocada por cambios de temperatura. Es por esta razón que el proceso de diseño incluye la combinación de varios tipos de carga, para verificar el comportamiento de la tubería cuando las condiciones de trabajo propician la adición de esfuerzos.



Esfuerzo Circunferencial



Esfuerzo Longitudinal

Figura 4.1

5. ACCIONES

5.1. GENERALIDADES

Las acciones que generalmente actúan en una tubería de conducción de agua potable pueden clasificarse en internas y externas.

En este manual se considerarán como únicas acciones internas la presión interna de diseño, el golpe de ariete y la fuerza provocada por los cambios de dirección. En tanto que las acciones externas se estudiarán dependiendo de si afectan a las tuberías enterradas o a las superficiales. Las acciones externas que actúan en tuberías enterradas normalmente se limitan a las cargas muertas debido al peso del relleno, carga viva por tránsito de vehículos y ferrocarriles, maquinaria, equipo pesado y sismo. Las acciones externas que se presentan en una tubería superficial son: carga muerta debida al peso propio del tubo, agua, accesorios, cambios de temperatura, sismo y viento.

5.2. ACCIONES INTERNAS

5.2.1. Presión de operación

La presión interna utilizada en el diseño, será aquella a la que la tubería estará sujeta durante su vida útil. En una línea de conducción por gravedad, la presión se mide por la distancia entre el centro de la sección transversal de la tubería y la línea de gradiente hidráulico. Si existen válvulas en la línea, la presión máxima de diseño de la tubería debe medirse por la distancia entre el centro de la sección transversal de la tubería y la elevación de la línea estática con las válvulas cerradas. En una Hiena de descarga por bombeo, la presión interna se mide por la distancia del centro de la sección transversal de la tubería a la línea de gradiente hidráulico, creada por la operación de bombeo. En la determinación de la presión de diseño se debe considerar la caída de presión a la descarga y las pérdidas provocadas por la fricción. Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran los perfiles de gradiente hidráulico para flujos por gravedad y bombeo.

5.2.2. Golpe de ariete

El golpe de ariete es un cambio súbito de presión, ya sea arriba o abajo de la presión normal, que se produce por una variación brusca de la velocidad del flujo en una tubería. Cada vez que la velocidad del flujo cambia, ya sea en aumento o en decremento, se origina el golpe de ariete.

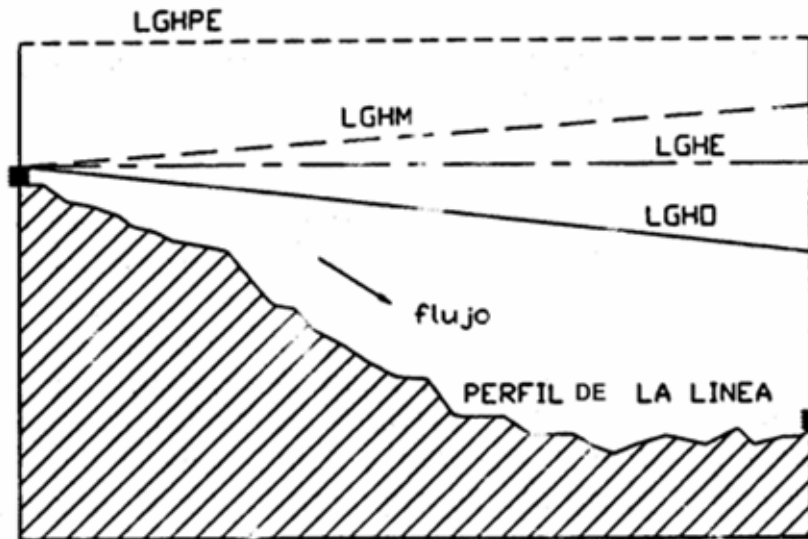


Figura 5.1 Relación de varios cargos o presiones para La selección de (a presión de diseño flujo por gravedad)

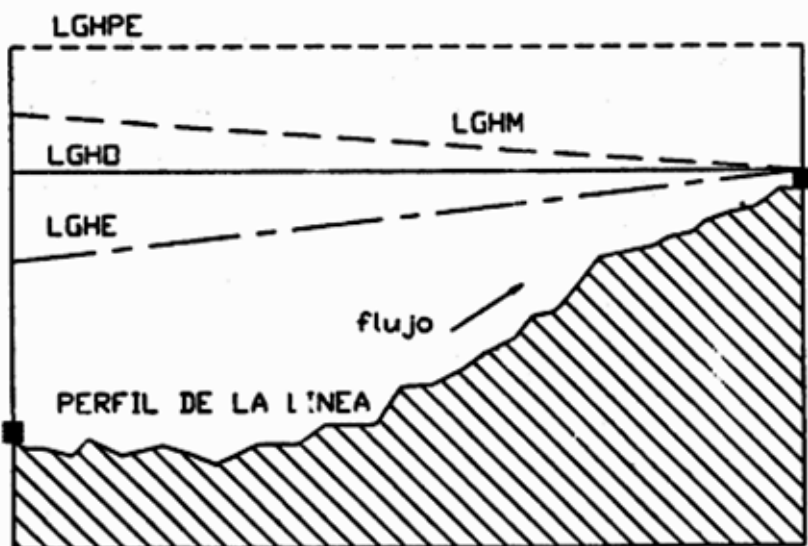


Figura 5.2 Relación de varias cargos o presiones para la selección de la presión de diseño (flujo por bombeo)

- LGHPE: Línea de Gradiente Hidráulico de Prueba Estática
- LGHM: Línea de Gradiente Hidráulico como Máximo
- LGHE: Línea de Gradiente Hidráulico Estático
- LGHO. Línea de Gradiente Hidráulico de Operación

El aumento en la presión debido a un cierre instantáneo de una válvula, depende de las velocidades del fluido y de la onda de presión (celeridad).

$$P = p_{av} \tag{5.1}$$

donde:

- P es el aumento de presión (Pa)
- ρ es la densidad relativa del agua (1,000.30 Ns²/m⁴)
- a es la celeridad (m/s)
- v es la velocidad del agua (m/s)

Para tubería de acero, con relación $d_i/t \leq 100$ la celeridad se calcula con la siguiente expresión.

$$a = \frac{1.439}{\sqrt{1 + \frac{1}{100} \left(\frac{d_i}{t} \right)}} \quad (5.2)$$

donde:

- d_i es el diámetro interior (m)
- t es el espesor de pared (m)

Cuando se desee obtener la celeridad para diámetros grandes (relaciones d_i/t mayores de 100), se puede utilizar la Tabla 5.1.

Al cerrar una válvula en una tubería, el tiempo que tarda la onda de presión en viajar toda la longitud de la tubería y volver hasta la válvula es:

$$T = \frac{2L}{a} \quad (5.3)$$

donde:

- T es el tiempo (s)
- L es la longitud de la tubería (m)
- a es la celeridad (m/s)

Para tiempos de cierre de válvula menores de $2L/a$, se considerará que la presión aumenta, tal y como si se tratara de un cierre instantáneo de la válvula.

5.2.3. Fuerza debida a los cambios de dirección

En los cambios de dirección de una tubería, se presentan fuerzas cuya magnitud está en función de la presión interna, el área de la sección transversal de la tubería y el ángulo de deflexión (Figura 5.3):

$$F_r = (2AP_i) \text{sen} \left(\frac{\Delta}{2} \right) \quad (5.4)$$

donde:

- F_r es la fuerza debida al cambio de dirección (N)

- P_i es la presión interna máxima (MPa)
- A es la área de la sección transversal de la tubería (mm^2)
- Δ es el ángulo de deflexión del codo (rad)

5.3. ACCIONES EXTERNAS EN TUBERÍA ENTERRADA

5.3.1. Carga muerta debida al peso del relleno

La carga transmitida a una tubería enterrada varía dependiendo del ancho y profundidad de la zanja, debido a que la fricción de las paredes de la zanja afectan la carga resultante. Para su determinación, las tuberías se clasifican en dos tipos: tuberías en zanja y tuberías en terraplén (Figura 5.4).

a) Tuberías en zanja.

La carga sobre la tubería se calculará de acuerdo a la siguiente expresión.

$$W_c = C_d \gamma d_e B_d \quad (5.5)$$

donde:

- W_c es la carga vertical sobre la tubería, por unidad de longitud (N/m)
- C_d es el coeficiente de carga, que depende de la relación h_r/B_d , del coeficiente de fricción interna de relleno y del coeficiente de fricción entre el relleno y las paredes de la zanja (Figura 5.5)
- h_r es la altura de relleno a partir del lomo superior (m)
- d_e es el diámetro exterior de la tubería (m)
- γ es la densidad del relleno (N/m^3)
- B_d es el ancho de la zanja, medida en el lomo superior de la tubería (m)

b) Tuberías en terraplén.

Una tubería en terraplén se define como aquella que se deposita en una superficie firme cubierta por un montículo de tierra. Si el lomo superior de la tubería se proyecta sobre el nivel original del terreno, se conoce como proyección positiva; pero si el lomo superior de la tubería se encuentra abajo del nivel natural del terreno, será entonces una proyección negativa; aun más, si el lomo superior de la tubería se encuentra a nivel con el terreno original, se tratará de una proyección nula. Para cualquiera de los tres casos anteriores (ver Figura 5.4), la carga por unidad de longitud se calcula como sigue:

$$W_c = \gamma h_r d_e \quad (5.6)$$

donde: W_c , γ , h_r , d_e , corresponden a los parámetros de tuberías en trincheras.

5.3.2. Carga viva por tránsito de vehículos en la superficie

Para la determinación de la carga sobre la tubería, causada por la circulación de vehículos en la superficie, se consideran cargas puntuales que se transmiten a la tubería, dependiendo de la profundidad h . La teoría elástica de Boussinesq es usada para el cálculo de esta presión:

$$P_H = \left(\frac{3Ph_r^3}{2\pi(h_r^2 + X^2)^{5/2}} \right) I_c \quad (5.7)$$

donde:

- P_H es la presión en la tubería (Pa)
- P es la fuerza puntual en la superficie (N)
- h_r es la altura de relleno (m)
- X es la distancia horizontal a la carga puntual (m)
- I_c es el factor de impacto. Para pavimentos rígidos será igual a 1.0, para terracerías 1.5 y para pavimentos flexibles 2.0,

Tabla 5.1 Celeridad

Diámetro /espesor (d/t)	Velocidad de onda (a) m /seg
100	1006
120	957
140	917
160	881
180	847
200	820
250	759
300	710
350	670
400	634

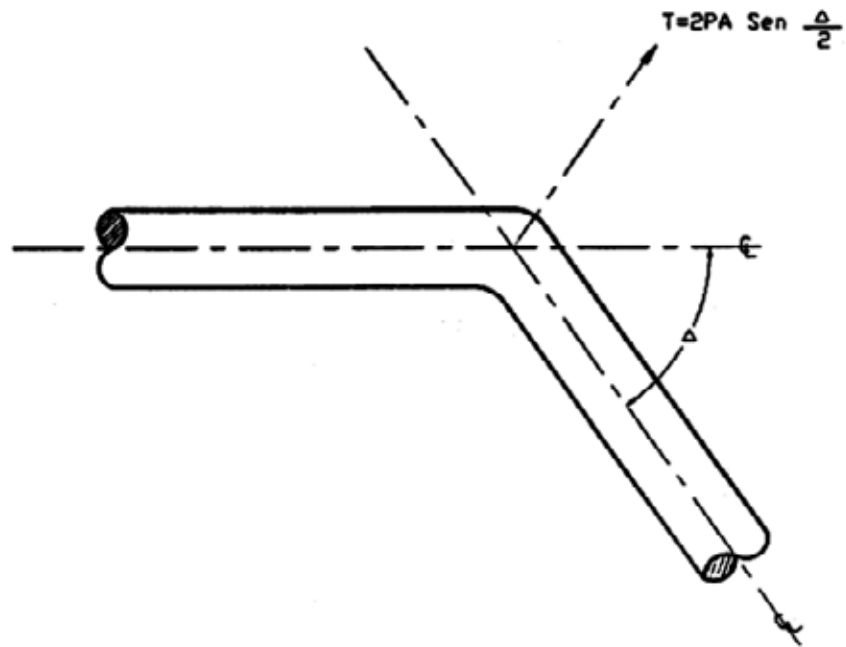


Figura 5.3 Presión en cambio de dirección

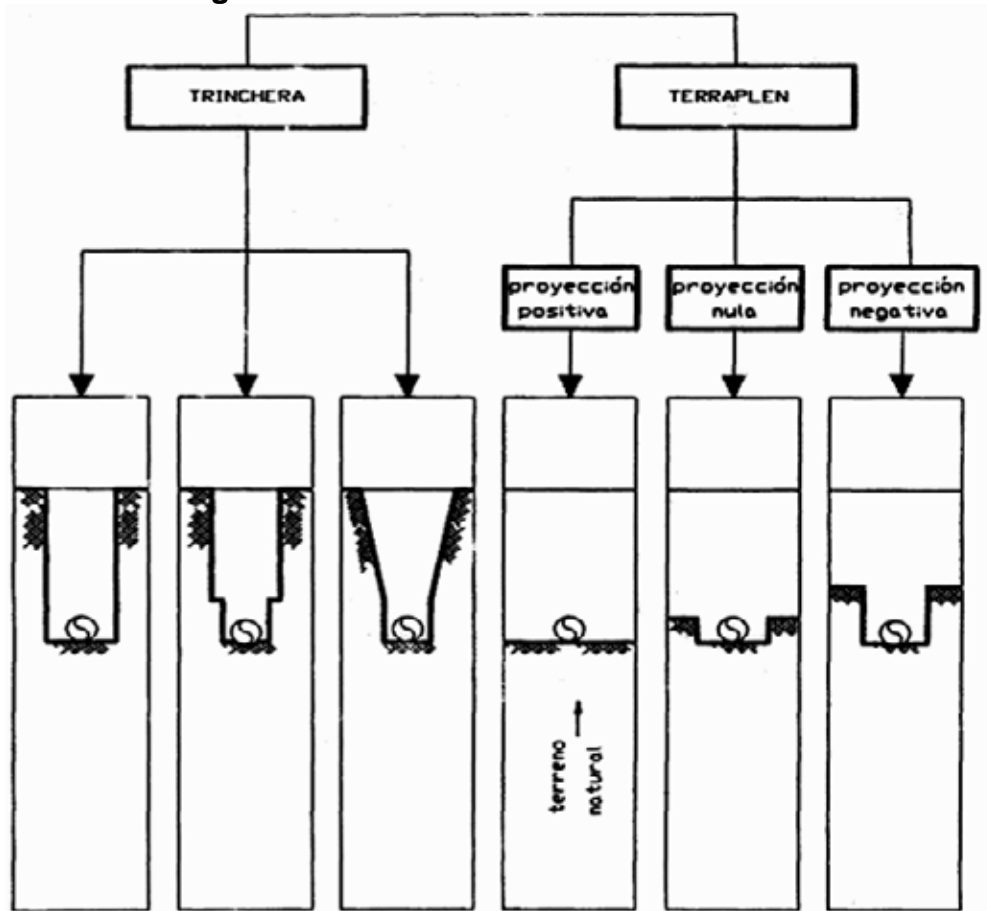
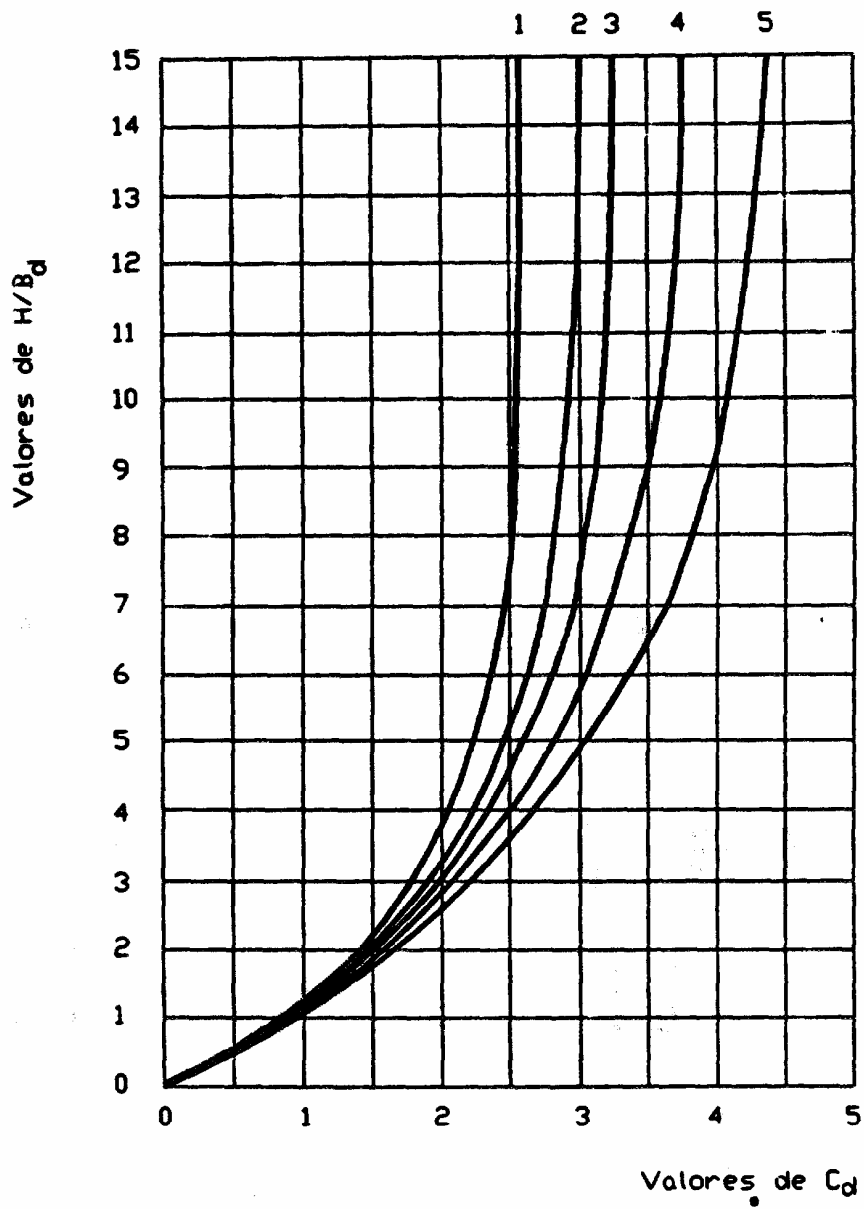


Figura 5.4 Clasificación de tuberías enterradas



1.- Materiales granulares sin cohesión

2.- Arena y grava

3.- Suelo vegetal saturado

4.- Arcilla

5.- Arcilla saturada

Figura 5.5 Curvas para calcular el coeficiente de carga C_d

Para obtener la carga por unidad de longitud, se multiplica la presión en el tubo por el diámetro del tubo:

$$W_L = P_H d_e \quad (5.8)$$

donde:

- W_L es la fuerza por unidad a la profundidad h (N/m)
- P_H es la presión en la tubería (Pa)
- d_e es el diámetro exterior del tubo (m)

para efectos de diseño, se pueden considerar las siguientes cargas puntuales en la superficie:

Los valores típicos de cargas puntuales para ruedas de vehículo varían entre 66,724.50 N y 88,966 N. Para un camión HS-20 se consideran dos cargas puntuales de 71,777 N, cada una separada 1.83 m.

5.3.3. Carga viva por tránsito de ferrocarril en la superficie

Para la determinación de la carga sobre la tubería, causada por la circulación de ferrocarriles en la superficie, se considera un área cargada uniformemente, la cual se transmite a la tubería dependiendo de la profundidad.

La intensidad del esfuerzo, a cualquier profundidad bajo una área cargada en la superficie, puede evaluarse asumiendo que el área cargada se compone de cargas puntuales y sumando el esfuerzo debido a cada carga. Newmark desarrollo un procedimiento para evaluar el esfuerzo vertical bajo una esquina de un área rectangular cargada uniformemente. En la industria se ha reconocido y aceptado la utilización de dicho procedimiento, para el cálculo de la carga por tránsito de ferrocarriles en la superficie. Primero se divide el área cargada en cuatro rectángulos iguales. Se calcula la relación A/h_r y B/h_r , donde A y B son la longitud y el ancho de un rectángulo, y se obtiene su correspondiente factor de influencia para ese rectángulo particular, multiplicándolo por la carga en la superficie. Finalmente, se suman los dos esfuerzos debido a cada rectángulo. La presión de la tubería deberá multiplicarse por su correspondiente factor de impacto.

Con base en lo anterior, la presión en la tubería originada por el paso de un ferrocarril, se calcula:

$$P_H = 4C_T P_s I_c \quad (5.9)$$

donde:

- P_H es la presión en la tubería (Pa)
- C_T es el coeficiente de influencia para áreas rectangulares (Tabla 5.2)
- P_s es la carga por unidad de área en la superficie (Pa)
- I_c es el factor de impacto (adim)

$$I_c = \left(\frac{4C_T P_s}{W_v + W_c + 4C_T P_s} \right) + 1 \quad (5.10)$$

donde:

W_v es el peso de la vía, generalmente 5,590 Pa

W_c es el peso del relleno (Pa)

Para obtener la carga por unidad de longitud, se multiplica la presión por el diámetro del tubo.

$$W_L = P_H d_e \quad (5.11)$$

donde: W_L , P_H y d_e corresponden a lo indicado en 5.3.2.

Para el diseño se considerará el peso de una locomotora Cooper E-80, la cual tiene un esfuerzo uniformemente distribuido de 96,743 Pa. El área cargada que se debe considerar será el área en planta de la locomotora, 6.1 m por 2.42 m (14.76 m²)

La Tabla 5.3 muestra valores de carga viva para cruces con caminos y vías de ferrocarril de acuerdo con la profundidad de la tubería, propuestos por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials); estos valores que se indican, incluyen un factor de impacto del 50%.

5.3.4. Carga viva por tránsito de maquinaria y equipo pesado

Para la determinación de la carga viva sobre la tubería, causada por la circulación de maquinaria y equipo pesado, se considera un área cargada uniformemente en la superficie. Se deberá definir un área de contacto de la llanta, así como su carga.

Tabla 5.2 Coeficientes de influencia para áreas rectangulares

m=A/H o n=B/H	n=B/H o m=A/H								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	0.005	0.009	0.013	0.017	0.020	0.022	0.024	0.026	0.027
0.2	0.009	0.018	0.026	0.033	0.039	0.043	0.047	0.050	0.053
0.3	0.013	0.026	0.037	0.047	0.056	0.063	0.069	0.073	0.077
0.4	0.017	0.033	0.047	0.060	0.071	0.080	0.087	0.093	0.098
0.5	0.020	0.039	0.056	0.071	0.084	0.095	0.103	0.110	0.116
0.6	0.022	0.043	0.063	0.080	0.095	0.107	0.117	0.125	0.131
0.7	0.024	0.047	0.069	0.087	0.103	0.117	0.128	0.137	0.144
0.8	0.026	0.050	0.073	0.093	0.110	0.125	0.137	0.146	0.154
0.9	0.027	0.053	0.077	0.098	0.116	0.131	0.144	0.154	0.162
1.0	0.028	0.055	0.079	0.101	0.120	0.136	0.149	0.160	0.168
1.2	0.029	0.057	0.083	0.106	0.126	0.143	0.157	0.168	0.178
1.5	0.030	0.059	0.086	0.110	0.131	0.149	0.164	0.176	0.186
2.0	0.031	0.061	0.089	0.113	0.135	0.153	0.169	0.181	0.192
2.5	0.031	0.062	0.090	0.115	0.137	0.155	0.170	0.183	0.194
3.0	0.032	0.062	0.090	0.115	0.137	0.156	0.171	0.184	0.195
5.0	0.32	0.062	0.090	0.115	0.137	0.156	0.172	0.185	0.196
10.0	0.032	0.062	0.090	0.115	0.137	0.156	0.172	0.185	0.196
-	0.032	0.062	0.090	0.115	0.137	0.156	0.172	0.185	0.196
	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	10.0	-
0.1	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.032	0.032	0.032
0.2	0.055	0.057	0.059	0.061	0.062	0.062	0.062	0.062	0.062
0.3	0.079	0.083	0.086	0.089	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090
0.4	0.101	0.106	0.110	0.113	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115
0.5	0.120	0.126	0.131	0.135	0.137	0.137	0.137	0.137	0.137
0.6	0.136	0.143	0.149	0.153	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156
0.7	0.149	0.157	0.164	0.169	0.170	0.172	0.172	0.172	0.172
0.8	0.160	0.168	0.176	0.181	0.183	0.185	0.185	0.185	0.185
0.9	0.168	0.178	0.186	0.192	0.194	0.196	0.196	0.196	0.196
1.0	0.175	0.185	0.193	0.200	0.202	0.204	0.205	0.205	0.205

Tabla 5.2 Coeficientes de influencia para áreas rectangulares (continuación)

1.2	0.185	0.196	0.205	0.212	0.215	0.217	0.218	0.218	0.218
1.5	0.193	0.205	0.215	0.223	0.226	0.229	0.230	0.230	0.230
2.0	0.200	0.212	0.223	0.223	0.236	0.239	0.239	0.240	0.240
2.5	0.202	0.215	0.226	0.236	0.240	0.244	0.244	0.244	0.244
3.0	0.203	0.216	0.228	0.238	0.242	0.246	0.246	0.247	0.247
5.0	0.204	0.217	0.229	0.239	0.244	0.249	0.249	0.249	0.249
10.0	0.205	0.218	0.230	0.240	0.244	0.249	0.249	0.250	0.250
-	0.205	0.218	0.230	0.240	0.244	0.249	0.249	0.250	0.250

Utilizando el criterio indicado en 5.3.3, se puede decir que la presión en la tubería, producida por el paso de una maquinaria o equipo pesado, se calcula:

$$P_H = 4C_T P_s \quad (5.12)$$

$$W_L = P_H d_e \quad (5.13)$$

donde: P_H , P_s , W_L y d_e corresponden a lo indicado en 5.3.3.

5.3.5. Sismo

Para tuberías enterradas, aunque se encuentren protegidas de la acción de las fuerzas de inercia producto de las aceleraciones sísmicas, son afectadas directamente por las fuerzas de arrastre del terreno, al imprimirles esfuerzos y deformaciones locales, además de desplazamiento y curvaturas.

Las distorsiones del terreno son ocasionadas principalmente por las siguientes acciones:

- a) Propagación de las ondas sísmicas
- b) desplazamientos permanentes originados por licuación de suelos (ver referencia 9)
- c) Falla del terreno asociado a deslizamiento de tierras
- d) Cruzamiento de fallas geológicas activas.

Los desplazamientos permanentes, originados por licuación de suelos, son de los efectos que causan mayor daño a las tuberías enterradas, localizadas en áreas saturadas. Tal es el caso de las zonas costeras que se encuentran en lugares sísmicos. Este mecanismo de falla está asociado al fenómeno de licuación de suelos granulares, sometidos a acciones sísmicas. En estas condiciones, cuando la topografía es propicia, se presentan corrimientos masivos de terreno que arrastran a las tuberías enterradas.

Los daños causados por fallas del terreno, asociados a deslizamientos de tierra, están relacionados con las características topográficas y de resistencia al esfuerzo cortante del terreno.

En cruces con fallas geológicas activas, los daños están asociados a deslizamientos de terreno natural y dependen de la actividad de dichas fallas.

La propagación de ondas sísmicas a través del suelo, provoca efectos de inercia que en los métodos de análisis se consideran despreciables en comparación con los movimientos relativos de dos puntos cualesquiera del suelo situados a lo largo de la trayectoria de las ondas sísmicas. Estos movimientos relativos se deben a que en cada instante los desplazamientos de estos dos puntos tienen amplitudes diferentes,

ya que conforme el sismo se propaga, la historia de los desplazamientos va sufriendo alteraciones ocasionadas por los siguientes factores:

- a) El sismo se compone de diferentes tipos de onda, cada una de las cuales viaja a distinta velocidad; estas son:
- de cuerpo (ondas de compresión y cortante)
 - superficiales (ondas de Rayleigh y ondas Love)

Por la imposibilidad de separar los distintos tipos de ondas que conforman el movimiento, se considera conservadoramente que el sismo se compone únicamente de ondas de corte, por ser estas las que ocasionan mayores efectos, aunque e tuberías poco profundas pueden ser importantes también los debidos a ondas superficiales.

- b) Al propagarse las ondas, estas se atenúan por el efecto de distancia a la fuente y por absorción viscosa en el suelo.
- c) Al viajar las ondas a través de medios que no son perfectamente homogéneos e isótropos, sufren direcciones (e parte ocasionada por la tubería misma), que alteran la forma y composición de las ondas sísmicas. En particular al pasar las ondas por una interfase de suelo duro a blando, se presentan amplificaciones importantes en ellas.

Para alimentar con datos reales a los modelos matemáticos empleados en el análisis, se debe recopilar y procesar la información existente sobre los sismos ocurridos en la zona donde se encuentra localizada la tubería, como son: fechas, ubicación del acelerografo, magnitud, en la escala de Richter (M), intensidad máxima, en la escala de Mercalli modificada (I), orientación de la traza del registro, y la aceleración, (A_{max}), velocidad máxima (V_{max}), y desplazamiento máximo del suelo (D_{max}).

Debido a que el parámetro más común para caracterizar un sismo es la aceleración máxima del suelo (A_{max}), es necesario determinarla de acuerdo con los registros existentes del lugar o a la sección 5.4.3 y a la Tabla 5.4.

Los valores de la aceleración máxima del terreno (A_{max}), están implícitos en el espectro de diseño y corresponden al producto de a_0 multiplicando por la aceleración de la gravedad.

Para efectuar el análisis sísmico de tuberías enterradas se pueden usar dos métodos: el simplificado y el dinámico. El primero, se aplica a tuberías rectas continuas o las formadas por segmentos rectos unidos por medio de juntas flexibles, el segundo, se puede aplicar para los casos anteriores y cualquier configuración geométrica de la tubería, siempre y cuando se conozcan los parámetros necesarios para realizarlo.

En este manual sólo se describe el método simplificado, el cual para su aplicación requiere del cálculo de la deformación axial y curvatura máxima del terreno.

Existen varios criterios para estimar el movimiento relativo máximo entre los puntos. El más simple señala que la cota superior de la deformación unitaria máxima, ε_{\max} y la curvatura del terreno máxima φ_{\max} que se produce durante un sismo esta dada por:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{V_{\max}}{C} \quad (5.14)$$

$$\varphi_{\max} = \frac{A_{\max}}{C^2} \quad (5.15)$$

donde: V_{\max} y A_{\max} son la velocidad y aceleración máximas, del terreno durante el sismo y C es la velocidad aparente de propagación de las ondas sísmicas.

Tabla 5.3 Efecto de carga viva de acuerdo a la AASHTO

Carreteras (HS 20)		Ferrocarril (E-80)	
Altura de relleno (m)	Carga (Pa)	Altura de relleno (m)	Carga (Pa)
0.305	86 191	0.610	181 953
0.610	38 305	1.524	1 14 914
0.914	28 733	2.438	76 610
1.220	19 152	3.048	52 672
1.524	11 974	3.658	38 305
1.829	9 581	4.572	28 733
2.134	8 424	6.096	14 366
2.438	4 786	9.144	4 786

Tabla 5.4 Espectros de diseño sísmico (Ref. 5)

Zona sísmica	Tipo de suelo	a_0 *	c	T_a (s)	T_b (s)	r
A	1	0.02	0.08	0.2	0.6	1/2
	11	0.04	0.16	0.3	1.5	2/3
	111	0.05	0.20	0.6	2.9	1
B	1	0.04	0.14	0.2	0.6	1/2
	11	0.08	0.30	0.3	1.5	2/3
	111	0.10	0.36	0.6	2.9	1
C	1	0.36	0.36	0.0	0.6	1/2
	11	0.64	0.64	0.0	1.4	2/3
	111	0.64	0.64	0.0	1.9	1
	1	0.50	0.50	0.0	0.6	1/2
	11	0.86	0.86	0.0	1.2	2/3
	111	0.86	0.86	0.0	1.7	1

NOTA

*El valor de la aceleración sísmico a_0 y el coeficiente sísmico c deben multiplicarse por 1.5 de acuerdo a lo indicado en el manual de diseño sísmico (Ref. 5) ya que pertenece a estructuras del grupo A como es el caso de Líneas de Conducción de Agua Potable.

Para el caso de ondas sísmicas de compresión (llamadas ondas principales P o longitudinales), se tiene que la deformación axial, ε_P , y la curvatura, φ_P se calculan con las ecuaciones siguientes:

$$\varepsilon_P = \frac{V_{\max}}{V_P} \text{sen}^2 \alpha \quad (5.16)$$

$$\varphi_P = \frac{A_{\max}}{V_P^2} \text{sen}^2 \alpha \cos \alpha \quad (5.16)$$

donde:

α es el ángulo de incidencia respecto al eje perpendicular a la tubería (rad)

V_P es la velocidad de propagación de las ondas P en el medio de desplante de la tubería (m/s)

A_{\max} es la aceleración máxima del terreno (m/s²)

V_{\max} es la velocidad máxima del terreno, ambas en la dirección de la incidencia (m/s)

El valor máximo de ε_P ocurre para $\alpha = \pi/2$ rad (90°), es decir, cuando la onda viaja en la dirección del tubo. Su valor se determina con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_{P\max} = \frac{V_{\max}}{V_P} \quad (5.18)$$

El máximo de φ_P ocurre cuando $\alpha = 0.9547$ rad (54.7°) y su valor se determina con la siguiente fórmula:

$$\varphi_{P\max} = \frac{1}{2.6} \frac{A_{\max}}{V_P^2} \quad (5.1)$$

Por otra parte, para ondas de cortante (llamadas ondas secundarias S), se tiene:

$$\varepsilon_S = \frac{V_{\max}}{V_S} (\cos \alpha \text{sen} \alpha) \quad (5.20)$$

$$\varphi_S = \frac{A_{\max}}{V_S^2} (\text{sen}^3 \alpha) \quad (5.21)$$

donde:

V_S es la velocidad de propagación de las ondas S (m/s)

El valor máximo de ε_s ocurre para $\alpha = \pi/4$ rad (45°), y su valor se determina con la siguiente fórmula:

$$e_{S_{\max}} = \frac{V_{\max}}{2V_s} \quad (5.22)$$

El máximo de ϕ_s ocurre para $\alpha = \pi/2$ rad (90°), y su valor es:

$$\phi_{S_{\max}} = \frac{V_{\max}}{V_s^2} \quad (5.23)$$

Procedimiento de análisis para el método simplificado.

1. Seleccionar el periodo de recurrencia T y del sismo; para acueductos se recomienda tomar 100 años o más.
2. Calcular los valores esperados de la aceleración y velocidad máxima horizontales del terreno, A_{\max} en (m/s^2) y V_{\max} en (m/s), respectivamente, con las siguientes ecuaciones, en las que T se da en años.

- a) Para suelo blando, si $T \geq 2$ años:

$$A_{\max} = 0.254T^{0.37} \quad (5.24)$$

$$V_{\max} = 0.076T^{0.37} \quad (5.25)$$

- b) Para suelo duro, si $T \geq 2.5$ años:

$$A_{\max} = 0.162T^{0.37} \quad (5.26)$$

$$V_{\max} = 0.044T^{0.37} \quad (5.27)$$

Los incisos a y b se aplican solo para zonas del Distrito Federal, para otra zona se aplicaran los espectros de diseño de acuerdo a la sección 5.4.3 y a las Tablas 5.4 y 5.10, para determinar la aceleración y velocidad máximas del terreno.

- 3 Determinar mediante prospección sísmica la velocidad de propagación de las ondas de corte, V_s , en el suelo del desplante de la tubería. Un valor conservador de dicha velocidad se puede obtener, si mediante alguna prueba estática se determina el valor módulo de rigidez del suelo al cortante G, con la ecuación:

$$V_s' = \sqrt{\frac{G}{\rho_s}} \quad (5.28)$$

donde. ρ_s es la densidad especifica del suelo (kg/m^3)

Algunos valores indicativos son:

$V'_s = 35 \text{ m/s}$, en suelo sumamente blando como en el centro de la Cd. de México.

$V'_s = 170 \text{ m/s}$, en suelo blando.

$V'_s = 410 \text{ m/s}$, en suelos mediantemente compactos.

$V'_s = 710 \text{ m/s}$, en suelo firme o roca fracturada.

Calcular la velocidad aparente de propagación del sismo en dirección horizontal:

$$V_s = \frac{V'_s}{0.7} \quad (5.29)$$

- 4 Calcular la deformación que en dirección axial inducirá en la tubería el sismo de diseño, mediante

$$\varepsilon' = \frac{V_{\max}}{V_s} + \left(\frac{A_{\max}}{V_s^2} \right) \left(\frac{d_e}{2} \right) \quad (5.30)$$

donde:

ε' es la deformación unitaria

V_{\max} es la velocidad máxima del terreno (m/s)

A_{\max} es la aceleración del terreno (m/s^2)

V_s es la velocidad aparente de propagación de las ondas de cortante (m/s)

d_e es el diámetro exterior de la tubería

- 5 Calcular los esfuerzos máximos de flexión y axial.

$$\sigma_{a_{\max}} = \pm \frac{E V_{\max}}{V_p} \quad (5.31)$$

$$\sigma_{f_{\max}} = \pm \frac{E A_{\max} d_e}{5.2 V_p^2} \quad (5.32)$$

donde:

E es el modulo de elasticidad del tubo (kg/cm^2)

$\sigma_{a_{\max}}$ es el esfuerzo axial máximo debido a ondas de compresión (kg/cm^2)

$\sigma_{f_{\max}}$ es el esfuerzo de flexion máximo (kg/cm^2)

Si las ondas sísmicas que se propagan en el medio son de cortante, el esfuerzo axial y de flexión máximo se calcularán como:

$$\sigma_{a_{\max}} = \pm \frac{EV_{\max}}{2V_s} \quad (5.33)$$

$$\sigma_{f_{\max}} = \pm \frac{EdA_{\max}}{2V_s^2} \quad (5.34)$$

- 6 Si la tubería cruza una interfase, vertical o inclinada de dos suelos de distancia rigidez, los esfuerzos sísmicos de diseño de la tubería en la zona de la interfase, serán al menos 2.5 veces los que se obtengan en el inciso anterior.
- 7 Las curvaturas y deformaciones máximas permisibles debidas a cualquier sollicitación sísmica, serán las siguientes:

$$\phi_{\max} < \frac{0.01}{r_e} \quad (5.35)$$

$$\varepsilon_{\max} < 0.006 \quad (5.36)$$

donde:

r_e es el radio exterior de la sección transversal (mm)

Recomendaciones para diseño de tuberías enterradas que crucen fallas geológicas activas:

1. Si la tubería cruza una falla geológica con potencial para generar temblores, deberá procurarse que esta forme un ángulo de $\pi/2$ rad (90°), o cercano a el con el plano de la falla.
2. El relleno de la zanja deberá ser de material fino no cohesivo y y con ángulo de fricción bajo, con la mínima compactación que permitan las demás condiciones de carga, en una longitud de 220 m a cada lado de la zona de cruce.
3. Se dejara el tubo con el menor recubrimiento de tierra que permita el proyecto geométrico y las condiciones de carga externa.
4. En adición a lo anterior, se debe considerar la conveniencia de situar el tubo concéntrico dentro de otro, con diámetro interior, 0.40 m mayor que el diámetro exterior del tubo de interés, en una longitud de 220 m a cada lado del plano de la falla, apoyándolo sobre una capa de arena poco densa.
5. A fin de reducir la probabilidad de interrumpirse el suministro de agua, debe de cruzarse la falla mediante una bifurcación de la tubería, que se inicie y termine a no menos de 220 m del plano de la falla, considerando que los dos ramales queden separados al menos 220 m entre sí en los puntos de cruce de la falla, procurando que uno de ellos la cruce con ángulo de $\pi/2$ rad (90°).

6. Deberá instalarse una válvula de control 220 m aguas arriba del plano de la falla. Además, si se hace la bifurcación señalada en el punto anterior, cada rama deberá contar con su respectiva válvula, situada lo más cerca posible del punto de reunión con la tubería principal.

5.4. ACCIONES EXTERNAS EN TUBERIA SUPERFICIAL

5.4.1. Carga muerta debida al peso propio del tubo, agua, y accesorios

En una tubería superficial se requieren evaluar las fuerzas producidas por el peso propio de la tubería, incluido el recubrimiento, agua y todos los accesorios que se encuentren instalados en la tubería, como son las válvulas, bridas, etc. La fuerza normalmente se obtiene por unidad de longitud de tubería. Para efectos de diseño, se deberá considerar la tubería en condición de llenado total. La Tabla 5.9 muestra los pesos de la tubería y el agua, considerando la tubería llena. Para el cálculo del peso de los accesorios, se deberán consultar los catálogos correspondientes para considerar en el diseño los pesos correctos.

5.4.2. Temperatura

La diferencia de la temperatura ambiente entre la noche y el día, provoca expansiones o contracciones en la tubería que se calcularán con la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \alpha_0 \Delta_T \quad (5.37)$$

donde:

- ε es la deformación longitudinal unitaria
- α_0 es el coeficiente línea de expansión térmica (1/°K)
- Δ_T es el gradiente de temperatura (°K)

El coeficiente de expansión térmica para acero puede considerarse como 11.7×10^{-6} (1/°K)

La fuerza que se produce por el gradiente de temperatura se calcula:

$$F = AE\alpha_0 \Delta_T \quad (5.38)$$

donde:

- F es la fuerza producida por gradiente de temperatura (N)
- A es el área de la sección transversal de la tubería (mm²)
- E es el modulo de elasticidad del acero, 205,940 N/mm²

5.4.3. Sismo

El análisis sísmico de tuberías sobre la superficie se puede realizar utilizando un método simplificado, siempre y cuando se consideren tramos rectos de tubería entre dos apoyos consecutivos. Tal método debe tomar en cuenta el periodo natural del tramo de tubería y la zona sísmica donde esta instalada. El criterio de diseño debe suponer que los apoyos soportarán las fuerzas que les induce el sismo. El siguiente procedimiento se puede consultar en el Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismos, de la Comisión Federal de Electricidad (ref 5).

La fuerza sísmica por unidad de longitud que actúa en un tramo de tubería entre dos apoyos, es calculada como sigue:

$$F = am \quad (5.39)$$

donde:

- F es la fuerza por unidad de longitud, Kg/m
- a es la aceleración sísmica, m/s^2
- m es la masa por unidad de longitud de tubería, $Kg \ s^2/m^2$

La masa por unidad de longitud se obtiene:

$$m = \frac{W}{g} \quad (5.40)$$

donde:

- W es el peso del tubo y fluido por unidad de longitud, Kg/m
- g es la aceleración de la gravedad, $9.81 \ m/s^2$

La aceleración sísmica se obtiene del espectro para diseño sísmico indicado en la Tabla 5.4 donde a_0 es el coeficiente de aceleración del terreno, c el coeficiente sísmico, T_a y T_b son dos períodos característicos que delimitan la meseta y r un exponente que define la parte curva del espectro de diseño. Los valores anteriores dependen de la zona sísmica y los distintos tipos de terreno. La Figura 5.6 muestra la regionalización sísmica de la República Mexicana (ref 5).

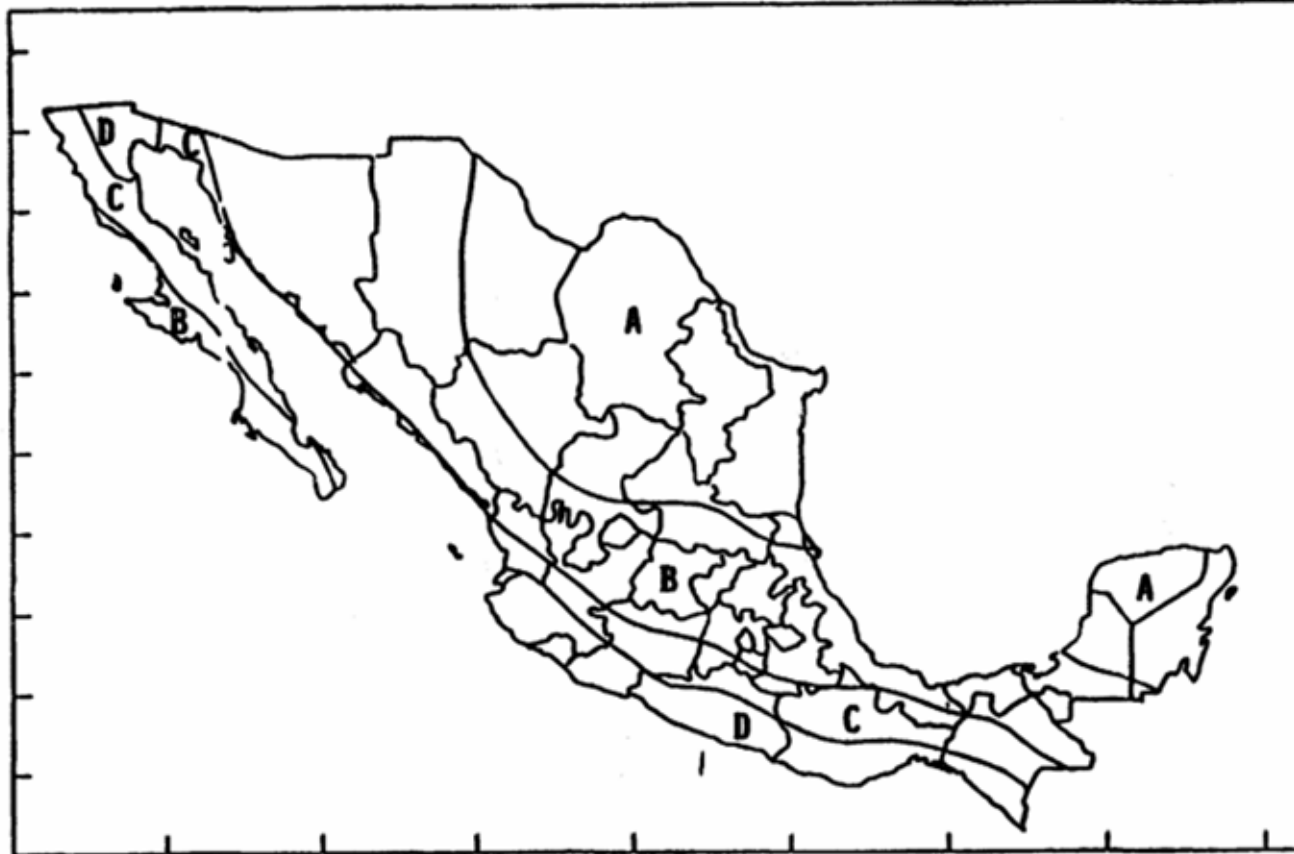


Figura 5.6 Regionalización sísmica de la República Mexicana (ref. 5)

De acuerdo con su rigidez, se consideran tres tipos de terreno:

- TIPO I: Terreno firme, tepetate, arenisca medianamente cementada, arcilla muy compacta o suelos con características similares.
- TIPO II: Terreno intermedio, arenas no cementadas o limos de mediana o alta compacidad, arcillas de mediana compacidad o suelos de características similares.
- TIPO III: Terreno blando y arcillas blandas muy compresibles.

Conocidos los parámetros anteriores, la aceleración sísmica se obtiene:

$$a = a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a}; \text{ si } T < T_a \quad (5.41)$$

$$a = c; \text{ si } T_a < T < T_b \quad (5.42)$$

$$a = c \left[\frac{T_b}{T} \right]^r; \text{ si } T > T_b \quad (5.43)$$

donde:

T es el periodo natural de la tubería, s

$$T = \frac{2}{P} \left[\frac{mL^4}{EI} \right]^{1/2} \quad (5.44)$$

donde:

- m es la masa por unidad de longitud de tubería, Kg seg²/m
- L es la longitud del tramo de tubería, m
- E es el modulo de elasticidad del acero, Kg/m²
- I es el momento de inercia de la sección transversal, m⁴

El valor de la aceleración sísmica, a_0 y el coeficiente sísmico c deben multiplicarse por 1.5 para estructuras del grupo A, a fin de tomar en cuenta la importancia de la estructura; como es el caso de las líneas de conducción de agua potable (ref. 5).

El factor de comportamiento sísmico no se requiere en las tuberías porque el concepto de ductibilidad no es aplicable en este tipo de estructuras, donde los daños más severos ocasionados durante sismos fuertes están asociados con las grandes deformaciones del suelo.

5.4.4. Viento

En esta sección, se planteará un procedimiento para el cálculo de la fuerza producida por el viento sobre la tubería superficial, el cual puede consultarse en el Manual de

Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento, de la Comisión Federal de Electricidad (ref. 6). La fuerza se obtiene:

$$F = PC_S D_e \quad (5.45)$$

donde:

- F es la fuerza sobre la tubería, Kg/m
- P es la presión de viento, Kg/m²
- C_S es el factor de forma, 0.6
- D_e es el diámetro de la tubería, m

La presión de viento se calcula:

$$P = 0.004V_D^2 \quad (5.46)$$

donde:

- V_D es la velocidad de diseño, Km/hr

La velocidad de diseño depende de la localización y tamaño de la construcción así como de la topografía del sitio. Esta se obtiene con la siguiente formula:

$$V_D = F_T F_\alpha V_R \quad (5.47)$$

donde:

- F_T es el factor de topografía, Tabla 5.5
- F_α es el factor de exposición
- V_R es la velocidad regional, Km/hr

La velocidad regional se determina con base en la localización geográfica, y corresponde a la máxima velocidad media probable, presentada en un cierto período de ocurrencia. Para tubería de conducción de agua potable dado que su funcionamiento es imprescindible y debe continuar después de la ocurrencia de un viento fuerte, se considerará un periodo de ocurrencia de 200 años. La Figura 5.7 muestra el mapa de velocidades regionales para un periodo de ocurrencia de 200 años (ref. 6). La velocidad corresponde a una altura de 10 m sobre la superficie del suelo en terreno plano.

El factor de exposición refleja tanto la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura z, como el tamaño de la construcción; su valor se obtiene:

$$F_\alpha = F_C F_{rz} \quad (5.48)$$

donde:

- F_α es el factor de exposición
- F_C es el factor de construcción, Tabla 5.6

F_{rz} en el factor de altura

$$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{10}{\delta} \right]^{\alpha} \quad (5.49)$$

donde:

δ, α son los coeficientes en función de la rugosidad del terreno y tamaño de la construcción, Tablas 5.6 y 5.8.

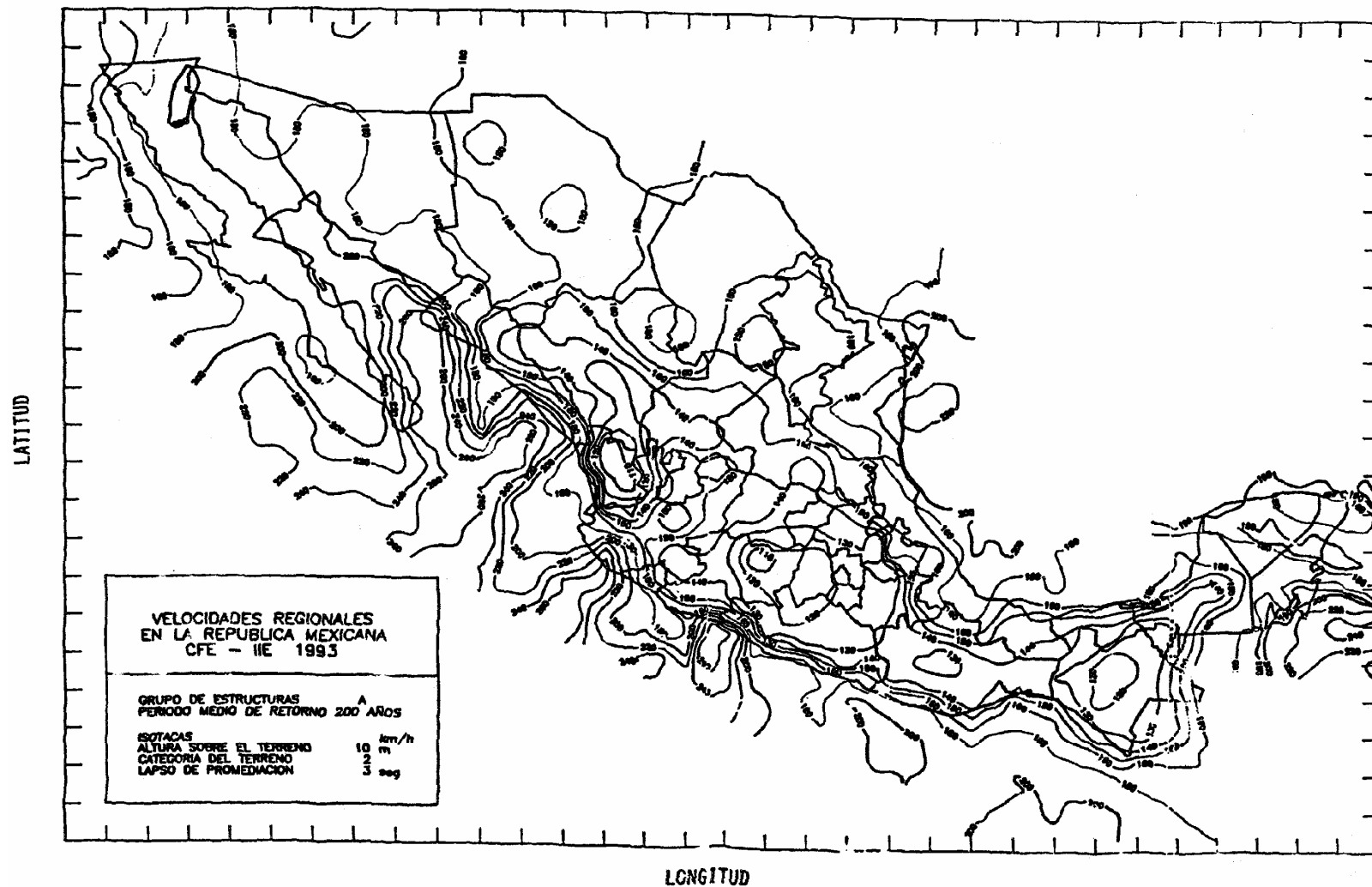


Figura 5.7 Regionalización de velocidades de viento (ref. 6)

Tabla 5.5 Factor de topografía local, FT. (Ref. 6)

Sitios	Topografía	T
Protegidos	Base de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento+	0.8
	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno prácticamente plano, como abierto, ausencia de cambios topográficos importantes con pendientes menores que 5%.	1.0
Expuestos	Terrenos inclinados con pendientes entre 5y 10%, valles abiertos y litorales planos.	1.1
	Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores que 10% , cañadas cerradas y valles que formen un embudo o cañón islas.	1.2

Tabla 5.6 Clase de estructura según su tamaño.

Clase	Descripción	FC
A	Todo elemento de recubrimiento de fachadas, de ventanerías y de techumbres y sus respectivos expuesto directamente a la acción del viento. Así mismo, todas las construcciones cuya mayor dimensión, a sea horizontal o vertical sea menor que 20 metros.	1.00
B	Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical varíe entre 20 50 metros.	0.95
C	Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical sea mayor que 50 metros.	0.90

Tabla 5.7 valores de α y δ . (Ref. 6)

Categoría de terreno	α			δ (m)
	Clase de estructura			
	A	B	C	
1	0.099	0.101	0.105	245
2	0.128	0.131	0.138	315
3	0.156	0.160	0.171	390
4	0.170	0.177	0.193	455

Tabla 5.8 Categoría del terreno según su rugosidad.

Cat.	Descripción	Ejemplos	Limitaciones
1	Terreno abierto Prácticamente plano y sin obstrucciones.	Franjas costeras planas, zonas de pantanos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bardas alrededor. Superficies nevadas lanas.	La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000 m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones.	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como seto! o bardas alrededor, árboles y construcciones dispersas.	Las obstrucciones tienen alturas de 1.5 a 10 m, en una longitud mínima de 1500 m.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas.	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas viviendas.	Las obstrucciones presentan alturas de 3 a 5 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500 m o 10 veces la altura de la construcción, la que sea mayor.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas.	Centros de grandes ciudades y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos el 50% de los edificios tienen una altura mayor que 20 m. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400 m y 10 veces la altura de la construcción.

Tabla 5.9 Propiedades de tubería

DIAMETRO DE TUBERÍA (pulg)	DIAMETRO D TUBERÍA (cm)	ESPESOR PARED (cm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
6	15,24	0,190	9,0	254	33	7,06	17,34
		0,266	12,5	351	46	9,83	16,99
		0,342	16,0	444	58	12,57	16,64
6 5/8	16,83	0,190	9,9	344	41	7,80	21,25
		0,266	13,8	475	56	10,87	20,86
		0,342	17,7	602	72	13,91	20,47
8	20,32	0,190	12,0	609	60	9,44	31,23
		0,266	16,8	843	83	13,17	30,75
		0,342	21,5	1071	105	16,86	30,28
8 5/8	21,91	0,190	13,0	764	70	10,18	36,40
		0,266	18,1	1050	97	14,21	35,89
		0,342	23,2	1347	123	18,20	35,38
10	25,40	0,190	15,0	1196	94	11,82	40,17
		0,266	21,0	1659	131	16,30	48,57
		0,342	26,9	2114	166	21,15	47,98
		0,435	35,7	2774	218	28,01	47,11
10 3/4	27,31	0,190	16,2	1488	109	12,71	56,94
		0,266	22,6	2065	151	17,75	56,30
		0,342	29,0	2633	193	22,76	55,66
		0,435	38,4	3460	253	30,15	54,72
12	30,48	0,190	18,1	2074	136	14,20	71,16
		0,266	25,2	2881	189	19,84	70,44
		0,342	32,4	3677	241	25,44	69,73
		0,435	42,9	4838	317	33,72	68,67
12 3/4	32,39	0,190	19,2	2490	154	15,10	80,45
		0,266	26,8	3461	214	21,09	79,69
		0,342	34,4	4419	273	27,05	78,93
		0,435	45,6	5818	359	35,86	77,81
14	35,56	0,190	21,1	3302	186	16,59	97,20
		0,266	29,5	4593	258	23,17	96,37
		0,342	37,8	5867	330	29,73	95,53
		0,397	43,9	6779	381	34,45	94,93
		0,435	50,2	7731	435	39,42	94,30
		0,536	61,1	9367	527	48,09	93,20
		0,635	69,7	10626	598	54,73	92,35
16	40,64	0,190	24,1	4938	243	18,97	127,30
		0,266	33,7	6875	338	26,51	126,34
		0,342	43,3	8790	433	34,01	125,39
		0,397	50,2	10162	500	39,43	124,70
		0,435	57,4	11596	571	45,13	123,97
		0,536	70,0	14065	692	55,00	122,72
		0,635	79,8	15969	786	62,70	121,74

NOTAS:

* Los valores se obtuvieron de un programa de computadora.

* El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior; para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.

* Las fabricas pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.9 Propiedades de tubería (continuación)

DIAMETRO DE TUBERÍA (pulg)	DIAMETRO D TUBERÍA (cm)	ESPESOR PARED (cm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
18	45,72	0,190	27,2	7042	308	21,35	161,46
		0,266	38,0	9810	429	29,84	160,38
		0,342	48,8	12550	549	38,30	159,30
		0,397	56,5	14516	635	44,41	158,52
		0,455	64,7	16573	725	50,83	157,70
		0,556	78,9	20118	880	61,98	156,28
		0,635	89,9	22857	1000	70,66	155,18
20	50,80	0,190	30,2	9672	381	23,73	199,66
		0,266	42,2	13480	531	33,18	198,46
		0,342	54,2	17254	679	42,59	197,26
		0,397	62,9	19964	786	49,39	196,40
		0,455	72,0	22802	896	56,54	195,49
		0,556	87,8	27698	1090	68,95	193,91
		0,635	100,1	31485	1240	78,62	192,68
22	55,88	0,190	33,2	12887	461	26,11	241,92
		0,266	46,5	17968	643	36,51	240,60
		0,342	59,7	23008	823	46,88	239,28
		0,397	69,2	26629	953	54,36	238,33
		0,455	79,2	30424	1089	62,24	237,32
		0,556	96,6	36976	1323	75,92	235,58
		0,635	110,2	42050	1505	86,58	234,23
24	60,96	0,266	50,7	23355	766	39,85	286,79
		0,342	65,1	29916	982	51,17	285,35
		0,397	75,5	34633	1136	59,34	284,31
		0,455	86,5	39580	1299	67,94	283,22
		0,556	105,5	48125	1579	82,89	281,31
		0,635	120,3	54749	1796	94,54	279,83
		0,794	150,1	67922	2228	117,90	276,86
		1,111	208,9	93561	3070	164,11	270,97
		1,270	238,2	106112	3481	187,09	268,05
26	66,04	0,266	55,0	29724	900	43,18	337,04
		0,342	70,6	38085	1153	55,45	335,48
		0,397	81,9	44099	1336	64,32	334,35
		0,455	93,7	50409	1527	73,65	333,16
		0,556	114,4	61316	1857	89,86	331,10
		0,635	130,5	69776	2113	102,50	329,49
		0,794	162,8	86618	2673	127,86	326,26
		1,111	226,6	119459	3671	178,03	319,87
		1,270	258,4	135567	4106	203,02	316,69
28	71,12	0,266	59,2	37157	1045	46,52	391,34
		0,342	76,0	47620	1339	59,74	389,66
		0,397	88,2	55150	1551	69,30	388,44
		0,455	101,0	63053	1773	79,35	387,16
		0,556	123,3	76721	2157	96,83	384,93
		0,635	140,6	87329	2456	110,46	383,20
		0,794	175,4	108464	3050	137,81	379,72
		1,111	244,4	149743	4211	191,96	372,82
		1,270	278,7	170023	4781	218,94	369,39

NOTAS:

- Los valores se obtuvieron de un programa de computadora.
- El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior; para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.
- Los fabricantes pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.9 Propiedades de tubería (continuación)

DIAMETRO DE TUBERIA (pulg)	DIAMETRO D TUBERIA (cm)	ESPESOR PARED (cm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
30	76,20	0,266	63,5	45736	1300	49,85	449,69
		0,342	81,5	58627	1539	64,03	447,89
		0,397	94,5	67908	1782	74,27	446,58
		0,455	108,3	77652	2038	85,06	445,21
		0,556	132,1	94511	2481	103,80	442,82
		0,635	150,7	107604	2824	118,43	440,96
		0,794	188,1	133705	3509	147,77	437,23
		1,111	262,1	184756	4849	205,89	429,83
		1,270	299,0	209873	5506	234,86	426,14
32	81,28	0,266	67,7	55543	1367	53,19	512,10
		0,342	87,0	71212	1752	68,32	510,17
		0,397	100,9	82496	2030	79,25	508,78
		0,455	115,5	94346	2322	90,76	507,32
		0,556	141,0	114839	2826	110,77	504,77
		0,635	160,9	130796	3218	126,39	502,78
		0,794	200,8	162587	4001	157,72	498,79
		1,111	279,8	224842	5533	219,82	490,89
		1,270	319,2	255509	6287	250,78	486,95
34	86,36	0,266	71,9	66660	1544	56,52	578,56
		0,342	92,4	85479	1980	72,61	576,51
		0,397	107,2	99037	2294	84,23	575,03
		0,455	122,8	113276	2623	96,47	573,48
		0,556	149,9	137936	3194	117,74	570,77
		0,635	171,0	157102	3638	134,35	568,65
		0,794	213,4	193354	4524	167,68	564,41
		1,111	297,5	270944	6261	233,75	556,00
		1,270	339,5	307324	7117	266,71	551,81
36	91,44	0,266	76,2	79170	1732	59,86	649,08
		0,342	97,9	101536	2221	76,89	646,91
		0,397	113,6	117652	2573	89,21	645,34
		0,455	130,1	134584	2944	102,17	643,69
		0,556	158,7	163913	3585	124,71	640,82
		0,635	181,1	186718	4084	142,31	638,58
		0,794	226,1	232233	5080	177,63	634,08
		1,111	315,3	321605	7034	247,68	625,17
		1,270	359,8	363710	7999	282,63	620,73
39	99,06	0,266	82,6	100725	2034	64,96	762,45
		0,342	106,1	129206	2609	83,32	760,10
		0,397	123,1	149734	3023	96,67	758,40
		0,455	140,9	171308	3459	110,73	756,61
		0,556	172,1	208695	4213	135,17	753,50
		0,635	196,3	237777	4801	154,25	751,07
		0,794	243,1	295883	5974	192,36	746,19
		1,111	341,9	410044	8279	268,58	736,52
		1,270	390,2	466467	9418	306,51	731,69

NOTAS:

- * Los valores se obtuvieron de un programa de computadora.
- El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior; para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.
- Los fabricantes pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.9 Propiedades de tubería (continuación)

DIAMETRO DE TUBERIA (pulg)	DIAMETRO D TUBERIA (cm)	ESPESOR PARED (mm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
40	101,60	0,266	94,7	108695	2140	66,53	802,27
		0,342	108,8	139438	2745	85,47	799,85
		0,397	126,2	161599	3181	99,16	798,11
		0,455	144,6	184890	3640	113,58	796,28
		0,556	176,5	225258	4434	138,66	793,08
		0,635	201,4	256664	5052	158,23	790,59
		0,794	251,5	319424	6288	197,54	785,59
		1,111	330,7	442776	8716	275,54	775,66
		1,270	400,3	503763	9917	314,48	770,70
42	106,68	0,266	88,9	125876	2360	69,86	884,94
		0,342	114,3	161494	3028	89,76	882,41
		0,397	132,6	187175	3509	104,14	880,58
		0,455	151,8	214171	4015	119,29	878,65
		0,556	185,4	260969	4893	145,63	875,30
		0,635	211,6	297386	5575	166,19	872,68
		0,794	264,1	370187	6940	207,50	867,42
		1,111	368,5	513372	9625	289,47	856,99
		1,270	420,6	584216	10953	330,40	851,78
45	114,30	0,635	229,3	378621	6552	180,13	1026,09
		0,794	287,1	475401	8204	225,54	1026,09
		0,953	345,1	572981	9861	271,08	1026,09
		1,111	402,8	670744	11513	316,46	1026,09
		1,270	461,1	769932	13179	362,24	1026,09
		1,429	519,5	869933	14851	408,16	1026,09
		1,588	578,1	970752	16527	454,19	1026,09
		1,746	636,5	1071751	18197	500,07	1026,09
		1,905	695,5	1174213	19883	546,35	1026,09
48	121,92	0,635	244,5	459028	7452	192,07	1167,46
		0,794	306,1	576212	9331	240,47	1167,46
		0,953	367,9	694303	11214	289,00	1167,46
		1,111	429,4	812557	13091	337,35	1167,46
		1,270	491,5	932475	14984	386,13	1167,46
		1,429	553,8	1053315	16883	435,03	1167,46
		1,588	616,2	1175083	18787	484,06	1167,46
		1,746	678,3	1297008	20684	532,90	1167,46
		1,905	741,1	1420639	22598	582,18	1167,46
51	129,54	0,635	259,7	550082	8410	204,01	1317,95
		0,794	325,1	690352	10529	255,41	1317,95
		0,953	390,7	831646	12654	306,93	1317,95
		1,111	456,0	973071	14770	358,24	1317,95
		1,270	521,9	1116422	16905	410,01	1317,95
		1,429	588,0	1260812	19046	461,91	1317,95
		1,588	654,2	1406246	21192	513,92	1317,95
		1,746	720,1	1551805	23330	565,74	1317,95
		1,905	786,7	1699336	25487	618,00	1317,95

NOTAS:

- Los valores se obtuvieron de un programa de computadora.
- El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior; para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.
- Los fabricantes pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.9 Propiedades de tubería (continuación)

DIAMETRO DE TUBERIA (pulg)	DIAMETRO D TUBERIA (cm)	ESPESOR PARED (cm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
54	137,16	0,635	274,9	652445	9426	215,95	1477,56
		0,794	344,1	818651	11801	270,34	1477,56
		0,953	413,5	986003	14180	324,85	1477,56
		1,111	482,6	1153443	16551	379,14	1477,56
		1,270	552,3	1323097	18942	433,90	1477,56
		1,429	622,2	1493914	21339	488,78	1477,56
		1,588	692,2	1665898	23742	543,79	1477,56
		1,746	761,9	1837963	26135	598,57	1477,56
1,905	832,3	2012291	28549	653,83	1477,56		
57	144,78	0,635	290,1	766780	10500	227,90	1646,30
		0,794	363,1	961935	13144	285,27	1646,30
		0,953	436,3	1158367	15794	342,77	1646,30
		1,111	509,2	1354833	18433	400,03	1646,30
		1,270	582,7	1553825	21095	457,78	1646,30
		1,429	656,4	1754110	23762	515,65	1646,30
		1,588	730,2	1955694	26436	573,65	1646,30
		1,746	803,7	2157302	29099	631,41	1646,30
1,905	877,9	2361491	31785	689,66	1646,30		
60	152,40	0,635	305,3	893747	11632	239,84	1824,15
		0,794	382,1	1121033	14560	300,20	1824,15
		0,953	459,1	1349732	17494	360,69	1824,15
		1,111	535,8	1578397	20416	420,93	1824,15
		1,270	613,1	1809929	23363	481,67	1824,15
		1,429	690,6	2042891	26316	542,53	1824,15
		1,588	768,2	2277289	29276	603,52	1824,15
		1,746	845,5	2511641	32223	664,25	1824,15
1,905	923,5	2748920	35195	725,48	1824,15		
63	160,02	0,794	401,1	1296772	16048	315,14	2011,13
		0,953	481,9	1561091	19282	378,62	2011,13
		1,111	562,4	1825294	22501	441,82	2011,13
		1,270	643,5	2092733	25747	505,55	2011,13
		1,429	724,8	2361746	29000	569,40	2011,13
		1,588	806,2	2632339	32260	633,38	2011,13
		1,746	887,3	2902802	35506	697,08	2011,13
		1,905	969,1	3176565	38779	761,31	2011,13
		2,064	1051,0	3451926	42059	825,66	2011,13
		2,223	1133,1	3728892	45345	890,14	2011,13
		2,381	1214,8	4005712	48618	954,33	2011,13
2,540	1297,2	4285897	51919	1019,06	2011,13		

NOTAS:

- Los valores se obtuvieron de un programa de computadora.
- El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior, para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.
- Los fabricantes pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.9 Propiedades de tubería (continuación)

DIAMETRO DE TUBERÍA (pulg)	DIAMETRO DE TUBERÍA (cm)	ESPESOR PARED (cm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
66	167,64	0,794	420,1	1489980	17609	330,07	2207,22
		0,953	504,8	1793438	21136	396,54	2207,22
		1,111	589,0	2096683	24687	462,71	2207,22
		1,271	674,5	2405497	28270	529,85	2207,22
		1,429	759,0	2712165	31815	596,28	2207,22
		1,587	843,7	3020543	35366	662,83	2207,22
		1,746	929,1	3332605	38948	729,92	2207,22
		1,905	1014,7	3646411	42536	797,14	2207,22
		2,064	1100,4	3961969	46132	864,48	2207,22
		2,222	1185,7	4277283	49712	931,52	2207,22
		2,381	1271,8	4596351	53321	999,11	2207,22
2,541	1358,5	4919213	56961	1067,25	2207,22		
69	175,26	0,794	439,2	1701484	19242	345,00	2412,44
		0,953	527,6	2047766	23117	414,46	2412,44
		1,111	615,6	2393722	26974	483,61	2412,44
		1,271	704,9	2745945	30888	553,76	2412,44
		1,429	793,2	3095637	34759	623,15	2412,44
		1,587	881,7	3447195	38638	692,67	2412,44
		1,746	970,9	3802869	42549	762,75	2412,44
		1,905	1060,3	4160446	46467	832,96	2412,44
		2,064	1149,8	4519933	50393	903,29	2412,44
		2,222	1238,9	4879058	54301	973,31	2412,44
		2,381	1328,8	5242373	58241	1043,89	2412,44
2,541	1419,4	5609922	62214	1115,04	2412,44		
72	182,88	0,794	458,2	1932113	20948	359,93	2626,78
		0,953	550,4	2325069	25165	432,38	2626,78
		1,111	642,2	2717569	29363	504,50	2626,78
		1,271	735,3	3117090	33622	577,66	2626,78
		1,429	827,4	3513653	37835	650,03	2626,78
		1,587	919,7	3912245	42055	722,52	2626,78
		1,746	1012,7	4315415	46310	795,59	2626,78
		1,905	1105,9	4720654	50572	868,79	2626,78
		2,064	1199,2	5127969	54842	942,11	2626,78
		2,222	1292,1	5534786	59093	1015,10	2626,78
		2,381	1385,8	5946262	63379	1088,67	2626,78
2,541	1480,2	6362443	67699	1162,83	2626,78		
75	190,50	0,794	477,2	2182694	22726	374,86	2850,24
		0,953	573,2	2626341	27300	450,31	2850,24
		1,111	668,8	3069382	31853	525,40	2850,24
		1,271	765,7	3520257	36471	601,56	2850,24
		1,429	861,6	3967702	41040	676,90	2850,24
		1,587	957,7	4417346	45616	752,36	2850,24
		1,746	1054,5	4872063	50230	828,43	2850,24
		1,905	1151,5	5329022	54851	904,61	2850,24
		2,064	1248,6	5788230	59480	980,93	2850,24
		2,222	1345,3	6246785	64088	1056,88	2850,24
		2,381	1442,8	6710499	68733	1133,45	2850,24
2,541	1541,0	7179422	73416	1210,62	2850,24		

NOTAS:

- * Los valores se obtuvieron de un programa de computadora.
- * El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior, para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.
- * Los fabricantes pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.9 Propiedades de tubería (continuación)

DIAMETRO DE TUBERÍA (pulg)	DIAMETRO DE TUBERÍA (cm)	ESPESOR PARED (cm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
78	198,12	0,794	496,2	2454055	24576	389,80	3082,82
		0,953	596,0	2952574	29522	468,23	3082,82
		1,111	695,4	3450319	34444	546,29	3082,82
		1,271	796,2	3956770	39437	625,47	3082,82
		1,429	895,8	4459273	44376	703,78	3082,82
		1,587	995,7	4964153	49322	782,21	3082,82
		1,746	1096,3	5474633	54309	861,26	3082,82
		1,905	1197,1	5987536	59303	940,44	3082,82
		2,064	1298,0	6502867	64306	1019,74	3082,82
		2,222	1398,5	7017370	69285	1098,67	3082,82
		2,381	1499,8	7537567	74305	1178,23	3082,82
		2,541	1601,8	8063510	79364	1258,40	3082,82
		81	205,74	0,794	515,2	2747024	26499
0,953	618,8			3304763	31831	486,15	3324,52
1,111	722,0			3861538	37137	567,18	3324,52
1,271	826,6			4427954	42519	649,37	3324,52
1,429	930,1			4989857	47842	730,65	3324,52
1,587	1033,7			5554320	53173	812,05	3324,52
1,746	1138,1			6124946	58547	894,10	3324,52
1,905	1242,7			6698181	63929	976,27	3324,52
2,064	1347,5			7274031	69320	1058,56	3324,52
2,222	1451,7			7848858	74686	1140,46	3324,52
2,381	1556,8			8429947	80094	1223,00	3324,52
2,541	1662,7			9017355	85545	1306,19	3324,52
84	213,36			0,794	534,2	3062428	28495
		0,953	641,6	3683901	34227	504,07	3575,34
		1,111	748,6	4304199	39931	588,08	3575,34
		1,271	857,0	4935135	45716	673,27	3575,34
		1,429	964,3	5560943	51438	757,52	3575,34
		1,587	1071,7	6189501	57169	841,90	3575,34
		1,746	1179,9	6824822	62945	926,93	3575,34
		1,905	1288,3	7462944	68729	1012,09	3575,34
		2,064	1396,9	8103875	74522	1097,38	3575,34
		2,222	1504,9	8743566	80288	1182,25	3575,34
		2,381	1613,8	9390122	86100	1267,78	3575,34
		2,541	1723,5	10043606	91957	1353,98	3575,34
		87	220,98	0,794	553,2	3401096	30562
0,953	664,5			4090981	36709	522,00	3835,28
1,111	775,2			4779459	42826	608,97	3835,28
1,271	887,4			5479637	49030	697,17	3835,28
1,429	998,5			6174021	55165	784,40	3835,28
1,587	1109,7			6871352	61309	871,75	3835,28
1,746	1221,7			7576081	67501	959,77	3835,28
1,905	1333,9			8283810	73703	1047,92	3835,28
2,064	1446,3			8994550	79913	1136,19	3835,28
2,222	1558,1			9703809	86094	1224,04	3835,28
2,381	1670,8			10420575	92323	1312,56	3835,28
2,541	1784,3			11144913	98600	1401,77	3835,28

NOTAS:

- Los valores se obtuvieron de un programa de computadora.
- El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior; para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.
- Los fabricantes pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.9 Propiedad de tubería (continuación)

DIAMETRO DE TUBERÍA (pulg)	DIAMETRO DE TUBERÍA (cm)	ESPESOR PARED (cm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
90	228,60	0,794	572,2	3763854	32702	449,53	4104,34
		0,953	687,3	4526997	39279	539,92	4104,34
		1,111	801,8	5284475	45823	629,87	4104,34
		1,271	917,9	6062787	52459	721,08	4104,34
		1,429	1032,7	6830581	59022	811,27	4104,34
		1,587	1147,6	7601527	65594	901,59	4104,34
		1,746	1263,5	8380542	72217	992,61	4104,34
		1,905	1379,5	9162766	78850	1083,75	4104,34
		2,064	1495,7	9948207	85492	1175,01	4104,34
		2,222	1611,3	10731904	92102	1265,82	4104,34
		2,381	1727,8	11523787	98763	1357,34	4104,34
2,541	1845,2	12323924	105476	1449,55	4104,34		
96	243,84	0,794	610,2	4564954	37200	479,39	4669,83
		0,953	732,9	5489811	44679	575,76	4669,83
		1,111	855,0	6412414	52120	671,65	4669,83
		1,271	978,7	7350325	59666	768,88	4669,83
		1,429	1101,1	8280105	67127	865,02	4669,83
		1,587	1223,6	9213465	74599	961,28	4669,83
		1,746	1347,1	10156356	82127	1058,28	4669,83
		1,905	1470,7	11102890	89666	1155,40	4669,83
		2,064	1594,5	12053078	97215	1252,64	4669,83
		2,222	1717,7	13000918	104726	1349,40	4669,83
		2,381	1841,8	13958417	112295	1446,89	4669,83
2,541	1966,8	14925655	119922	1545,13	4669,83		
102	259,08	0,794	648,2	5472351	41987	509,26	5271,80
		0,953	778,5	6580290	50426	611,61	5271,80
		1,111	908,1	7685280	58823	713,44	5271,80
		1,271	1039,6	8808350	67336	816,69	5271,80
		1,429	1169,5	9921433	75754	918,77	5271,80
		1,587	1299,6	11034551	84182	1020,98	5271,80
		1,746	1430,7	12166825	92674	1123,95	5271,80
		1,905	1561,9	13299204	101177	1227,05	5271,80
		2,064	1693,3	14435701	109690	1330,28	5271,80
		2,222	1824,1	15569138	118161	1432,98	5271,80
		2,381	1955,8	16713872	126696	1536,45	5271,80
2,541	2088,5	17869991	135296	1640,70	5271,80		
108	274,32	0,794	686,3	6492666	47064	539,12	5910,25
		0,953	824,2	7806383	56522	647,45	5910,25
		1,111	961,3	9116339	65931	755,23	5910,25
		1,271	1100,4	10447462	75471	864,50	5910,25
		1,429	1237,9	11766482	84902	972,52	5910,25
		1,587	1375,6	13090021	94345	1080,67	5910,25
		1,746	1514,3	14426510	103858	1189,62	5910,25
		1,905	1653,1	15767596	113383	1298,70	5910,25
		2,064	1792,1	17113290	122919	1407,91	5910,25
		2,222	1930,4	18455095	132407	1516,55	5910,25
		2,381	2069,8	19810007	141965	1626,01	5910,25
2,541	2210,1	21178124	151596	1736,28	5910,25		

NOTAS:

- Los valores se obtuvieron de un programa de computadora.
- El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior; para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.
- Los fabricantes pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.9 Propiedad de tubería (continuación)

DIAMETRO DE TUBERIA (pulg)	DIAMETRO DE TUBERIA (cm)	ESPESOR PARED (cm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
114	289,56	0,794	724,3	7632522	52431	568,98	6585,19
		0,953	869,8	9176038	62965	683,30	6585,19
		1,111	1014,5	10714858	73444	797,02	6585,19
		1,271	1161,3	12278260	84068	912,30	6585,19
		1,429	1306,4	13827171	94571	1026,27	6585,19
		1,587	1451,6	15381110	105086	1140,36	6585,19
		1,746	1597,9	16949974	115679	1255,30	6585,19
		1,905	1744,3	18523953	126284	1370,36	6585,19
		2,064	1891,0	20103058	136901	1485,54	6585,19
		2,222	2036,8	21677322	147463	1600,13	6585,19
		2,381	2183,8	23266682	158104	1715,56	6585,19
		2,541	2331,8	24871247	168824	1831,85	6585,19
120	304,80	0,794	762,3	8898541	58087	598,85	7296,60
		0,953	915,4	10697202	69755	719,14	7296,60
		1,111	1067,7	12490102	81363	838,81	7296,60
		1,271	1222,1	14311346	93130	960,11	7296,60
		1,429	1374,8	16115417	104762	1080,02	7296,60
		1,587	1527,6	17925054	116406	1200,05	7296,60
		1,746	1681,3	19751778	128137	1320,97	7296,60
		1,905	1835,6	21584163	139880	1442,01	7296,60
		2,064	1989,8	23422221	151635	1563,18	7296,60
		2,222	2143,2	25254350	163330	1683,70	7296,60
		2,381	2297,8	27103753	175110	1805,12	7296,60
		2,541	2453,4	28970551	186978	1927,43	7296,60
126	320,04	0,794	800,3	10297344	64033	628,71	8044,51
		0,953	961,0	12377824	76894	754,99	8044,51
		1,111	1120,9	14451336	89687	880,59	8044,51
		1,271	1283,0	16537319	102655	1007,91	8044,51
		1,429	1443,2	18643138	115474	1133,77	8044,51
		1,587	1603,5	20735089	128306	1259,74	8044,51
		1,746	1765,1	22846483	141232	1386,64	8044,51
		1,905	1926,8	24964113	154171	1513,66	8044,51
		2,064	2088,6	27087990	167123	1640,81	8044,51
		2,222	2249,6	29204710	180007	1767,28	8044,51
		2,381	2411,8	31341079	192986	1894,68	8044,51
		2,541	2575,1	33497228	206059	2023,00	8044,51
132	335,28	0,794	838,3	11835554	70268	658,58	8828,89
		0,953	1006,7	14225852	84380	790,83	8828,89
		1,111	1174,1	16607827	98416	922,38	8828,89
		1,271	1343,8	19026780	112644	1055,72	8828,89
		1,429	1511,6	21422252	126707	1187,52	8828,89
		1,587	1679,5	23824449	140784	1319,43	8828,89
		1,746	1848,7	26248653	154964	1452,31	8828,89
		1,905	2018,0	28679692	169157	1585,32	8828,89
		2,064	2187,4	31117581	183364	1718,44	8828,89
		2,222	2356,0	33546934	197495	1850,86	8828,89
		2,381	2525,8	35998516	211730	1984,23	8828,89
		2,541	2696,8	38472470	226068	2118,57	8828,89

NOTAS:

- Los valores se obtuvieron de un programa de computadores.
- El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior; para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.
- Los fabricantes pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.9 Propiedad de tubería (continuación)

DIAMETRO DE TUBERÍA (plg)	DIAMETRO DE TUBERÍA (cm)	ESPESOR PARED (cm)	SECCION TRANSVERSAL (cm ²)	MOMENTO INERCIA (cm ⁴)	MODULO DE SECCION (cm ³)	PESO DEL TUBO (Kg/m)	PESO DEL AGUA (Kg/m)
138	350,52	0,794	876,3	13519791	76793	688,44	9649,76
		0,953	1052,3	16249234	92214	826,68	9649,76
		1,111	1227,3	18968840	107551	964,17	9649,76
		1,271	1404,7	21730329	123096	1103,53	9649,76
		1,429	1580,0	24464678	138462	1241,26	9649,76
		1,587	1755,5	27206372	153841	1379,13	9649,76
		1,746	1932,3	29972847	169332	1517,98	9649,76
		1,905	2109,2	32746787	184838	1656,97	9649,76
		2,064	2286,2	35528206	200338	1796,08	9649,76
		2,222	2463,4	38299553	215794	1934,43	9649,76
		2,381	2639,8	41093922	231343	2073,79	9649,76
		2,541	2818,4	43917469	247003	2214,15	9649,76
		144	365,76	0,794	914,3	15356680	83608
0,953	1097,9			18455918	100395	862,52	10507,11
1,111	1280,5			21543641	117091	1005,96	10507,11
1,271	1463,5			24678565	134013	1151,33	10507,11
1,429	1648,4			27782332	150738	1295,01	10507,11
1,587	1831,5			30894091	167478	1438,82	10507,11
1,746	2015,9			34033628	184338	1583,66	10507,11
1,905	2200,4			37181286	201214	1728,62	10507,11
2,064	2385,1			40337080	218104	1873,71	10507,11
2,222	2568,7			43481099	234903	2018,01	10507,11
2,381	2753,7			46633156	251824	2163,35	10507,11
2,541	2940,1			49834117	268866	2309,72	10507,11

NOTAS:

- Los valores se obtuvieron de un programa de computadores.
- El diámetro de las tuberías menores de 1.143 m es exterior, para las tuberías mayores de 1.143 m el diámetro es interior.
- Los fabricantes pueden ofrecer espesores diferentes a los mostrados.

Tabla 5.10 Velocidades máximas del terreno

Zona sísmica	Tipo de suelo	V₀ (cm/s)
A	I	1.3
	II	4.4
	III	7.8
B	I	2.2
	II	8.1
	III	14.8
C	I	4.2
	II	15.0
	III	21.2
D	I	4.9
	II	16.8
	III	23.5

6. ANALISIS Y DISEÑO

6.1. GENERALIDADES

En este capítulo se describe el procedimiento para calcular el espesor de pared requerido para una tubería sujeta a presión así como las revisiones de dicho espesor, considerando las diferentes condiciones a las que estará sujeta la tubería. En una tubería enterrada se revisaran los esfuerzos provocados por la deflexión vertical y el paneo ocasionadas por las cargas externas, las originadas por el fenómeno transitorio (golpe de ariete), peso del suelo, carga de vehículos y sismo. Para una tubería superficial, se revisaran los esfuerzos que coaccionados por las diferentes condiciones de carga que puedan presentarse: y golpe de ariete, carga viva, carga muerta, cambio de temperatura, sismo o viento. En este capítulo se analizan las fuerzas básicas para el diseño de los diferentes tipos de soportes utilizados para una tubería superficial. Tales como atraques de concreto, juntas de expansión y los esfuerzos en conexiones.

6.2. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE PARED DEL TUBO

En este subcapítulo se indica el procedimiento para determinar el espesor de la tubería, independientemente de su instalación sea enterrada o aérea. Con el espesor así calculado, se revisará en su condición final.

6.2.1. Determinación del espesor por presión interna

El espesor de pared de la tubería por requerimiento de presión interna se calculará utilizando las siguientes expresiones:

$$t_d = t + t_c \quad (6.1)$$

$$t = \frac{Pd_i}{2S} \quad (6.2)$$

donde:

t_d	es el espesor de diseño (mm)
t	es el espesor de la tubería calculada (mm)
t_c	es el espesor considerado por corrosión (mm)
P	es la presión de diseño (MPa)
d_i	es el diámetro interior del tubo (mm)
S	es el $k F_y$, esfuerzo permisible (MPa)
F_y	es el esfuerzo de fluencia del material (MPa)
k	es el esfuerzo de diseño

6.2.2. Determinación del espesor por efectos transitorios (golpe de ariete)

Para la determinación del espesor requerido para resistir el fenómeno transitorio (golpe de ariete), se empleara la misma expresión del párrafo anterior (ecuación 6.2), sustituyendo P por la presión total máxima adquirida durante el efecto transitorio. Para esto se suma algebraicamente la presión de operación y la sobre presión del golpe de ariete.

Como el valor de la sobre presión alcanza valores positivos y negativos pudiera suceder que en la suma con el valor negativo resultara un valor menor a la presión atmosférica en cuyo caso, se deberá revisar el espesor por colapso de acuerdo a la sección 6.2.4.

6.2.3. Espesor mínimo por manejo

De acuerdo a la A.W.W.A (ref. 1), los espesores mínimos de pared por manejo, son los siguientes:

- a) Para diámetros de 1,370 mm y menores
- b) Para diámetros mayores de 1,370 mm

$$t_m = \frac{d_n + 510}{400} \quad (6.4)$$

donde:

- d_n es el diámetro nominal de la tubería (mm)
- t_m es el espesor mínimo de pared por manejo (mm)

Se optará por el espesor que resulte mayor de las expresiones anteriores.

6.2.4. Revisión del espesor por presión de colapso atmosférico

Para determinar la presión externa de colapso, originada al actuar la presión atmosférica y generar un vacío en el interior del tubo, se calculará con la siguiente expresión:

$$P_c = \frac{2E}{1-\mu^2} \left(\frac{t}{d_m} \right)^3 \quad (6.5)$$

donde:

- P_c es la presión de colapso, en (MPa)
- E es el modulo de elasticidad del acero = 205,940 MPa
- μ es la relación de Poisson del acero = 0.3
- t es el espesor de pared de la tubería en (mm)
- d_m es el diámetro medio de la tubería en (mm)

Se han desarrollado ecuaciones empíricas para evaluar la presión de colapso las cuales consideran las tolerancias de fabricación referentes a espesores y redondez. La siguiente ecuación fue establecida por Stewart.

Tabla 6.1 Esfuerzos permisibles, de fluencia y ruptura para tubos de diferentes grados de acero

Especificaciones de tubería	Esfuerzo permisible (50% del esfuerzo de fluencia) (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo de ruptura a la tensión (MPa)
ASTM A36	124	248	400
ASTM A283 GR.C	103	207	379
GR D	114	228	414
ASTM A570 GR.30	103	207	338
GR.33	114	228	358
GR.36	124	248	365
GR.40	138	276	379
GR.45	155	310	414
GR.50	172	345	448
ASTM A572GR.42	145	290	414
GR.50	172	345	448
GR.60	207	414	517
ASTM A53 GR.A	103	207	331
GR.B	121	241	414
ASTM A135 GR.A	103	207	331
GR.B	121	241	414
ASTM A139 GR.A	103	207	331
GR.B	121	241	414
GR.C	145	290	414
GR.D	159	317	414
GR.E	179	358	455
API 5L GR.A 25	86	172	310
GR.A	103	207	331
GR.B	121	241	414
GR.X 42	145	290	414
GR.X46	159	317	434
GR.X 52	179	358	455
GR.X 56	193	386	490
GR.X 60	207	414	517

$$P_c = 347112 \left(\frac{t}{d_m} \right)^3 \quad (6.6)$$

Esta formula se aplica cuando d/t es mayor de 45 y P_c es menos de 3.92 MPa, también cuando el acero tiene un esfuerzo de fluencia de al menos de 186 MPa y la longitud entre elementos rigidizantes es de 6 diámetros o más.

6.2.5. Esfuerzos permisibles

Con relación a la presión interna, cabe señalar que una buena práctica consiste en limitar el esfuerzo actuante un 50% del esfuerzo de fluencia (f_y), bajo la presión máxima de diseño. El esfuerzo que produce el golpe de ariete más la presión interna no debe rebasar el 75% del esfuerzo de fluencia.

Los esfuerzos permisibles, de fluencia y de ruptura, de acuerdo con la especificación de la tubería, son los que se muestran en la Tabla 6.1

6.3. TUBERÍA ENTERRADA

Los esfuerzos predominantes en una tubería son de dos tipos: de membrana y de flexión. Los esfuerzos de membrana se refieren a las fuerzas internas resultantes que están alojadas en la superficie media del cascarón, mientras los esfuerzos de flexión se deben al peso de la tubería y fluido. En las tuberías enterradas los esfuerzos de flexión son mínimos debido al soporte continuo del suelo.

Las tuberías que operan bajo la acción de presión interna y carga externa, se deberán diseñar con la combinación mas desfavorable que se pueda presentar. Estas pueden alcanzar presiones exteriores máximas cuando la presión interna es mínima. A continuación se describen las expresiones para evaluar la deflexión vertical (pandeo), así como la carga total y sus respectivos límites de aceptación.

6.3.1. Determinación de la deflexión vertical

La deflexión vertical por el relleno en una tubería enterrada, se calculará por medio de la ecuación 6.7 (ver Figura 6.2). El valor obtenido, se compara con la deflexión permisible indica en la sección 6.3.3.

$$\Delta_c = \frac{D_1 K W_c r^3}{EI + 0.061 E' r^3} \quad (6.7)$$

donde:

- Δ_c es la deflexión de la tubería (mm)
- D_1 es el factor de retardo, puede tomarse un valor comprendido entre 1.25 y 1.50
- K es la constante de apoyo, un valor de 0.1 puede tomarse como práctico recomendado
- W_c es la carga por unidad de longitud de la tubería (N/mm)
- r es el radio del tubo (mm)
- E es el modulo de elasticidad del material de la tubería = 205,940 MPa
- I es el momento de inercia de la pared del tubo por unidad de longitud para tubo liso vale $t^3b/12$ (mm⁴)
- E' es el modulo de reacción del suelo (MPa, ver Tablas 6.2 y 6.3)

6.3.2. Análisis de pandeo

Una tubería enterrada puede colapsarse o pandearse como resultados de una inestabilidad elástica provocada por las cargas aplicadas al tubo. Las acciones externas calculadas en las secciones 5.3.1, 5.3.2 y 5.3.3 se suman y se comparan con la carga de pandeo permisible q_a (sección 6.3.3), de acuerdo a la expresión siguiente:

$$P_v + \gamma_w h_w + R_w \frac{W_c}{d_e} + \frac{W_L}{d_e} \leq q_a \quad (6.8)$$

donde:

- P_v es la presión de vacío interna = presión atmosférica – presión absoluta interior del tubo (MPa).
- h_w es la altura nivel de aguas freáticas al lomo de la tubería (mm)
- γ_w es la densidad del agua (9.81×10^{-6} N/mm³)
- R_w es el factor de flotación = $1 - 0.33 (h_w/h_r)$
- h_r es la altura del relleno a lomo de la tubería (mm)
- W_c es la carga vertical del suelo por unidad de longitud (N/mm)
- W_L es la carga viva sobre la tubería (N/mm)
- d_e es el diámetro exterior del tubo (mm)
- q_a es la carga de pandeo permisible (MPa)

Si el nivel de aguas freáticas está por debajo del nivel de la tubería, el término h_w se hace cero y el factor de flotación R_w es igual a la unidad.

6.3.3. Criterios límites de aceptación

La deflexión permisible de la tubería es del 5% del diámetro para evitar el colapso de la misma (el cual ocurre cuando se tiene un pandeo del 10 al 20 %)

La carga de pandeo permisible q_a , se determina mediante la siguiente expresión:

$$q_a = \frac{1}{F \cdot S} \left(\frac{32 R_w B' E' EI}{d_e^3} \right)^{1/2} \quad (6.9)$$

$$B' = \frac{1}{1 + (4\ell^{-0.2133h_r})} \quad (6.10)$$

donde:

- $F \cdot S$ es el factor de seguridad, que estará en función de la relación h/d_e : = 2.5 para $h_r/d_e \geq 2$ = 3.0 para $h_r/d_e < 2$
- h_r es la altura del relleno al lomo de la tubería (m)
- d_e es el diámetro exterior de la tubería (mm)

- R_w es el factor de flotación = $1 - 0.33 (h_w/h_r)$
- h_w es la altura desde el nivel de aguas freáticas al lomo de la tubería (mm)
- B' es el coeficiente empírico (adimensional)
- E' es el modulo de reacción del suelo (MPa)
- I es el momento de inercia de la pared del tubo por unidad de longitud $t^3b/12$ (mm⁴)

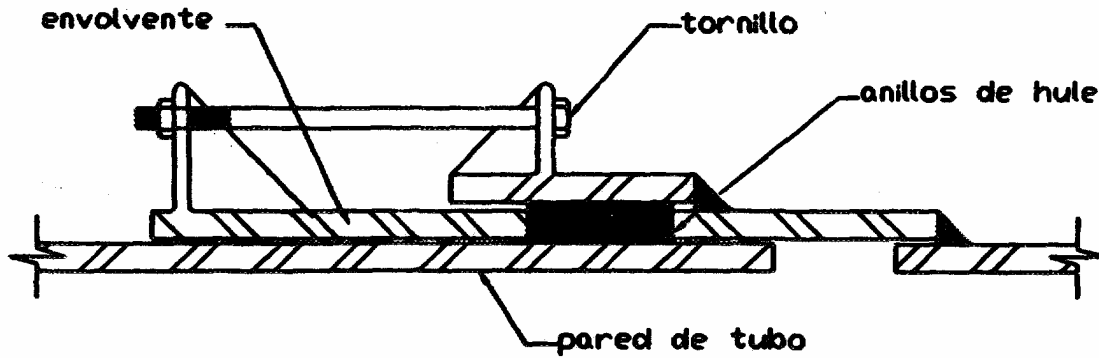


Figura 6.1 Junta de expansión

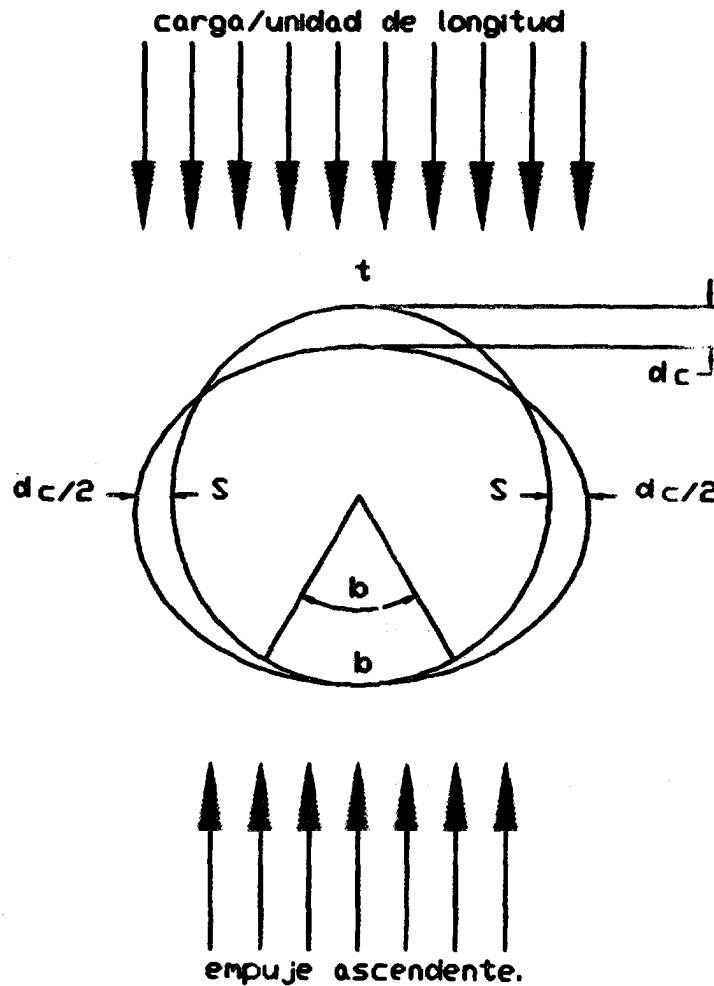


Figura 6.2 Deflexión vertical debido al relleno

Tabla 6.2 Valores promedio de los módulos de reacción del suelo (E') (para deflexión en tuberías)

Tipo de suelo / Material de relleno para la zona primaria de la tubería (Sistema de clasificación unificado) +	E' para grado de compactación del colchón, (kg/cm ²)		
	Ligero <85% Proctor <40% rel. den.	Moderado 85% - 85% Proctor 40% - 70% rel.den.	>85% Proctor >70% rel.den.
Suelos finos granulares (LL > 50) * / Suelos con plasticidad alta o media CH, MH, CH-MH	Los suelos de esta categoría requieren un análisis de ingeniería especial para determinar la densidad requerida, contenido de humedad y esfuerzo de compactación.		
Suelos finos granulares (LL > 50) * / Suelos con plasticidad alta a nula CL, ML, ML-CL, CL-CH, ML-MH, CON MENOS DEL 25% de partículas granulares irregulares.	13.51	27.03	67.56
Suelos finos granulares (LL > 50) * / Suelos con plasticidad alta a nula CL, ML, ML-CL, CL-CH, ML-MH, CON MENOS DEL 25% de partículas granulares gruesas	27.03	67.56	202.69
Suelo granular grueso con finos / GM, GC, SM, SC [‡] que contengan más del 12% de finos.			
Suelos granulares gruesos sin o con poco contenido de finos / GW, GP, SW, SP que contiene menos del 12% de finos	67.56	135.13	202.69
Roca triturada		202.69	
La exactitud esté en términos de la diferencia entre el porcentaje promedio de reflexión real y la deflexión predecida.	± 2%	± 1%	± 0.5%

+ Referirse a la tabla 4.7

* LL = Límite líquido

‡ O cualquier suelo que se encuentre dentro de estos límites que comience con uno de estos símbolos (por ejemplo:GM-GC,GC-SC).

NOTAS

1.- Los valores se aplican sólo para rellenos menores de 15m. (50ft).

2.- Para utilizarse sólo en deflexiones iniciales predecidas, el factor de deflexión retardada se deberá de aplicar para deflexiones muy grandes.

Tabla 6.3 Clasificación del suelo unificada

Símbolo	Descripción
GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, poca cantidad de finos o ausencia de los mismos.
GP	Gravas pobremente graduadas, mezclas de grava y arena, poca cantidad de finos o ausencia de los mismos.
GM	Gravas limosas, mezclas pobremente graduadas de grava - arena - limos.
GC	Gravas arcillosas, mezclas pobremente graduadas de grava - arena - arcilla.
SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava con poca cantidad de finos o ausencia de los mismos.
SP	Arenas pobremente graduadas, arenas con grava, poca cantidad de finos o ausencia de los mismos.
SM	Arenas limosas, mezclas pobremente graduadas arena - limo.
SC	Arenas arcillosas, mezclas pobremente graduadas arena - arcilla.
ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos o arenas arcillosas finas.
CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja o media.
MH	Limos inorgánicos, arena fina mitácea o diatomácea o suelos limosos, limos elásticos.
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas gruesas.
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad.
PT	Turba y otro suelo altamente orgánico.

6.4. TUBERÍA SUPERFICIAL

6.4.1. Cálculo de esfuerzos

6.4.1.1. Peso propio, agua y de los accesorios

Para determinar los esfuerzos, se debe considerar a la tubería como una viga simplemente apoyada. El esfuerzo debido al peso propio del tubo y del agua se obtiene empleando la expresión 6.11 para una carga uniformemente distribuida, siendo el momento máximo al centro del claro:

$$S_b = \frac{WL^2}{8S} \quad (6.11)$$

donde:

- W es la (masa del tubo+masa del agua+carga viva) xg (considerar como mínimo una masa viva de 0.05 N/mm) (N/mm)
- L es la separación entre apoyos (mm)
- S es el modulo de sección de la tubería (en mm³, ver Tabla 5.9)
- S_b es el esfuerzo actuante (MPa)

El esfuerzo ocasionado por los accesorios (válvulas), se calcula empleando la expresión 6.12 considerando una viga simplemente apoyada con una carga concentrada, por lo que se recomienda reducir la separación entre apoyos donde se va a situar la válvula.

$$S_b = \frac{Pab}{LS} \quad (6.12)$$

donde:

- P es el asa de la válvula más masa de las bridas (N)
- a, b es la distancia de la válvula a los apoyos adyacentes (mm)
- L es la separación ente apoyos (mm)
- S es el módulo de sección de la tubería (mm³)

El esfuerzo total en el tramo donde se ubiquen válvulas o accesorios, será la suma del esfuerzo provocado por la masa del tubo y del agua más el esfuerzo de la masa del accesorio (fórmulas 6.11 y 6.12, respectivamente).

El esfuerzo y la flecha en la tubería están en función directa de la separación entre apoyos. La separación práctica en la tubería de acero está limitada más por la lecha permisible (L/360) que por el esfuerzo permisible del material.

6.4.1.2.Temperatura

Debido a los cambios de temperatura, se presentan esfuerzos longitudinales en la tubería que son transferidos a los puntos de apoyo que restringen el movimiento axial. Los esfuerzos se calculan cuando la temperatura adquiere tanto su valor máximo (expansión) como su valor mínimo (contracción). Este esfuerzo se calcula con la siguiente expresión:

$$S_{LT} = E\alpha(T_2 - T_1) \quad (6.13)$$

donde:

- S_{LT} es el esfuerzo longitudinal por gradiente de temperatura (MPa)
- E es el módulo de elasticidad del acero (MPa)
- α es el coeficiente de expansión térmico unitario por °K (11.7×10^{-6})
- T_2 es la temperatura máxima o mínima de operación (°K)
- T_1 es la temperatura promedio del lugar (°K)

Para el cálculo de esfuerzo longitudinal en operación, se recomienda como mínimo, tomar un gradiente de temperatura ($T_2 - T_1$) de 20 °K. Se recomienda también efectuar un análisis considerando la tubería vacía durante el proceso de construcción, resultando ésta situación más crítica que cuando la tubería conduce agua.

6.4.1.3.Presión

El esfuerzo longitudinal ocasionado por la presión interna entre dos apoyos que restringen el movimiento axial es igual a:

$$S_L = \mu \frac{P_i d_e}{2t} \quad (4.14)$$

donde:

- S_L es el esfuerzo longitudinal en por presión interna (MPa)
- μ es el coeficiente de Poisson para el acero (0.3)
- P_i es la presión interna en (MPa)
- d_e es el diámetro exterior de la tubería en (mm)
- t es el espesor de la tubería en (mm)

6.4.1.4.Sismo

El efecto del sismo se evalúa tomando en cuenta la carga uniforme que se obtiene mediante las expresiones de la sección 5.4.3, aplicada a la tubería, considerándola como una viga simplemente apoyada en dirección horizontal, obteniendo los esfuerzos mediante la fórmula:

$$S_{bs} = \frac{WL^2}{8S} \quad (6.15)$$

donde:

- S_{bs} es el esfuerzo flexionante por sismo (MPa)
- W es la carga horizontal uniforme provocada por el sismo, obtenida mediante las expresiones de la sección 5.4.3 (N/mm)
- L es la separación entre apoyos (mm)
- S es el módulo de sección de la tubería (mm³)

6.4.1.5. Viento

La carga uniforme obtenida mediante las expresiones para viento de la sección 5.4.4, se aplica en dirección transversal de la tubería considerándola como una viga simplemente apoyada en dirección horizontal, los esfuerzos máximos se calculan por medio de la expresión siguiente:

$$S_{bv} = \frac{W_v L^2}{8S} \quad (6.16)$$

donde:

- S_{bv} es el esfuerzo máximo flexionante debido a viento (MPa)
- W_v es la carga provocada por el viento, que se obtiene de las expresiones por el viento sección 5.4.4 (N/mm)
- L es la separación entre los apoyos (mm)
- S es el modulo de sección de la tubería (mm³)

6.4.2. Combinación de esfuerzos

Para el cálculo de los esfuerzos actuantes deberán realizarse las siguientes combinaciones de carga:

- a) Masa de la tubería, más masa del agua y accesorios, más carga viva, más presión interna.
- b) Masa de la tubería más masa del agua y accesorios más carga viva, más presión interna, más cargas accidentales (sismo o viento).
- c) Masa de la tubería, mas masa del agua y accesorios, más carga viva, más presión interna, más carga por variación de temperatura, más cargas accidentales (sismo o viento).

6.4.3. Determinación de los esfuerzos permisibles

En la determinación de los esfuerzos permisibles en la tubería, se observarán las recomendaciones indicadas en 6.2.5, así como lo establecido por la A.P.I., para las combinaciones de cara siguientes:

- a) Para la combinación de cargas indicada en (6.4.2.a) el esfuerzo en la tubería no deberá rebasar el valor de 62.5% del punto de fluencia mínimo especificado del material.
- b) Para la combinación de carga indicada en (6.4.2.b) el esfuerzo en la tubería no deberá rebasar el 80% del punto de fluencia mínimo especificado del material.
- c) Para la combinación de cargas indicada en (6.4.2.c) el esfuerzo en la tubería no deberá rebasar el 100% del punto de fluencia mínimo especificado del material.

6.5. SOPORTERIA

Las tuberías podrán apoyarse de varias maneras, dependiendo del diámetro de la tubería, de las condiciones topográficas y de operación, asimismo, los soportes deberán diseñarse para resistir las fuerzas provocadas por efecto de la variación de temperatura, fuerzas sísmicas, masa propia, viento o por una combinación de ellas.

6.5.1. Tipos de soporte

El tipo de soporte seleccionado, esta en función de las condiciones técnicas, económicas o de instalación. Los soportes podrán ser fijos o móviles, o una combinación de ambos según se requiera. Los apoyos fijos usualmente se denominan atraques y a los apoyos móviles se conocen como silletas.

6.5.2. Claros entre soportes

La longitud máxima entre apoyos está en función de la flecha máxima permisible por flexión que pueda presentarse en la tubería. La deformación en cualquier punto, depende de la longitud del claro, de las condiciones de apoyo, de las diferentes condiciones de cargas verticales y de la rigidez de la tubería.

Debido a la gran variedad de condiciones y combinaciones de carga que pueden existir; para la determinación de la flecha podrán utilizarse expresiones para claros simplemente apoyados.

El comportamiento adecuado de un sistema sujeto a diferentes condiciones de carga, se puede lograr mediante el control de sus deformaciones, para lo cual se tomará un valor permisible de $L/360$, siendo éste de uso común para estructuras de acero, las cuales se pueden dañar con deformaciones mayores. En la Tabla 6.4 se muestran claros prácticos para diferentes diámetros y espesores de tubería soportadas sobre silletas.

6.5.2.1. Cálculo de la flecha

La flecha máxima deberá ser calculada en función de las condiciones de apoyo de la tubería y las cargas a que este sometida. En el caso de tubería simplemente apoyada con carga uniforme la flecha al centro del claro puede calcularse con:

$$Y = \frac{5WL^4}{384EI} \quad (6.17)$$

donde:

- Y es la flecha máxima al centro del claro (mm)
- W es la carga o masa uniforme por unidad de longitud (N/mm)
- L es la distancia entre apoyos (mm)
- E es el módulo de elasticidad del material (MPa)
- I es el momento de inercia de la sección transversal de la tubería (mm⁴)

Para el cálculo de la flecha de una tubería con extremos restringidos y carga uniforme, el valor obtenido en la ecuación (6.17) deberá multiplicarse apoyada con claros iguales se utilizará un factor de 0.6. Si las condiciones de la tubería difieren de las mencionadas, la flecha se calcula usando expresiones que impliquen las condiciones reales.

6.5.2.2. Pendiente mínima

El perfil de la tubería deberá tener una pendiente mínima, con el fin de que drene libremente, evitando la generación de bolsas de aire, esto es, cada soporte tendrá una elevación diferente que la anterior, la cual depende de la flecha al centro del claro entre ellos; un valor práctico recomendado es el siguiente:

$$N = \frac{4Y}{L} \quad (6.18)$$

donde:

- N es la pendiente (adimensional)
- L es la distancia entre apoyos (mm)
- Y es la flecha calculada en (mm, según fórmula 6.17)

Tabla 6.4 Claros para tubería simplemente apoyada con 120 grados de contacto con silleta

ESPESOR (pulg y mm)										
	3/16	1/4	6/16	3/8	7/16	1/2	6/8	3/4	7/8	1
	4.73	.36	7.938	9.525	11.11	12.7	15.87	19.05	22.22	26.4
					3		5		5	
DIAM. NOM.	Claros L									
(pulg)	(mts)									
6	11	12	13							
8	12	13	14							
10	12	13	14							
12	12	13	14							
14	12	13	14							
16	12	14	15							
18	12	14	15	16						
20	13	14	15	16						
22	13	14	16	16						
24	13	15	16	17	18	18				
26	13	15	16	17	18	19				
28	13	15	16	17	18	19				
30	13	15	16	17	18	19				
32	13	15	16	17	19	20				
34	13	15	16	18	19	20				
36	13	15	16	18	19	20	21			
38	13	15	17	18	19	20	21			
40	13	15	17	18	19	20	22			
42	13	15	17	18	19	20	22			
45		16	17	18	19	20	22			
48		16	17	18	20	20	22	24		
51		16	17	18	20	21	23	24		
54		16	17	19	20	21	23	24		
57		16	17	19	20	21	23	24		
60		16	17	19	20	21	23	24		
63		16	17	19	20	21	23	25		
66		16	17	19	20	21	23	25	26	27
72		16	18	19	20	21	23	25	27	28
78			18.	19	20	22	23	25	27	28
84			18	19	20	22	24	26	27	29
90			18	19	20	22	24	26	27	29
96			18	19	21	22	24	26	27	29
102			18	19	21	22	24	26	28	29
108				20	21	22	24	26	28	29
114				20	21	22	24	26	28	30
120					21	22	24	27	28	30'
126					21	22	25	27	28	30
132					21	22	25	27	28	30
138					21	22	25	27	29	30
144					21	23	25	27	29	30

6.5.2.3. Tubería inclinada

La separación entre apoyos, medida en proyección horizontal a la tubería, para una superficie inclinada y para los diferentes diámetros de tubería, se da en la Tabla 6.4.

6.5.3. Silletas

La soportaría a base de silletas, consiste generalmente en una base de concreto cimentado en una zapata; la tubería se apoya directamente en la parte superior de la silleta, la cual debe tener un área cóncava (ver Fotografía 6.1). El espacio anular entre esta área y la tubería, debe rellenarse con un material blando para proporcionar una superficie de contacto suave y uniforme, como se muestra en la Figura 6.3. Se recomienda que el ángulo de la superficie de contacto sea de 1.57 rad a 2.09 rad (90° a 120°). En los puntos donde se traten de evitar los desplazamientos laterales, la tubería llevara una abrazadera que estará anclada en la silleta de concreto por medio de pernos. Este tipo de soporte puede ser instalado en forma continua, uniformizando la separación de ellos; de tal manera que las deformaciones entre apoyos sean menores que las flechas permisibles. En la Tabla 6.4 se muestran los claros recomendados.

6.5.4. Tuberías sin anillos rigidizantes

Para la condición de tuberías apoyadas sobre silletas, la mayor concentración de esfuerzos esta localizada en la zona adyacente a la silleta. Cuando dichos esfuerzos se encuentran dentro de los permisibles, la tubería podrá apoyarse directamente sobre la silleta sin la utilización de anillo rigidizante, procurando que el ángulo de la superficie de contacto sea entre 1.57 rad y 2.09 rad (90° a 120°). Si se trata de tuberías de diámetro de 0.914 m o menores y el esfuerzo sobrepasa el permisible, la solución es aumentar el espesor, resultando una mayor rigidez. El aumento en el espesor puede ser en la longitud total de la tubería o únicamente una longitud igual a dos diámetros más el ancho de la silleta, verificando que fuera de esta zona de cambio de espesor los esfuerzos estén dentro de la tolerancia. En el caso diámetros mayores a 0.914 m la solución más económica es utilizar anillos rigidizantes.



Fotografía 6.1

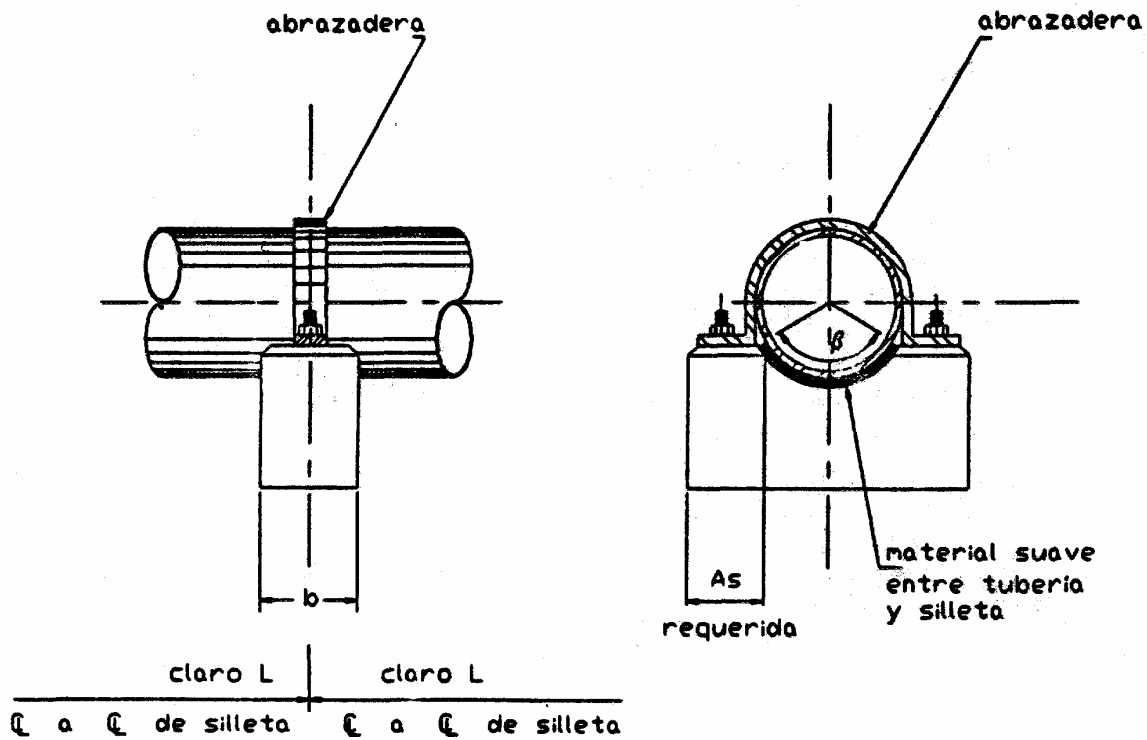


Figura 6.3 Detalle de apoyo sobre silleta de concreto

El esfuerzo total de la tubería en la zona del apoyo, se calcula de la siguiente manera:

$$S_t = S_b + S_L \quad (6.19)$$

$$S_b = S_f + \mu S_p \quad (6.20)$$

$$S_f = \frac{W_T L^2}{12S} \quad (6.21)$$

$$S_p = \frac{Pd_e}{2t} \quad (6.22)$$

$$S_A = \left[\frac{KF}{t^2} \right] \ln \left(\frac{r}{t} \right) \quad (6.23)$$

donde:

S_t es el esfuerzo total en la zona del apoyo (MPa)

S_b es el esfuerzo de flexión total en el apoyo cuando el movimiento axial está restringido, para tuberías no restringidas el término μS_p es igual a cero (MPa)

S_f es el esfuerzo en los apoyos debido a flexión, considerando la tubería como una viga continua (MPa)
 S_p es el esfuerzo circunferencial (MPa)
 P es la presión interna
 d_e es el diámetro exterior (mm)
 μ es el modulo de Poisson (0.3)
 W es la masa del tubo más masa del agua por unidad de longitud (N/mm)
 L es la separación entre apoyos (mm)
 S es el modulo de sección de la tubería (mm³)
 S_A es el esfuerzo local en la tubería debido a la reacción en el apoyo (MPa)
 F es la reacción total en el apoyo (N)
 r es el radio del tubo (mm)
 t es el espesor del tubo (mm)
 K es el factor de transferencia $[0.02 - 0.00688 (\beta - (\pi/2))]$, donde β es al ángulo de apoyo en rad (ver Figura 6.3)

El máximo esfuerzo de la tubería en la zona del apoyo deberá ser menor que el permisible indicado en el punto 6.4.3.

El efecto de otro tipo de cargas tales como; cargas vivas, fuerzas producidas por el viento, así como los efectos sísmicos, deberán sumarse al esfuerzo en la zona del apoyo. Utilizando para el cálculo la ecuación 6.2.1, donde W será igual a la carga uniforme obtenida mediante las expresiones de la sección 5.4.4 o 5.4.3 de este manual.

6.5.5. Tuberías con anillos rigidizantes

Cuando se presentes esfuerzos en la tubería en la zona de apoyo que excedan a los permisibles, una solución será incrementar el espesor en la tubería en dicha zona, o utilizar anillos rigidizantes. Cuando se tengan rigidizantes con los apoyos (ver Figura 6.4).

Las tuberías con anillos rigidizantes se muestran en las Figuras 6.5 a 6.8 y en las Fotografías 6.2 y 6.3.

Las Figuras 6.9 a 6.12 muestran un procedimiento para obtener los elementos mecánicos internos en una tubería, de acuerdo a las reacciones en el apoyo ocasionado por las diferentes condiciones de carga (carga viva, carga muerta, sismo, viento), donde se observa la variación de los elementos mecánicos con diferentes ángulos de contacto entre la tubería y la silleta. En estas Tablas T es la tensión, M es el momento flexionante y V es la fuerza cortante radial en el anillo. Se recomienda que la superficie de contacto sea de 1.57 rad a 2.09 rad (90° a 120°).

6.5.5.1. Esfuerzos en la tubería en la zona del anillo

Los esfuerzos máximos radiales, combinados en el tubo en la zona del anillo rigidizante, están dados por:

$$S_r = \left(\frac{d_e}{2 \times 10^6 t} \right) (W + qh) \quad (6.24)$$

donde:

- S_r es el esfuerzo máximo combinado en la pared de la tubería (MPa)
- W es el peso de la pared de la tubería por unidad de área (Pa)
- q es la masa específica del agua (N/m^3)
- h es la columna de agua sobre el lomo interior de la tubería (m.c.a.)
- d_e es el diámetro exterior de la tubería (mm)
- t es el espesor de pared de la tubería (mm)

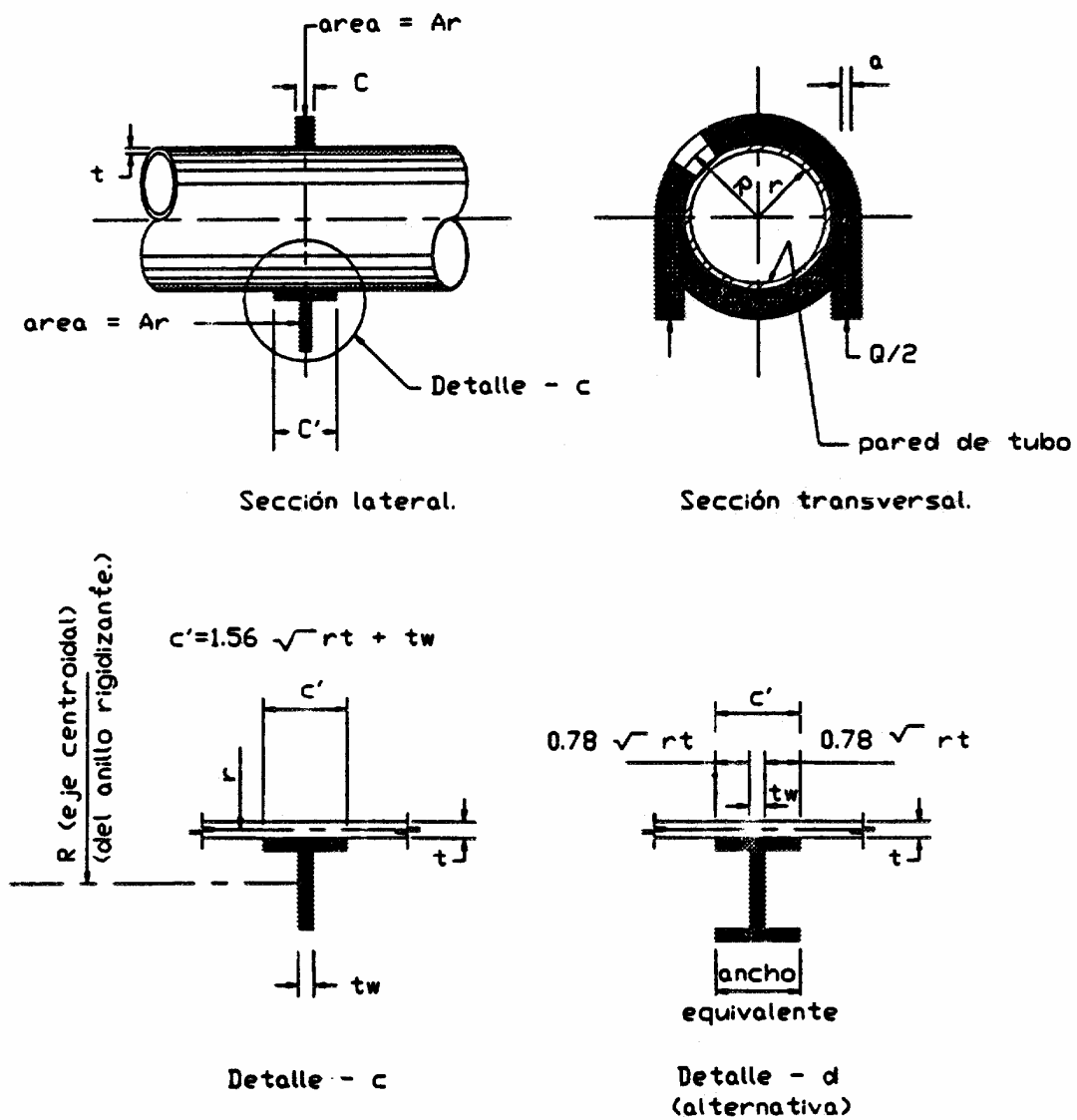


Figura 6.4 Tubería y anillo rigidizante

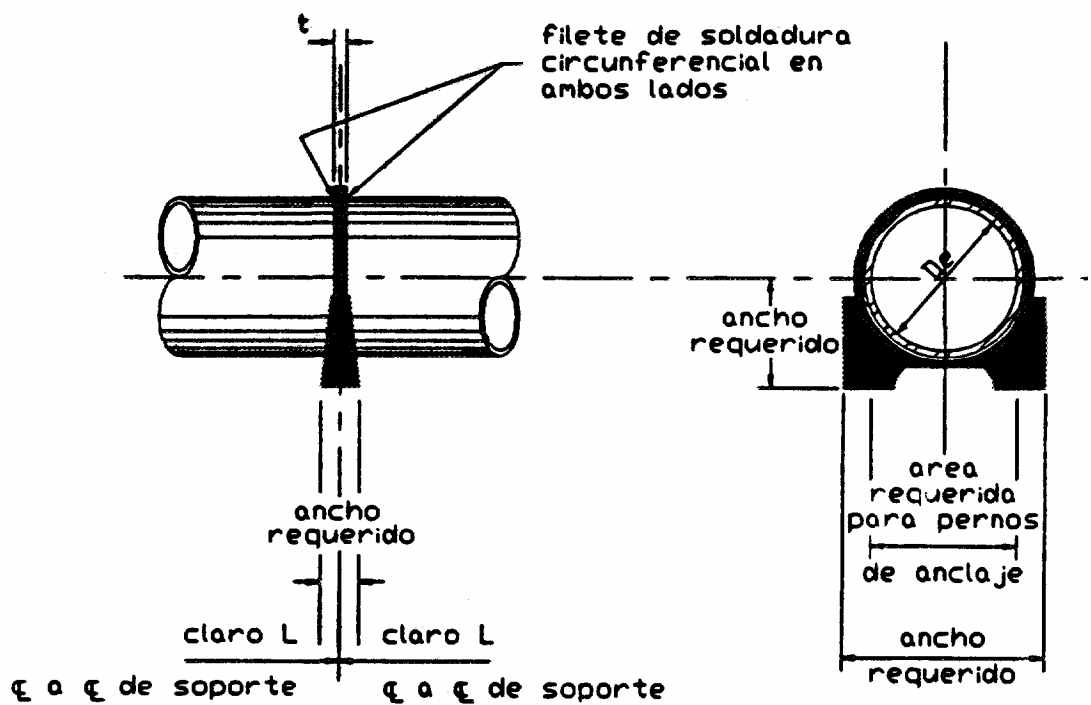


Figura 6.5 Detalle de soporte tipo anillo rigidizante para tubería pequeña

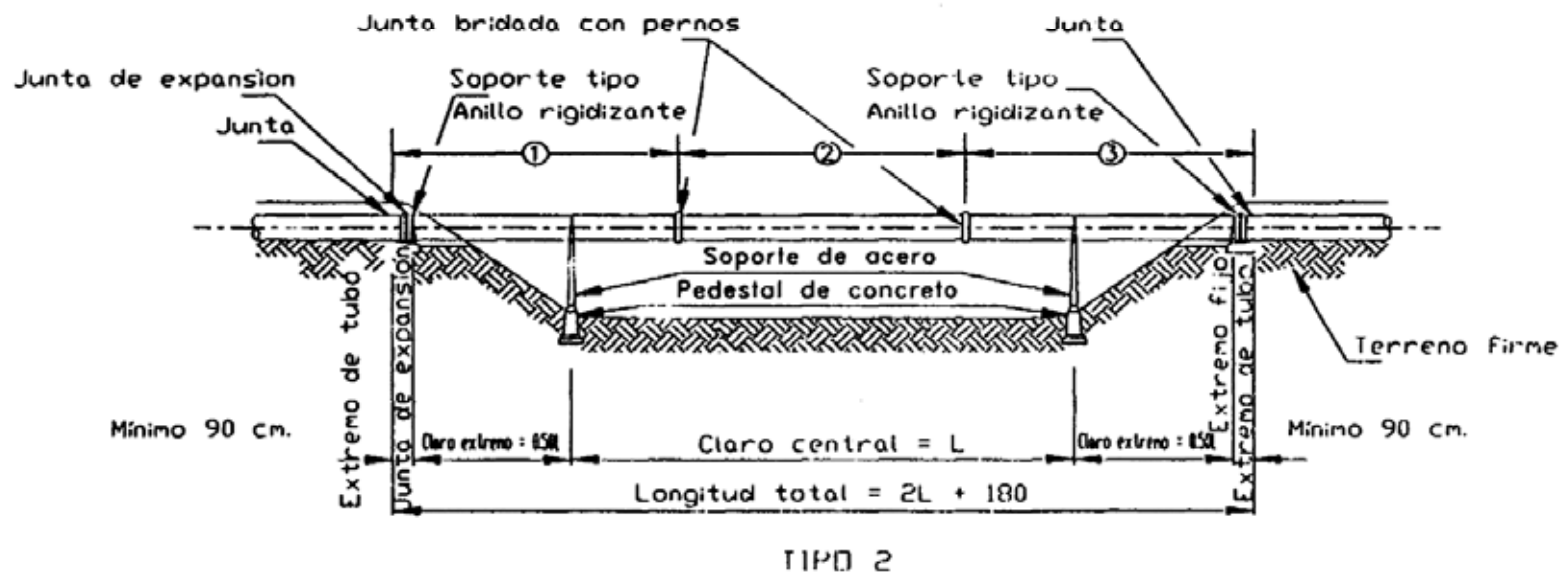
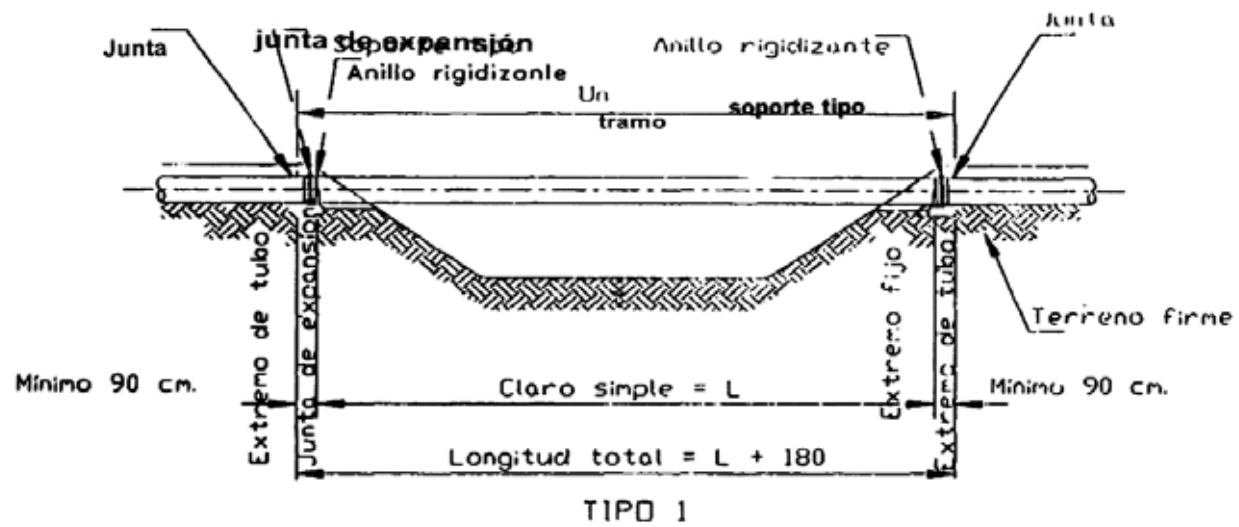
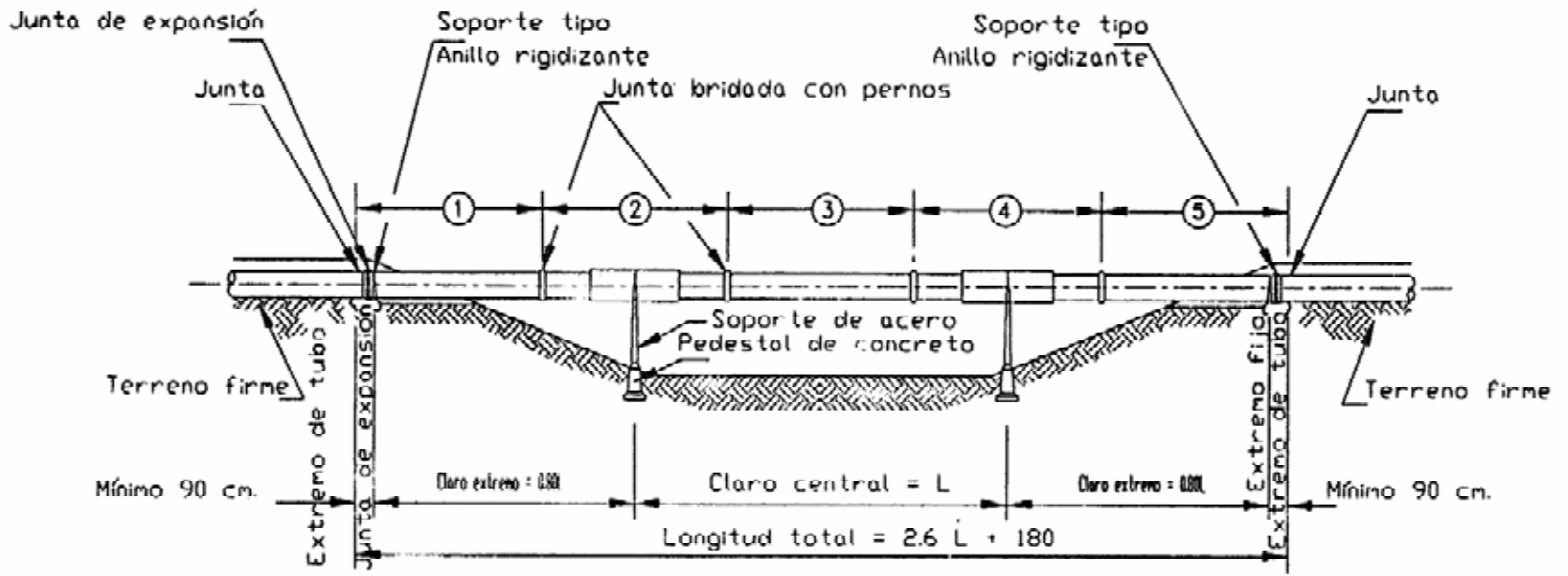
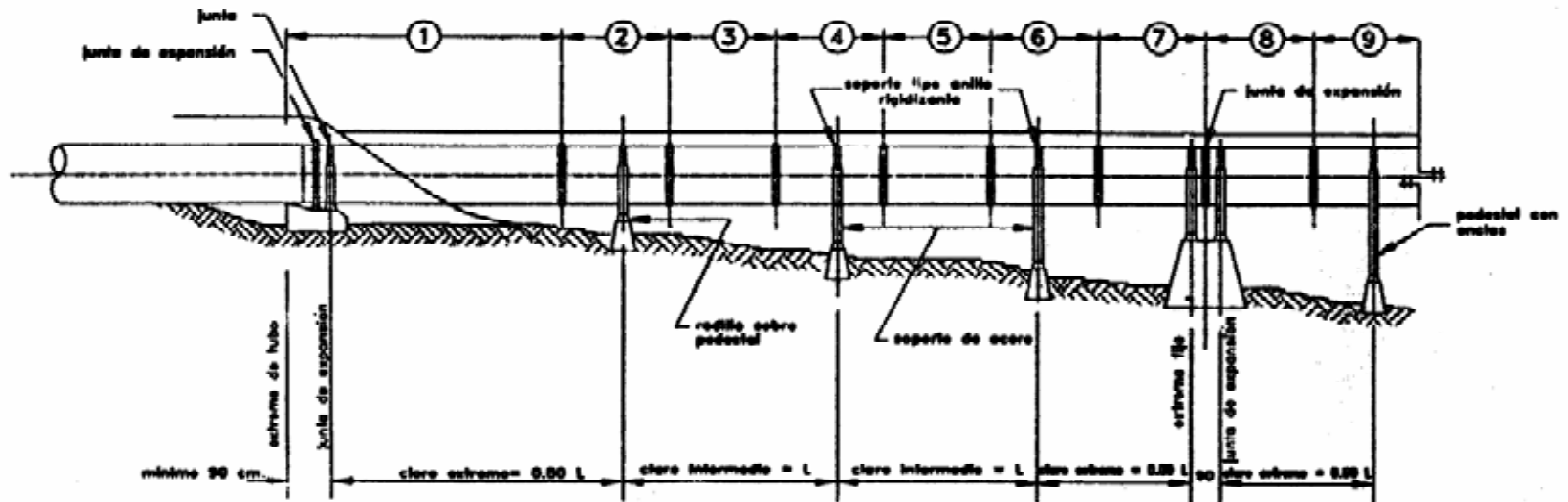


Figura 6.6 Claros típicos para tubería



TIPO 3

Figura 6.7 Claros típicos para tubería



TIPO 4

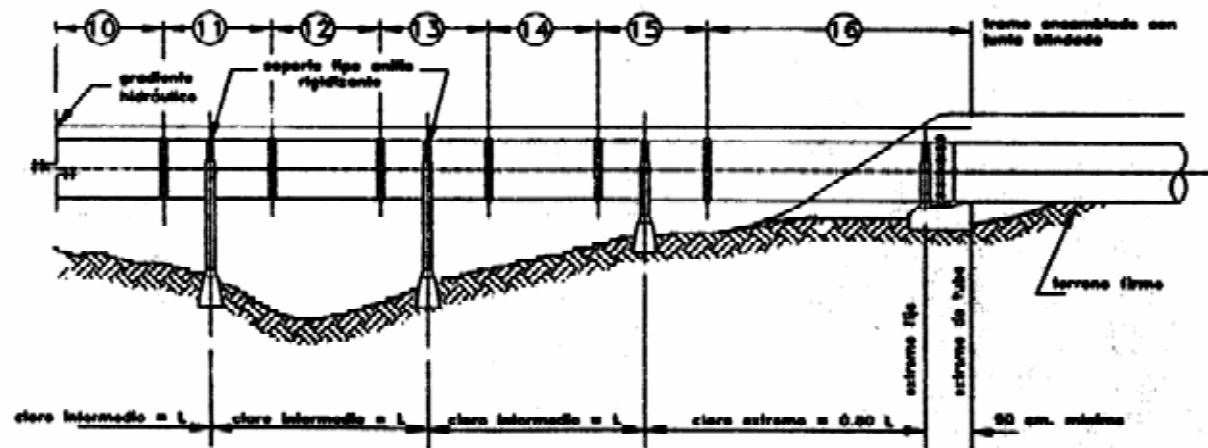
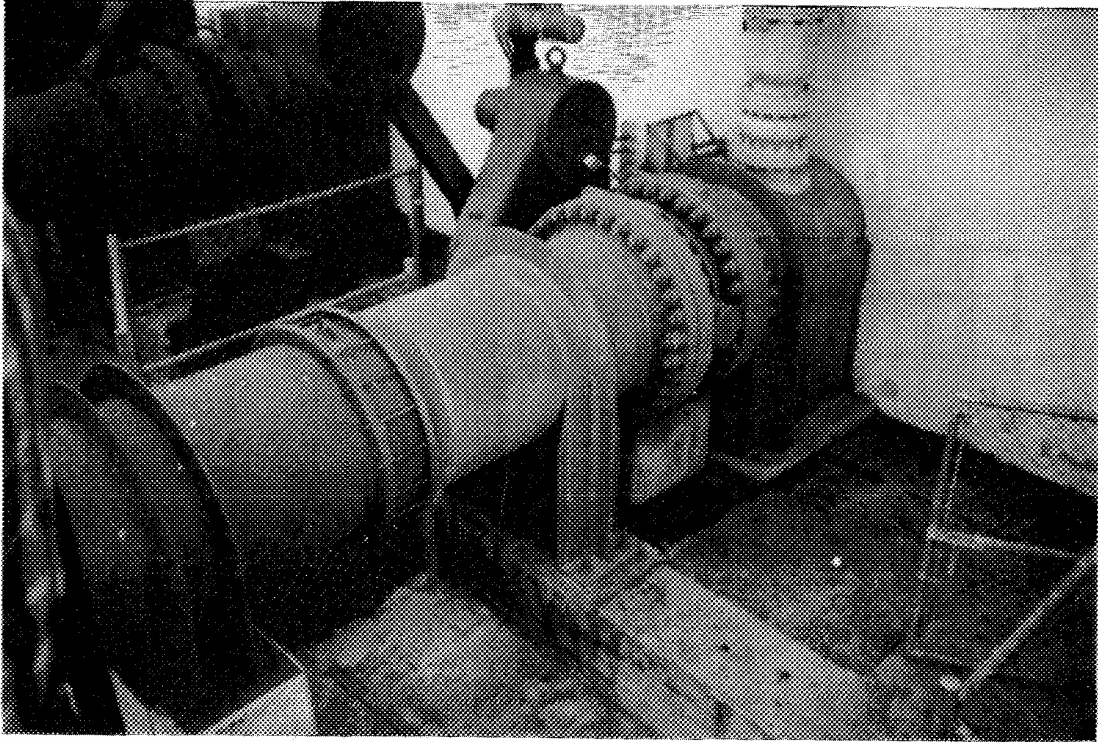
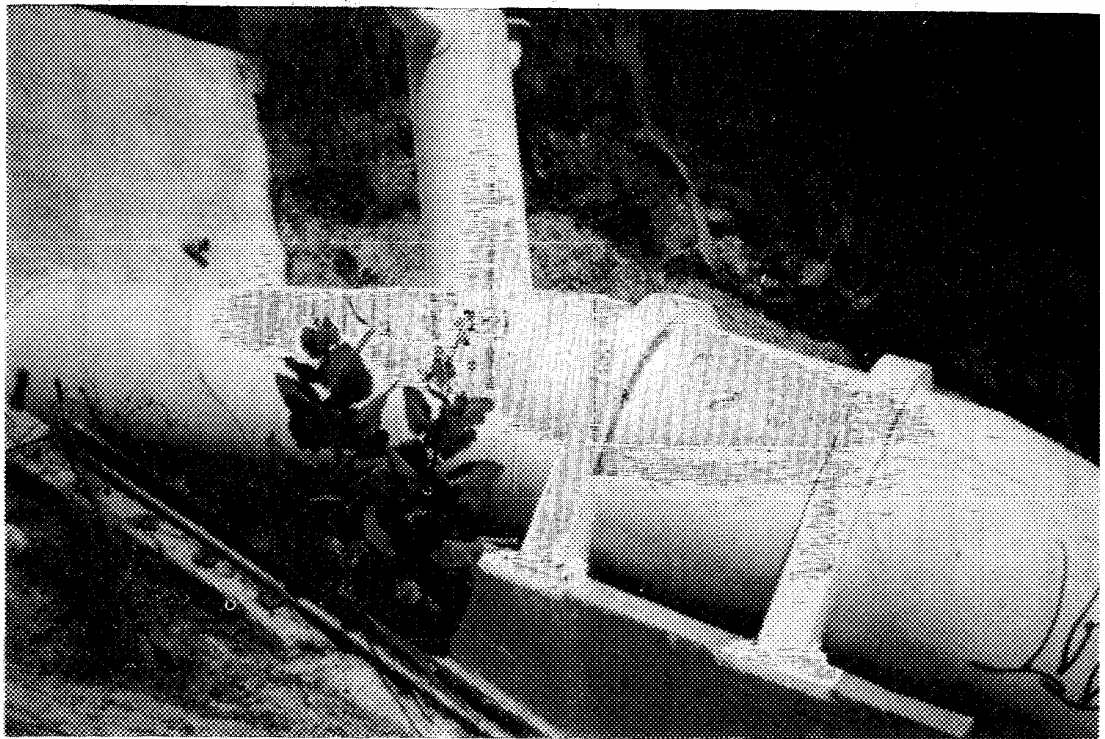


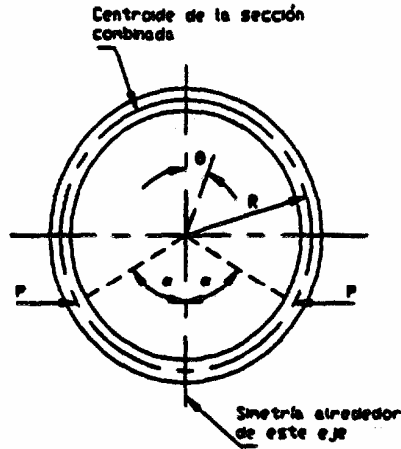
Figura 6.8 Claros típicos para tubería



Fotografía 6.2



Fotografía 6.3



$$0 \leq \theta \leq \pi - \alpha$$

$$\pi - \alpha \leq \theta \leq \pi$$

$$M = \frac{PR}{\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha - \alpha \cos \theta + \cos \theta \sin \alpha \cos \alpha) = PK_1$$

$$M = PR \left[\frac{1}{\pi} (\sin \alpha - \alpha \cos \alpha - \alpha \cos \theta + \cos \theta \sin \alpha \cos \alpha) + \cos \theta + \cos \alpha \right] = PK_1$$

$$T = -\frac{P}{\pi} \cos \theta (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) = PK_2$$

$$T = P \left[-\frac{1}{\pi} \cos \theta (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) + \cos \theta \right] = PK_2$$

$$S = -\frac{P}{\pi} \sin \theta (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) = PK_3$$

$$S = P \left[-\frac{1}{\pi} \sin \theta (\alpha - \sin \alpha \cos \alpha) + \sin \theta \right] = PK_3$$

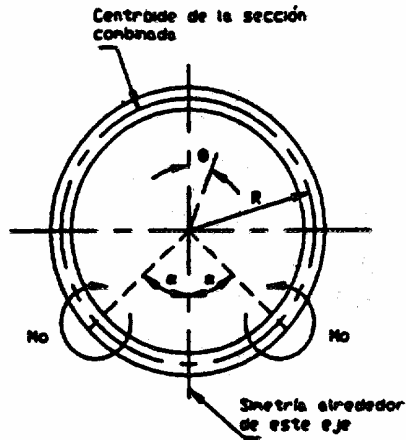
$$2\alpha = 180^\circ$$

$$2\alpha = 120^\circ$$

$$2\alpha = 90^\circ$$

θ	K_1	K_2	K_3	θ	K_1	K_2	K_3	θ	K_1	K_2	K_3
0°	-0.181 690	-0.500 000	0	0°	-0.086 503	-0.195 501	0	0°	-0.042 543	-0.090 845	0
15°	-0.164 653	-0.482 963	-0.129 410	15°	-0.079 842	-0.188 840	-0.050 699	15°	-0.039 447	-0.087 750	-0.023 512
30°	-0.114 703	-0.433 013	-0.250 000	30°	-0.060 311	-0.169 309	-0.097 751	30°	-0.030 372	-0.078 674	-0.045 423
45°	-0.035 244	-0.353 553	-0.353 553	45°	-0.029 242	-0.138 240	-0.138 240	45°	-0.015 935	-0.064 237	-0.064 237
60°	+0.069 310	-0.250 000	-0.433 013	60°	+0.011 247	-0.097 761	-0.169 309	60°	+0.002 890	-0.045 423	-0.078 674
75°	+0.188 900	-0.129 410	-0.482 963	75°	+0.058 398	-0.050 599	-0.188 840	75°	-0.024 790	-0.023 512	-0.087 750
90°	+0.318 310	0	-0.500 000	90°	+0.108 998	0	-0.195 501	90°	-0.042 302	0	-0.090 845
90°	+0.318 310	0	+0.500 000	105°	+0.159 597	+0.050 599	-0.188 840	105°	-0.071 815	+0.023 512	-0.087 750
105°	+0.188 900	-0.129 410	+0.482 963	120°	+0.206 748	-0.097 761	-0.169 309	120°	-0.093 725	+0.045 423	-0.078 674
120°	-0.069 310	-0.350 000	+0.433 013	120°	+0.206 748	-0.402 249	-0.696 716	135°	+0.112 540	+0.064 237	-0.064 237
135°	-0.035 244	-0.353 553	+0.353 553	135°	+0.040 131	-0.568 867	+0.568 887	135°	-0.112 540	-0.642 870	+0.642 870
150°	-0.114 703	-0.433 013	+0.250 000	150°	-0.087 719	-0.696 716	+0.402 249	150°	-0.031 942	-0.787 351	+0.454 577
165°	-0.164 653	-0.482 963	+0.129 410	165°	-0.168 090	-0.777 086	+0.208 220	165°	-0.122 767	-0.878 176	+0.235 307
180°	-0.181 690	-0.500 000	0	180°	-0.195 501	-0.804 499	0	180°	-0.153 746	-0.909 155	0

Figura 6.9 Coeficientes para calcular los elementos mecánicos M, T, y S en la sección combinada del anillo, cuando existen reacciones horizontales del apoyo



$$0 \leq \theta \leq \pi - \alpha$$

$$\pi - \alpha \leq \theta \leq \pi$$

$$M = \frac{M_0}{\pi} (\alpha - 2 \cos \theta \operatorname{sen} \alpha) = M_0 K_1$$

$$M = M_0 \left[\frac{1}{\pi} (-2 \cos \theta \operatorname{sen} \alpha + \alpha) - 1 \right] = M_0 K_1$$

$$T = -\frac{2M_0}{\pi R} \cos \theta \operatorname{sen} \alpha = \frac{M_0}{R} K_2$$

$$T = -\frac{2M_0}{\pi R} \cos \theta \operatorname{sen} \alpha = \frac{M_0}{R} K_2$$

$$S = -\frac{2M_0}{\pi R} \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \alpha = \frac{M_0}{R} K_3$$

$$S = -\frac{2M_0}{\pi R} \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \alpha = \frac{M_0}{R} K_3$$

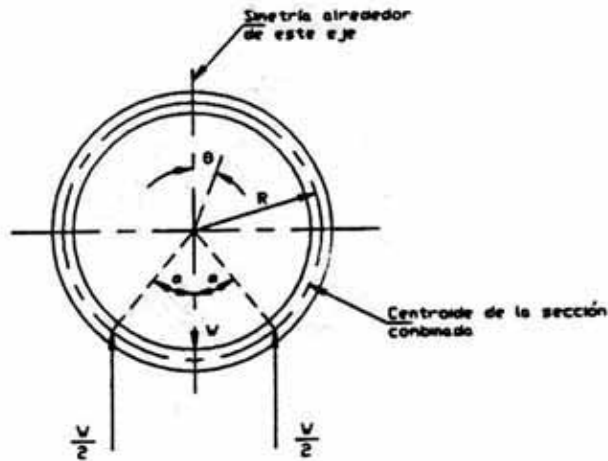
$2\alpha = 180^\circ$

$2\alpha = 120^\circ$

$2\alpha = 90^\circ$

θ	K_1	K_2	K_3	θ	K_1	K_2	K_3	θ	K_1	K_2	K_3
0°	-0.136 620	-0.636 620	0	0°	-0.217 996	-0.551 329	0	0°	-0.200 158	-0.450 158	0
15°	-0.114 928	-0.614 928	-0.164 769	15°	-0.199 210	-0.532 543	-0.142 694	15°	-0.184 819	-0.434 819	-0.116 510
30°	-0.051 329	-0.551 329	-0.318 310	30°	-0.114 132	-0.477 465	-0.275 664	30°	-0.139 848	-0.389 848	-0.225 079
45°	+0.049 842	-0.450 158	-0.450 158	45°	-0.056 515	-0.389 848	-0.389 848	45°	-0.068 310	-0.318 310	-0.318 310
60°	+0.181 690	-0.318 310	-0.551 324	60°	+0.057 669	-0.275 664	-0.477 465	60°	+0.024 921	-0.225 079	0.389 848
75°	+0.335 231	-0.164 769	-0.614 928	75°	+0.190 639	-0.142 694	-0.532 543	75°	+0.133 490	-0.116 510	-0.434 819
90°	+0.500 000	0	-0.636 620	90°	+0.333 333	0	-0.551 329	90°	+0.250 000	0	-0.450 158
90°	-0.500 000	0	-0.636 620	105°	+0.476 028	+0.142 694	-0.532 543	105°	+0.366 510	+0.116 510	-0.434 819
105°	-0.335 231	+0.164 769	-0.614 928	120°	+0.608 998	+0.275 664	-0.477 465	120°	+0.475 079	+0.225 079	-0.389 848
120°	-0.181 690	+0.318 310	-0.551 329	120°	-0.391 002	+0.275 664	-0.477 465	135°	+0.568 310	+0.318 310	-0.318 310
135°	-0.049 842	+0.450 158	-0.450 158	135°	-0.276 818	+0.389 848	-0.389 848	135°	-0.431 690	+0.318 310	-0.318 310
150°	+0.051 329	+0.551 329	-0.318 310	150°	-0.189 202	+0.477 465	-0.275 664	150°	-0.360 152	+0.389 848	-0.225 079
165°	+0.114 928	+0.614 928	-0.164 769	165°	-0.134 124	+0.532 543	-0.142 694	165°	-0.315 181	+0.434 819	-0.116 510
180°	+0.136 620	+0.636 620	0	180°	-0.115 338	+0.551 329	0	180°	-0.299 842	+0.450 158	0

Figura 6.10 Coeficientes para calcular los elementos mecánicos M.T. y S en la sección combinada del anillo, cuando existen momentos circunferenciales provocados por el apoyo



$$0 \leq \theta \leq \pi - \alpha$$

$$\pi - \alpha \leq \theta \leq \pi$$

$$M = \frac{VR}{2\pi} [\alpha \sin \alpha + \cos \alpha - \sin^2 \alpha \cos \theta - 1] = VR K_1$$

$$T = -\frac{V}{2\pi} \sin^2 \alpha \cos \theta = VK_2$$

$$S = -\frac{V}{2\pi} \sin^2 \alpha \sin \theta = VK_3$$

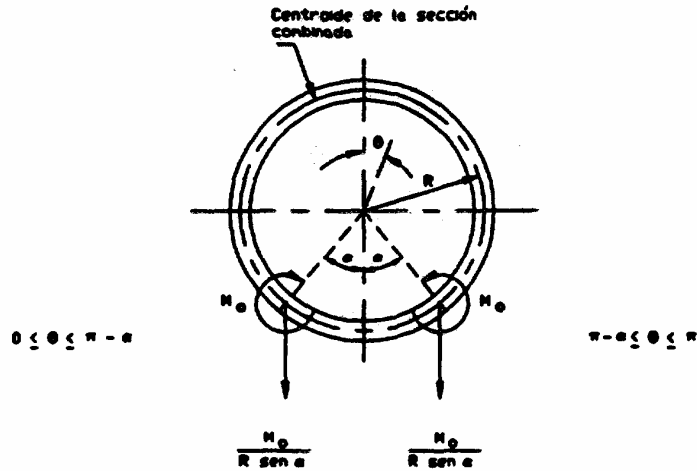
$$M = \frac{VR}{2} \left[\frac{1}{\pi} (\alpha \sin \alpha + \cos \alpha - \sin^2 \alpha \cos \theta - 1) - \sin \alpha + \sin \theta \right] = VR K_1$$

$$T = -\frac{V}{2} \left(\frac{\sin^2 \alpha \cos \theta}{\pi} - \sin \theta \right) = VK_2$$

$$S = -\frac{V}{2} \left(\frac{\sin^2 \alpha \sin \theta}{\pi} + \cos \theta \right) = VK_3$$

$2\alpha = 180^\circ$			$2\alpha = 120^\circ$			$2\alpha = 90^\circ$					
θ	K_1	K_2	K_3	θ	K_1	K_2	K_3	θ	K_1	K_2	K_3
0°	-0.068 310	-0.159 155	0	0°	-0.054 606	-0.119 366	0	0°	-0.037 805	-0.079 577	0
15°	-0.062 887	-0.153 732	-0.041 192	15°	-0.050 539	-0.115 299	-0.030 894	15°	-0.035 093	-0.076 866	-0.020 596
30°	-0.046 987	-0.137 832	-0.079 577	30°	-0.038 614	-0.103 374	-0.059 683	30°	-0.027 143	-0.068 916	-0.039 789
45°	-0.021 694	-0.112 540	-0.112 540	45°	-0.019 645	-0.084 405	-0.084 405	45°	-0.014 497	-0.056 270	-0.056 270
60°	+0.011 268	-0.079 577	-0.137 832	60°	+0.005 077	-0.059 683	-0.103 374	60°	+0.001 984	-0.039 789	-0.068 916
75°	+0.049 653	-0.041 192	-0.153 732	75°	+0.033 866	-0.030 894	-0.115 299	75°	+0.021 177	-0.020 596	-0.076 866
90°	+0.090 845	0	-0.159 155	90°	+0.064 760	0	-0.119 366	90°	+0.041 773	0	-0.079 677
90°	+0.090 845	+0.500 000	-0.159 155	105°	+0.095 654	+0.030 894	-0.115 299	105°	+0.062 369	+0.020 596	-0.076 866
105°	+0.115 000	+0.524 155	-0.024 322	120°	+0.124 443	+0.059 683	-0.103 374	120°	+0.081 562	+0.039 789	-0.068 916
120°	+0.103 435	+0.512 590	+0.112 166	120°	+0.124 443	+0.492 696	+0.146 626	135°	+0.098 043	+0.086 270	-0.076 270
135°	+0.056 938	+0.486 093	+0.241 014	135°	+0.069 706	+0.437 958	+0.269 149	135°	+0.098 043	+0.409 823	+0.297 284
150°	-0.021 323	+0.387 832	+0.353 435	150°	-0.014 878	+0.353 374	+0.373 330	150°	+0.007 136	+0.318 916	+0.393 224
165°	-0.126 014	+0.283 141	+0.441 771	165°	-0.123 544	+0.244 708	+0.452 069	165°	-0.107 505	+0.206 273	+0.462 367
180°	-0.250 000	+0.159 155	+0.506 000	180°	-0.248 886	+0.119 366	+0.500 000	180°	-0.232 203	+0.079 577	+0.500 000

Figura 6.11 Coeficiente para calcular los elementos mecánicos M,T y S en la sección combinada del anillo, cuando existe reacción vertical en el apoyo



$$M = \frac{H_0}{\pi} (\text{sen } \theta \cos \alpha - \frac{a \text{ sen } \theta}{\text{sen } \alpha}) = \frac{H_0}{\pi} K_1$$

$$M = \frac{H_0}{\pi} (\text{sen } \theta \cos \alpha + \frac{(\pi - \alpha) \text{ sen } \theta}{\text{sen } \alpha}) = \frac{H_0}{\pi} K_1$$

$$T = \frac{H_0}{\pi R} (\text{sen } \theta \cos \alpha - \frac{a \text{ sen } \theta}{\text{sen } \alpha}) = \frac{H_0}{\pi R} K_2$$

$$T = \frac{H_0}{\pi R} (\text{sen } \theta \cos \alpha + \frac{(\pi - \alpha) \text{ sen } \theta}{\text{sen } \alpha}) = \frac{H_0}{\pi R} K_2$$

$$S = \frac{H_0}{\pi R} (\cos \theta \cos \alpha - \frac{a \cos \theta}{\text{sen } \alpha}) = \frac{H_0}{\pi R} K_3$$

$$S = \frac{H_0}{\pi R} (\cos \theta \cos \alpha + \frac{(\pi - \alpha) \text{ sen } \theta}{\text{sen } \alpha}) = \frac{H_0}{\pi R} K_3$$

$\alpha=180^\circ$			$\alpha=120^\circ$			$\alpha=90^\circ$					
θ	K_1	K_2	K_3	θ	K_1	K_2	K_3	θ	K_1	K_2	K_3
0°	0	0	+0.500 000	0°	0	0	+0.225 745	0°	0	0	+0.128 474
15°	-0.129 410	-0.129 410	+0.482 963	15°	-0.050 427	-0.050 427	+0.218 053	15°	-0.033 252	-0.033 252	+0.124 097
30°	-0.250 000	-0.250 000	+0.433 013	30°	-0.112 073	-0.112 073	+0.195 501	30°	-0.064 237	-0.064 237	+0.111 262
45°	-0.353 553	-0.353 553	-0.353 553	45°	-0.159 626	-0.159 626	+0.169 626	45°	-0.090 845	-0.090 845	+0.090 845
60°	-0.433 013	-0.433 013	-0.250 000	60°	-0.195 501	-0.195 501	+0.112 073	60°	-0.111 262	-0.111 262	+0.064 237
75°	-0.482 963	-0.482 963	+0.129 410	75°	-0.218 053	-0.218 053	+0.068 427	75°	-0.124 097	-0.124 097	+0.033 252
90°	-0.500 000	-0.500 000	0	90°	-0.225 745	-0.225 745	0	90°	-0.128 474	-0.128 474	0
90°	+0.500 000	+0.500 000	0	105°	-0.218 053	-0.218 053	-0.068 427	105°	-0.124 097	-0.124 097	-0.033 252
105°	+0.482 963	+0.482 963	+0.129 410	120°	-0.195 501	-0.195 501	-0.112 073	120°	-0.111 262	-0.111 262	-0.064 237
120°	+0.433 013	+0.433 013	+0.250 000	120°	+0.804 499	+0.804 449	+0.464 478	135°	-0.090 845	-0.090 845	-0.090 845
135°	+0.353 553	+0.353 553	+0.353 553	135°	+0.656 071	+0.656 071	+0.656 071	135°	+0.909 155	+0.909 155	+0.909 155
150°	+0.250 000	+0.250 000	+0.433 013	150°	+0.464 478	+0.464 478	+0.804 499	150°	+0.642 070	+0.642 070	+1.113 483
165°	+0.129 410	+0.129 410	+0.482 963	165°	+0.240 431	+0.240 431	+0.887 302	165°	+0.332 774	+0.332 774	+1.241 929
180°	0	0	+0.500 000	180°	0	0	+0.920 965	180°	0	0	-1.285 739

Figura 6.12 Coeficiente para calcular los elementos mecánicos M.T y S en la sección combinada del anillo, cuando existen reacciones verticales y momentos circunferenciales provocados por el apoyo

El esfuerzo máximo longitudinal en el tubo en la zona del anillo está dado por:

$$S_{LM} = \left(\frac{L^2}{6t} \right) \left(\frac{2W}{d} + \frac{q}{1,960} \right) \quad (6.25)$$

donde:

- S_{LM} es el esfuerzo máximo longitudinal (MPa)
- L es la longitud del claro centro a centro entre soportes (m)

El esfuerzo radial flexionante máximo, en el tubo en la zona del anillo debido a presión interna, está dado por:

$$S_{bo} = \frac{1.82(A_r - C't)}{A_r + 1.56t\sqrt{r_m t}} \left(\frac{P_i r_m}{t} \right) \quad (6.26)$$

donde:

- S_{bo} es el esfuerzo radial flexionante máximo (MPa)
- A_r es el área transversal del anillo (mm²)
- C' es el ancho de contacto del anillo rectangular de la sección transversal (mm)
- P_i es la presión interior de la tubería (MPa)
- r_m es el radio medio de la tubería (mm)

Esta ecuación se obtuvo suponiendo que el anillo proporciona mayor rigidez al integrarlo con la tubería, siendo la carga en la periferia simétrica. Como en realidad la carga no es simétrica, debido al contenido de agua, una aproximación del valor máximo de S_{bo} se obtiene sustituyendo el valor de S_r en la ecuación (6.26) en lugar de $(P, r_m/t)$.

El esfuerzo longitudinal total (S_T) combinado en la pared del tubo está dado por:

$$S_T = S_{LM} + S_{bo} \quad (6.27)$$

El valor obtenido de la expresión 6.24 deberá ser menor que el permisible indicado en la sección 6.4.3.

6.5.5.2. Esfuerzos en el anillo rigidizante.

El máximo valor del esfuerzo flexionante en el anillo ocurre cuando $a=0.04R$, donde a es la excentricidad de la reacción desde el eje centroidal del anillo rigidizante (ver Figura 6.4). Cuando esto se cumple, el máximo momento flexionante M en la viga está dado por:

$$M = 0.01Q \quad (6.28)$$

donde:

- M es el momento flexionante en sección del anillo (N-mm)
 Q es la fuerza total de la tubería transmitida al anillo (N)

El esfuerzo máximo flexionante se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$S_1 = \frac{M}{I} y \quad (6.29)$$

donde:

- S_1 es el esfuerzo máximo flexionante (MPa)
 M es el momento flexionante (N-mm)
 y es la distancia del eje neutro a la fibra extrema del anillo (mm)
 I es el momento de inercia de la sección considerada como refuerzo (mm^4)

El esfuerzo máximo en el anillo S_2 , debido a la fuerza cortante está dado por:

$$S_2 = \frac{Q}{4A_r} \quad (6.30)$$

donde:

- S_2 es el esfuerzo cortante máximo en el anillo (MPa)
 Q es la fuerza total de la tubería transmitida al anillo (N)
 A_r es el área transversal del anillo (mm^2)

El esfuerzo en el anillo debido a la fuerza radial está dado por:

$$S_3 = \left(\frac{Pr_m}{A_r} \right) \left[\left(C' + 1.56\sqrt{r_m t} \right) \frac{A_r - C't}{A_r + 1.56t\sqrt{r_m t}} \right] \quad (6.31)$$

donde:

- S_3 es el esfuerzo en el anillo debido a la fuerza radial (MPa)

Los términos están definidos en las expresiones anteriores.

Todos estos esfuerzos son combinados en la dirección horizontal, el esfuerzo total máximo f en el anillo rigidizante está dado por:

$$S_T = S_1 + S_2 + S_3 \quad (6.32)$$

El esfuerzo en el anillo rigidizante o en la tubería, considerando que el anillo es del mismo material del tubo, debe ser menor que el indicado en la sección 6.4.3.

Si los extremos de la tubería están empotrados o fijos, los esfuerzos longitudinales ocasionados por cambios de temperatura deben ser sumados a S_L en la ecuación

(6.25). Sin embargo, cuando se utilicen placas de deslizamiento en los apoyos, el esfuerzo por temperatura será prácticamente nulo.

6.5.6. Tubos parcialmente llenos.

En líneas de conducción de agua es poco frecuente el caso de tubería parcialmente llenas (por ejemplo el vaciado y llenado de línea), para propósitos de diseño en tuberías aéreas es conveniente comparar el máximo esfuerzo longitudinal y el flexionante que provoca la presión interna en la tubería; para la condición de tubo lleno con el máximo esfuerzo longitudinal S_L para el caso de tubo parcialmente lleno, ver ecuación 6.25, donde el valor de S_L es afectado por el coeficiente n_L .

La relación de esfuerzos conocida como n_L y n_r , está en función de la constante k que se define como:

$$k_L = \left(\frac{L}{12r} \right) \sqrt{\frac{t}{r}} \quad (6.33)$$

donde:

- k_L es la constante de diseño
- t es el espesor de la tubería (mm)
- L es la longitud del claro (mm)
- r es el radio de la tubería (mm)

El valor de k varía de 0.20 a 1.20, para casos prácticos y dentro de este rango se tiene que:

$$n_L = \frac{1}{\sqrt{k_L}} \quad (6.34)$$

donde: n_L es el coeficiente longitudinal

$$n_r = \frac{0.31}{\sqrt{k_L}} \quad (6.35)$$

donde: n_r es el coeficiente radial

La condición de tubo parcialmente llenó causa mayores esfuerzos que la condición de tubo lleno, cuando k es menor que la unidad. El valor de S_L que se muestra en la ecuación (6.25), multiplicada por n_L produce un esfuerzo longitudinal mayor que para la condición de tubo lleno. De la misma manera, si S_r es multiplicado por n_r , produce el máximo esfuerzo radial por flexión (expresión 6.24). Como el esfuerzo S_{bo} por flexión es cercano a cero, el cual resulta de la ecuación (6.26), mientras que con la ecuación (6.27) se pueden permitir esfuerzos longitudinales relativamente mayores para la condición de tubo parcialmente lleno.

En el anillo rigidizante, el momento máximo para condición de tubo parcialmente lleno es 3.88 veces el valor del momento para tubo lleno, cuando se tiene un valor de 0.04 de a/R (valor que da el momento mínimo para condición de tubo lleno). Esto no es tan serio como aparenta ser a primera vista, debido a que las suposiciones que condujeron a tomar un valor de 3.88 son conservadoras, y a que existen varias condiciones y fuerzas cuando el tubo está completamente lleno, las cuales no están presentes cuando el tubo está parcialmente lleno. Por esta razón, los esfuerzos cercanos al punto de fluencia pueden ser permitidos para las condiciones poco frecuentes de vaciado y llenado de la tubería. El espesor de pared y anillo rigidizante debe ser analizado para la condición del tubo parcialmente lleno.

6.6. ATRAQUES

En las líneas de conducción se presentan cambios de dirección, si la línea es aérea y utiliza juntas de expansión, se requerirá utilizar atraques para resistir las fuerzas que se generan en los cambios de dirección horizontales como verticales, así mismo, en los cruces con barrancas donde puede existir una pendiente muy pronunciada.

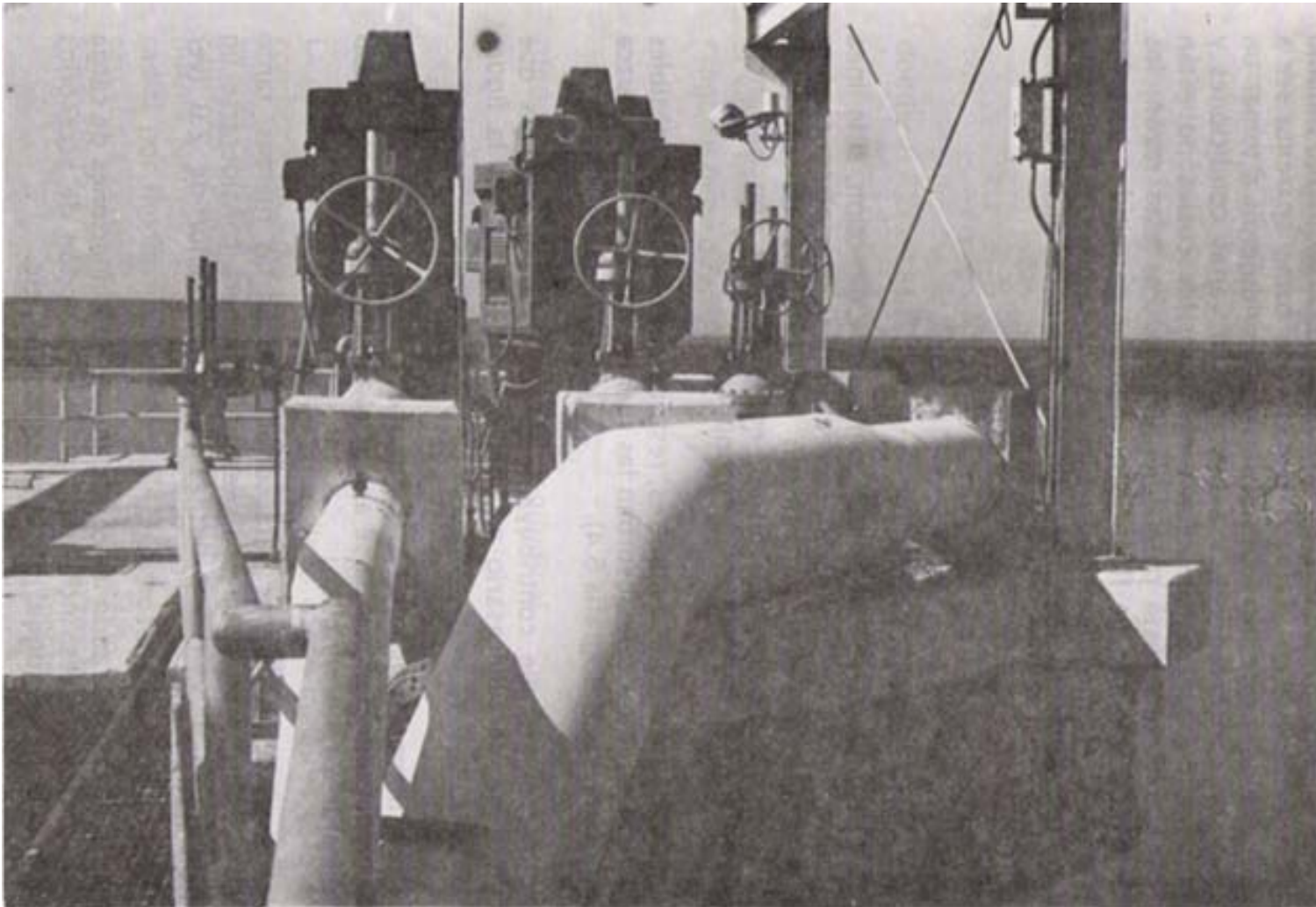
Estos puntos se modelan como empotres, restringiendo todos sus posibles movimientos con atraques que absorban las fuerzas axiales que produzca la tubería en operación (Fotografía 6.4).

Para lograr que el atraque contribuya a contrarrestar las fuerzas que produce la tubería, será necesario anclarla como se indica en la Figura 6.13.

Para conseguir mayor resistencia del atraque al volteo y disminuir el tamaño del bloque, pueden instalarse anclas al terreno, siempre y cuando las condiciones de éste lo permitan.

Los anclajes se deberán diseñar para soportar todas las fuerzas, tanto verticales como horizontales, que se presenten. Deberá considerarse un factor de seguridad al volteo y deslizamiento no menor de 2.0 (ver referencia 5).

Se hará un análisis considerando las condiciones y combinaciones de carga que sean más desfavorables, incluyendo en éste la acción de accesorios tales como válvulas de desfogue, juntas de expansión, etc.



Fotografía 6.4

6.6.1. Fuerza por cambio de dirección

Cuando deba diseñarse un atraque en los puntos donde se tenga un tapón o una "T", la fuerza que se presenta por presión hidrostática se calcula de la siguiente manera:

$$F_r = P_i A \quad (6.36)$$

donde:

- F_r es la fuerza debida a la tapa o una "T" (N)
- P_i es la presión interna máxima (Pa)
- A es el área de la sección transversal de la tubería, en caso de ser una "T" el área corresponde a la sección transversal del ramal (m^2)

Cuando el atraque se coloque en un cambio de dirección, la fuerza resultante se obtiene:

$$F_r = (2AP_i) \text{sen}\left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (6.37)$$

donde:

- Δ es el ángulo de deflexión del codo (rad) se muestra en la Figura 5.3.

Una solución para el diseño del atraque en el cambio de dirección en tubería aérea horizontal es considerar la tubería ahogada en el atraque de concreto, otra solución podría ser anclar la tubería al bloque de concreto a través de anillos rigidizantes. La elección del tipo de atraque dependerá de cada caso en particular.

6.6.2. Fuerza en pendiente

En este caso se considera la fuerza hidráulica originada por el cambio de dirección (fórmula 6.37) más el debido al empuje por la pendiente.

El empuje ejercido en el atraque aguas arriba se calcula de acuerdo a (ver Figura 6.13):

$$E_1 = q_1 L_1 \text{sen}\alpha_1 \quad (6.38)$$

y el empuje aguas abajo se calcula con la siguiente fórmula:

$$E_2 = q_2 L_2 \text{sen}\alpha_2 \quad (6.39)$$

donde:

- E_1 es la componente del peso en la dirección paralela a la línea aguas arriba(N)
- E_2 es la componente del peso en la dirección paralela a la línea aguas abajo(N)

q_1 y q_2 es la masa de la tubería por metro de longitud, aguas arriba y aguas abajo, respectivamente (N)

L_1 y L_2 es la longitud entre el atraque y la junta de expansión (m)

α_1 y α_2 es el ángulo de inclinación de la línea, aguas arriba y aguas abajo (rad)

Para el diseño del atraque, se considera la suma de las fuerzas de las secciones 6.6.1 y 6.6.2.

Para el diseño de atraques en tuberías inclinadas, existen varias soluciones, entre las cuales se puede considerar la tubería anclada al bloque de concreto a través de anillos rigidizantes, y de ser necesario se instalaran, anclas al terreno con el propósito de disminuir el volumen de concreto (ver Figura 6.13).

6.6.3. Cambio de sección

En tuberías donde se necesite un cambio de sección, se genera una fuerza por presión hidrostática radial, la cual se determina de la siguiente forma:

$$F_r = P_i(A_1^2 - A_2^2) \quad (6.40)$$

donde:

A_1 y A_2 es el área de la tubería antes y después de la reducción respectivamente (m)

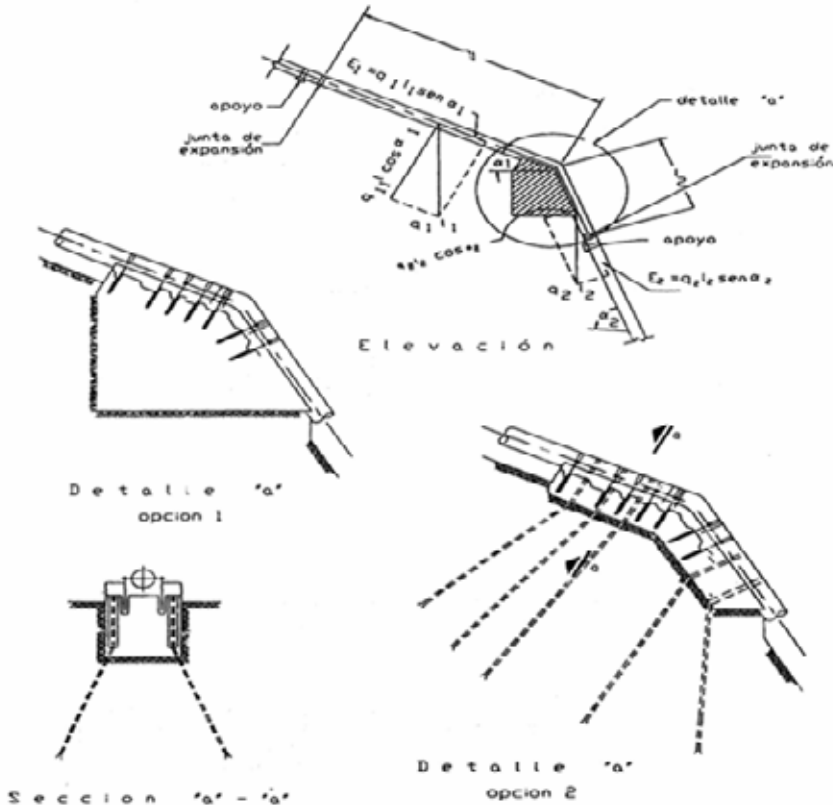


Figura 6.13 Atraque en una tubería con cambio de pendiente

6.7. JUNTAS DE EXPANSIÓN

Las juntas de expansión se emplean en tramos rectos de tubería superficial para absorber los desplazamientos por temperatura. Las juntas permiten suficiente movimiento de expansión y contracción (Fotografías 6.5 y 6.6).

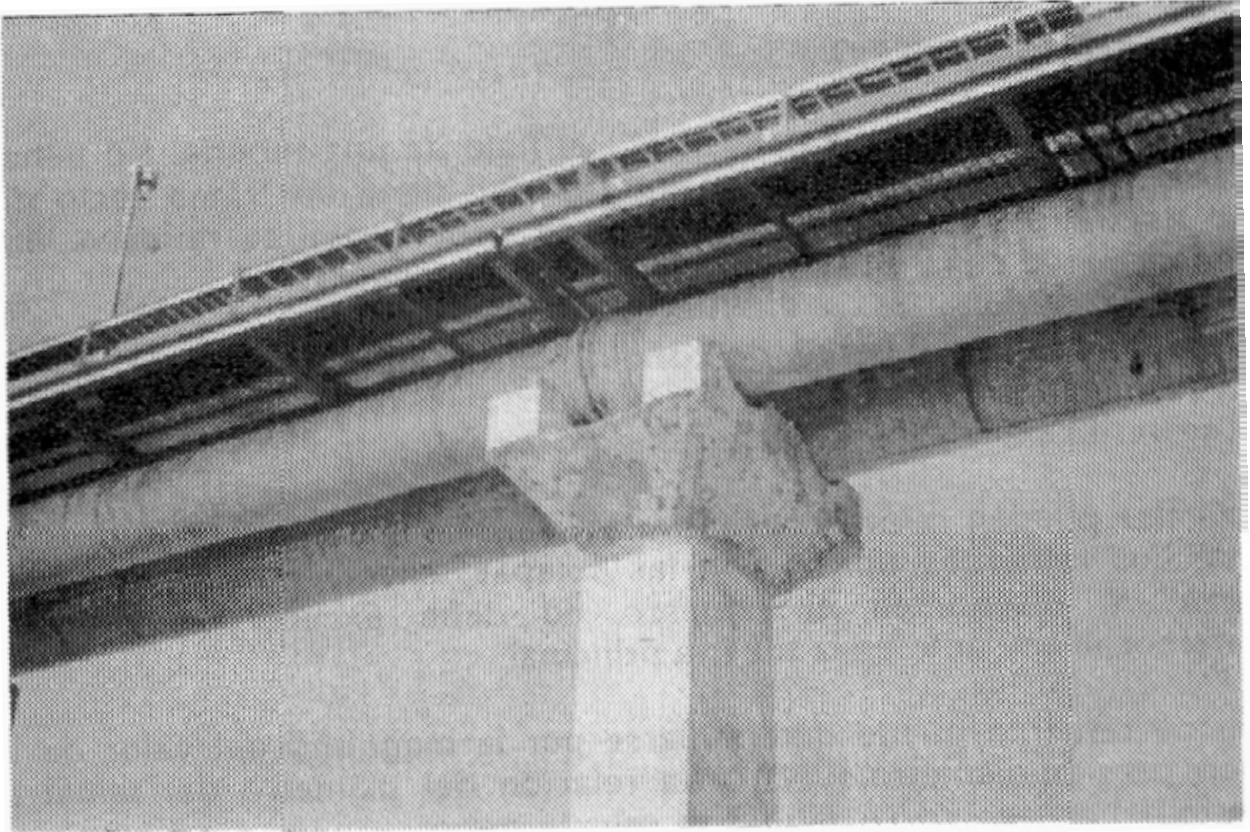
En líneas de conducción instaladas en terrenos planos, las juntas de expansión deben colocarse en medio de dos atraques. En terrenos inclinados, las juntas normalmente se colocarán cercanas al atraque, del lado cuesta abajo (ver Figura 6.13). La localización y espaciamiento de las juntas de expansión se debe determinar en función de los requerimientos y del perfil topográfico. En puentes, la localización de las juntas de expansión deberá ser acorde con la ubicación de las juntas de expansión de la estructura del puente. Normalmente se instalan juntas de expansión del tipo caja empaque, la cual consiste en anillos de hule instalados en medio de camisas, permitiendo un cierto movimiento en la tubería. Cuando se instala una junta de expansión, el movimiento permitido debe ser establecido dependiendo de la longitud del tubo y el gradiente de temperatura del lugar, de acuerdo a la siguiente expresión (ver Figura 6.1)

$$\Delta L = (1.17 \times 10^{-5})L(\Delta t) \quad (6.41)$$

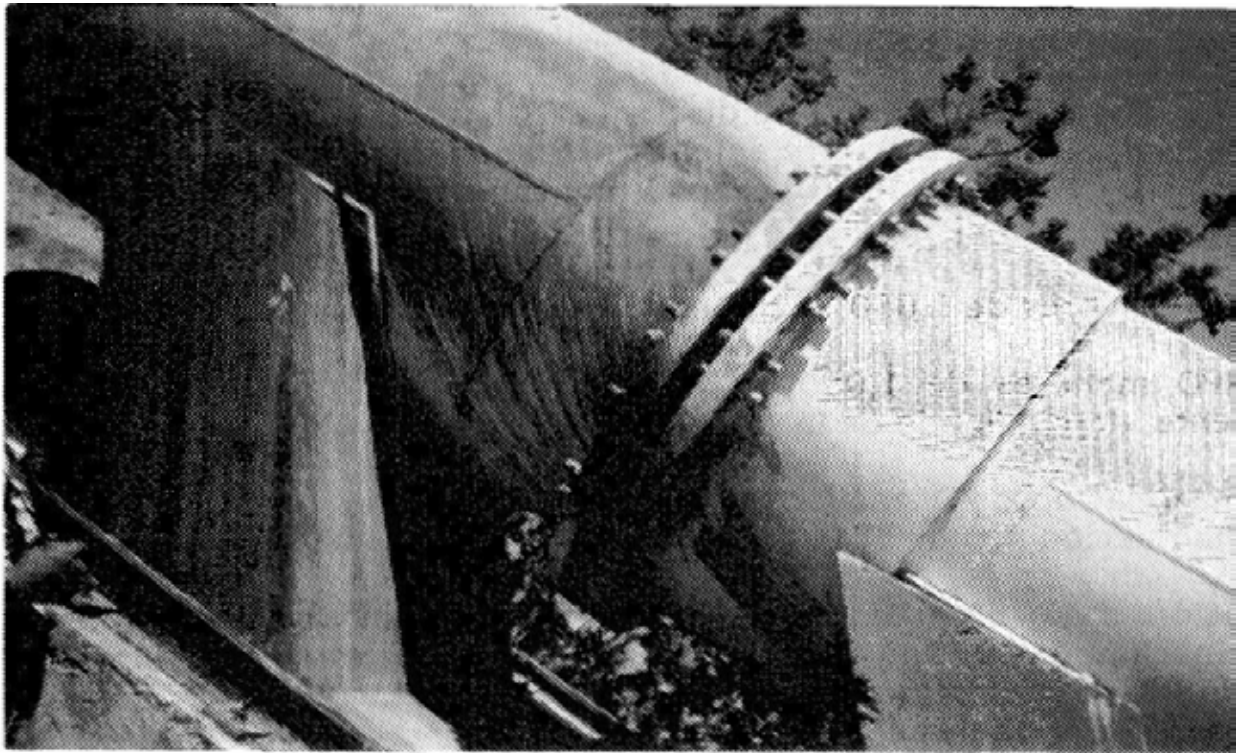
donde:

- 1.17×10^{-5} es el coeficiente de expansión para tubería de acero por cada °K
- ΔL es el incremento o decremento de la longitud (m)
- L es la longitud de tubería analizada (m)
- Δt es el gradiente de temperatura (°K)

Para el análisis de deformación por efecto de la temperatura en operación se recomienda que como mínimo se tome un gradiente de temperatura de 20 °K. También se recomienda que se efectúe un análisis considerando la tubería vacía en el proceso de construcción, ya que ésta situación es más crítica que cuando la tubería conduce agua.



Fotografía 6.5



Fotografía 6.6

6.8. REFUERZO EN CONEXIONES

Los ramales son necesarios para dividir el flujo de una tubería. No tienen la misma resistencia a la presión interna que tiene un tramo recto del mismo diámetro y espesor. Lo anterior se debe a que se remueve una porción de pared de la tubería para dar lugar a la conexión.

En la mayoría de las tuberías de conducción de agua, el espesor que se utiliza es mayor que el requerido por presión internas. Cuando se tenga un ramal se verificara si éste requiere refuerzo y de que tipo.

Los ramales pueden reforzarse de varias maneras para resistir la presión interna. Los refuerzos típicos son las solapas, envolventes y placas. El esfuerzo de diseño en el refuerzo no debe exceder al esfuerzo circunferencial actuante en la tubería principal.

El tipo de refuerzo puede determinarse por la magnitud del valor de la relación presión-diámetro (VPD) y la relación del diámetro del ramal al diámetro del cabezal (d/D). El VPD se calcula como:

$$VPD = \frac{Pd_e^2}{D_e \text{sen}^2 \Delta} \quad (6.42)$$

donde:

- P es la presión de diseño (MPa)
- d_e es el diámetro exterior del ramal (mm)
- D_e es el diámetro exterior del cabezal (mm)
- Δ es el ángulo de deflexión del ramal (rad)

Para VPD mayores de 1,050, el refuerzo debe consistir de una placa.

Para VPD menores de 1,050, el refuerzo debe ser una solapa o una envolvente, dependiendo de la relación d_e/D_e .

Para una relación d_e/D_e mayor de 0.7, se debe utilizar una envolvente, y para una relación menor de 0.7 una solapa o una envolvente.

La relación d_e/D_e no toma en cuenta el ángulo del ramal como en la determinación del VPD, ya que el factor determinante es la dimensión circunferencial. La sección transversal de acero removida en el cabezal se reemplaza en forma de solapa o envolvente.

El área de refuerzo requerida A_4 bajo presión interna es igual a (ver Figura 6.14):

$$A_4 = A_3 - A_2 - A_1 = 2wT \quad (6.43)$$

Siendo:

$$A_3 = MT_r(d_e - 2t_y)/\text{sen}\Delta \quad (6.44)$$

$$A_2 = (d_e - 2t_y)(T_y - T_r)/\text{sen}\Delta \quad (6.45)$$

$$A_1 = 5t_y(t_y - t_r)/\text{sen}\Delta \quad (6.46)$$

$$T_r = \frac{P_i D_e}{2S_p} \quad (6.47)$$

$$t_r = \frac{P_i d_e}{2S_p} \quad (6.48)$$

donde:

- A_3 representa la sección del cabezal removida para el ramal (mm^2)
- A_2 representa el área de exceso en el espesor del cabezal (mm^2)
- A_1 representa el área de exceso en el espesor del ramal (mm^2)
- w es el ancho de la solapa o envolvente, la cual no será menor de $0.33d_e/\text{sen}(\Delta \text{ rad})$, ni mayor de $0.5d_e/\text{sen}(\Delta \text{ rad})$
- T es el espesor de la solapa o envolvente (mm)
- M es el factor de ampliación del refuerzo
- T_r representa el espesor requerido en el cabezal por presión interna (mm).
- d_e es el diámetro exterior del ramal (mm)
- t_y es el espesor del ramal (mm)
- Δ es el ángulo entre los ejes del cabezal y ramal (rad)
- T_y es el espesor del cabezal (mm)
- T_r representa el espesor requerido en el ramal por presión interna (mm)
- P_1 es la presión interna del cabezal (MPa)
- D_e es el diámetro exterior de cabezal (mm)
- S_p es el esfuerzo permisible de material ($0.5 f_y$; donde, f_y = esfuerzo de fluencia (MPa)
- P_i es la presión interna del ramal (MPa)

Cuando el VPD se encuentra en el rango de 700 a 1,050, el área de acero reemplazada debe multiplicarse por un factor "Fa" de 0.0014 VPD. La Figura 6.14 y 6.15 muestra los refuerzos del tipo solapa y envolvente. La Tabla 6.5 enlista recomendaciones para el tipo de refuerzo.

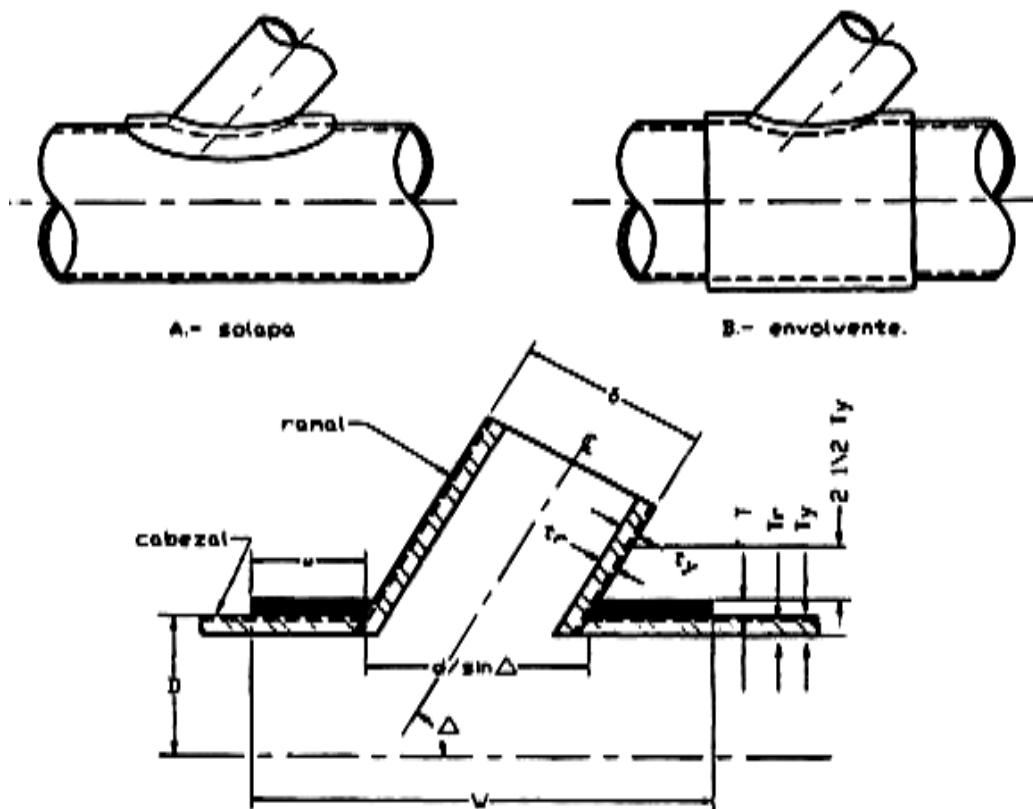
En la determinación del acero de refuerzo requerido, se debe tomar en cuenta cualquier espesor del material en exceso del solicitado por presión interna, así como la distancia permisible a la solapa o envolvente. No se debe considerar en el diseño, las áreas de soldadura. El ancho total (W) de la solapa o envolvente no debe ser menor de $1.67 d_e/\text{sen}\Delta$ ni mayor de $2 d_e/\text{sen}\Delta$.

El diseño del refuerzo con base en placa no se contempla en este manual, se recomienda consultar el manual M-11 del A.W.W.A (ref. 1).

Tabla 6.5 Tipos de Refuerzos Recomendados

VPD N mm	d/D	Factor "Fa"	Tipo de refuerzo
>1050	Todas	-----	Placas de refuerzo
700-1050	>0.7	0.0014VPD	Envolventes
<700	>0.7	1.0	Envolvente
700-1050	≤0.7	0.0014VPD	Solapa
<700	≤0.7	1.0	Solapa

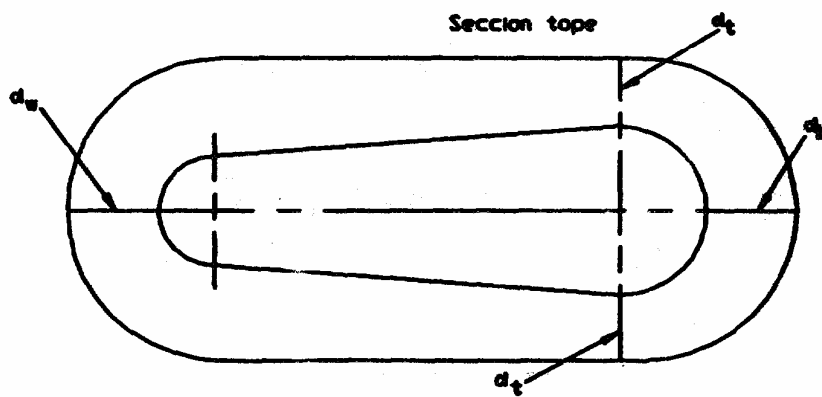
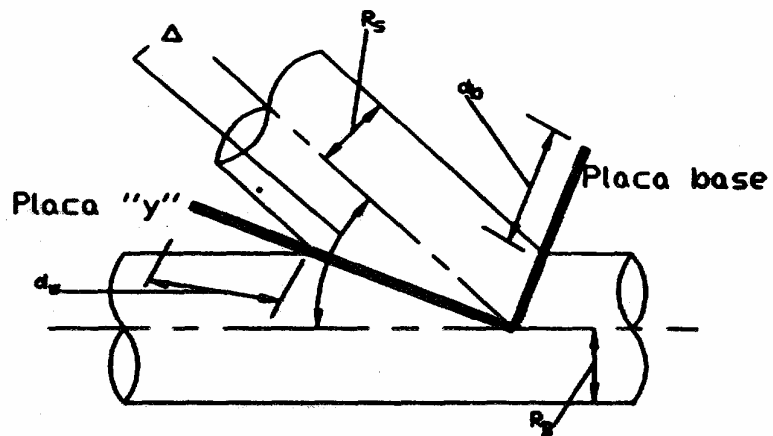
NOTA: Estos refuerzos son únicamente para resistir la presión interna, deben revisarse para cargas externas.



Nota: La figura no muestra la localización de la soldadura necesaria.

- D = Diámetro exterior del cabezal (cm).
- t_y = Espesor nominal del cabezal (cm).
- T_r = Espesor requerido del cabezal (cm).
- d = Diámetro exterior del ramal (cm).
- t_r = Espesor nominal del ramal (cm).
- t_r = Espesor requerido del ramal (cm).
- Δ = Ángulo de deflexión del ramal (cm).
- w = Ancho total del anillo o silleta (cm).
- u = Ancho en un extremo del anillo (cm).
- T = Espesor requerido de la solapa o envolvente.

Figura 6.14 Refuerzo tipo anillo y envolvente



- d_s = Ancho placa "y"
- d_b = Ancho placa base
- d_t = Ancho seccion tope
- Δ = Angulo de deflexion del ramal
- R_s = Radio exterior del ramal
- R_b = Radio exterior del cabezal

Figura 6.15 Refuerzo tipo placa de refuerzo

7. OBRAS ESPECIALES

7.1. GENERALIDADES

Se denominan obras especiales a las secciones de las líneas de conducción donde se requiere aplicar procesos de diseño y constructivos diferentes a los que usualmente se utilizan para el resto de la línea. La necesidad de recurrir a obras especiales surge cuando es preciso salvar obstáculos, ya sean naturales como los ríos, lagos, pantanos, barrancas, etc., o creados por el hombre como caminos, carreteras, vías de ferrocarril y otras líneas. El diseño de la obra especial o cruce dependerá de las condiciones específicas del obstáculo y del sitio. En ocasiones será posible cruzar el obstáculo ubicando la línea de conducción banjo éste, como sería el cruce de ríos, lagunas, caminos, etc. Sin embargo, habrá otras en que sea necesario hacer uso de puentes. La selección del tipo de cruce deberá respaldarse en un análisis técnico y económico.

7.2. CRUCES CON OTRAS LÍNEAS.

Cuando la línea de conducción de diseño cruce otra tubería, sea ésta de agua potable, drenaje, petróleo, etc., se deberá respetar el alineamiento y nivel de la línea existente. Esto obliga a que la línea pase por abajo o por arriba de la línea ya establecida para lo cual será necesario diseñar elementos de soporte que mantengan en su posición la línea existente. También se deberán tomar en cuenta tanto las condiciones de la etapa de construcción como las de la fase de operación permanente. El tipo de elementos de soporte que se emplearán dependerá principalmente de los diámetros y tipos de las dos líneas y de las condiciones del suelo. Se podrá utilizar relleno compactado, sacos llenos de arena, suelo circundante y estructuras de concreto o de acero. Además, considerará una separación mínima de 1.0 metro entre los paños de las dos líneas y la existencia de un material suave entre ambos, evitando el material rocoso o con escombros.

Asimismo, se revisará la posible interferencia en la protección catódica de ambas líneas.

7.3. CRUCES CON CAMINOS Y CARRETERAS.

En este tipo de cruce se procurará que la línea pase por debajo de la vía de comunicación. El objetivo principal en el diseño del cruce consiste en proteger la tubería de las cargas de vehículos que transitan en la superficie y al mismo tiempo garantizar la estabilidad y seguridad de la vía de comunicación. Para lograrlo se deberá diseñar una estructura de protección, que puede ser una camisa a base de tubo de acero o marcos cerrados de concreto, los cuales deberán extenderse por lo menos la longitud del derecho de vía.

El ángulo de intersección en el cruce entre la tubería y la vía de comunicación deberá ser lo más cercano a $\pi/2$ rad (90°). En ningún caso podrá tomarse un ángulo menor

de $\pi/6$ rad (30°). Además, se evitarán los cruces donde existe terreno rocoso y áreas pantanosas. El espacio vertical y horizontal entre la línea y la estructura de protección tendrá que ser suficiente para facilitar las maniobras de mantenimiento de la línea.

7.3.1. Cruces con camisa

La instalación de la camisa se realizará por el procedimiento de hincado o de zanja ó a cielo abierto, debiéndose compactar el relleno, de manera que el terraplén quede en las condiciones originales. El relleno de la excavación bajo la subrasante se compactará hasta 600 mm en capas de 150 mm de espesor como máximo, al 90% de su peso volumétrico óptimo, según la prueba PROC TOR-SOP. El colchón restante se hará al 95% como mínimo en capas de 150 mm.

Cuando se efectúe el cruce por el procedimiento de zanja a cielo abierto en ningún momento deberá interrumpirse el tránsito.

Para evitar accidentes durante la construcción de la obra, se colocarán y conservarán permanentemente en el camino las señales preventivas, restrictivas a informativas, con base en lo establecido en el Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Carreteras y Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones de Transportes. Asimismo, en el transcurso de la noche se instalará y mantendrá fijo el señalamiento luminoso que consiste en lámparas de destello, mecheros a otros dispositivos.

Una vez que se terminen los trabajos se retirarán de los límites del derecho de vía todos los materiales sobrantes de la excavación y de construcción de la obra, incluyendo el señalamiento; de tal manera que la carretera y el derecho de vía queden en sus condiciones originales. Todos los trabajos se deberán efectuar conforme a las Especificaciones Generales de Construcción de la Secretaría de Comunicaciones y transportes.

Para efectos de inspección del nivel de voltaje de protección catódica, deberán instalarse a cada extremo del cruce, postes de registro como los mostrados en la Figura 7.1, conectados tanto a la camisa de protección como al ducto conductor.

7.3.1.1.Zanja.

La excavación de la zanja podrá hacerse con cortes verticales, según lo permitan las condiciones del suelo, y el ancho se calculará de acuerdo a la sección 10.3.2. Cuando se requiera una zanja de 3.0 m de ancho o mayor, ésta deberá ademarse para impedir que se alteren las terracerías y el pavimento de la carretera, procurando que quede la tubería centrada en la zanja. La plantilla de la zanja deberá ser provista de un material suave, con el fin de que el tubo tenga un lecho uniforme a través del cruce. La plantilla deberá cumplir con las características señaladas en la sección 10.4.1.

7.3.1.2. Camisa.

La distancia entre la parte más baja del terreno natural o de la sección del camino y la camisa, será como mínimo de 1.50 m. dentro del ancho del derecho de vía (Figura 7.2).

El espesor nominal y material seleccionado para el tubo de la camisa deberá soportar los esfuerzos provocados por cargas externas, de acuerdo a las secciones 5.3 y 6.3. El diámetro de la camisa será mínimo 150 mm mayor que el de la tubería conductora, y su longitud se extenderá por lo menos el ancho del derecho de vía. Con objeto de facilitar la instalación de la tubería conductora dentro de la camisa, se utilizarán rodillos de deslizamiento, colocando entre camisa y tubería, elementos de apoyo para darle la posición final. Dichos apoyos podrán ser a base de neopreno de 25.4 mm de espesor, separados a cada 4 m.

Cuando se quiere evitar abrir la zanja a cielo abierto, se puede utilizar el método de hincado, en el cual la tubería de encamisado se hinca mediante el empleo de gatos hidráulicos.

Para la determinación de la fuerza de hincado y los esfuerzos producidos, ver sección 5.3.4 de la Guía.

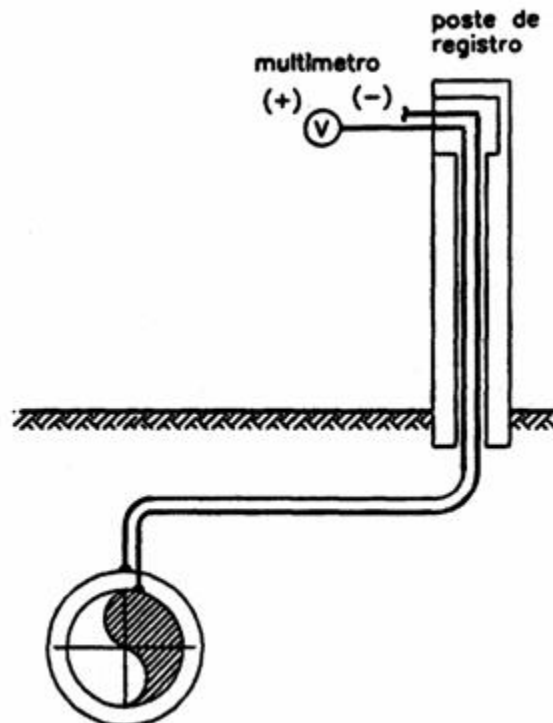


Figura 7.1 Arreglo para medición de potenciales tubo-suelo

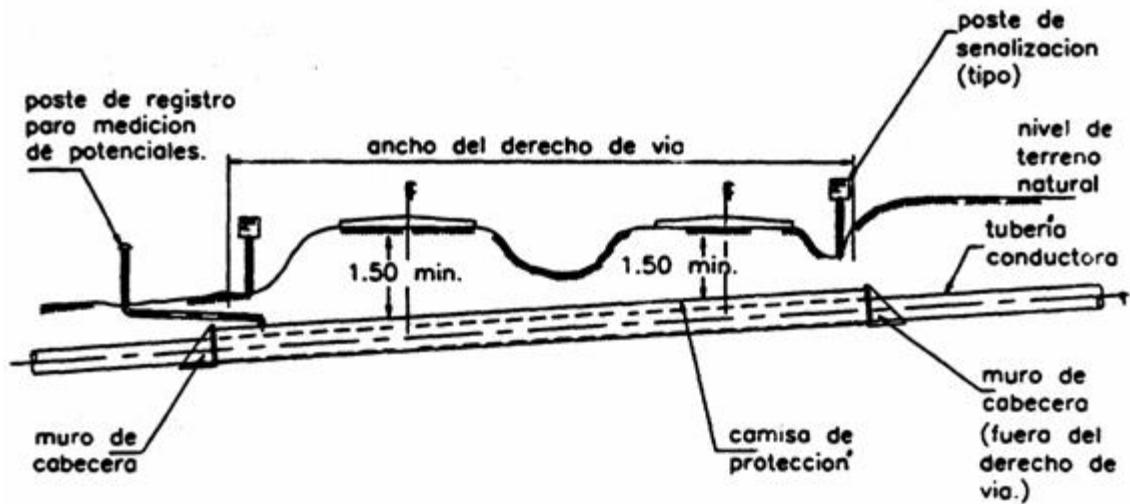


Figura 7.2 Cruce con carretera a base de comiso longitudinal del derecho de vía

7.3.1.3. Muros de cabecera.

En los extremos de la camisa se colocarán muros de cabecera, los que pueden ser de concreto reforzado o piedra brasa punteada con mortero (Figura 7.3), con el propósito de tapan los extremos, y evitar la entrada de agua, materiales y desechos que pudieran acumularse entre la camisa y la tubería. Los muros de cabecera deberán colocarse fuera del derecho de vía.

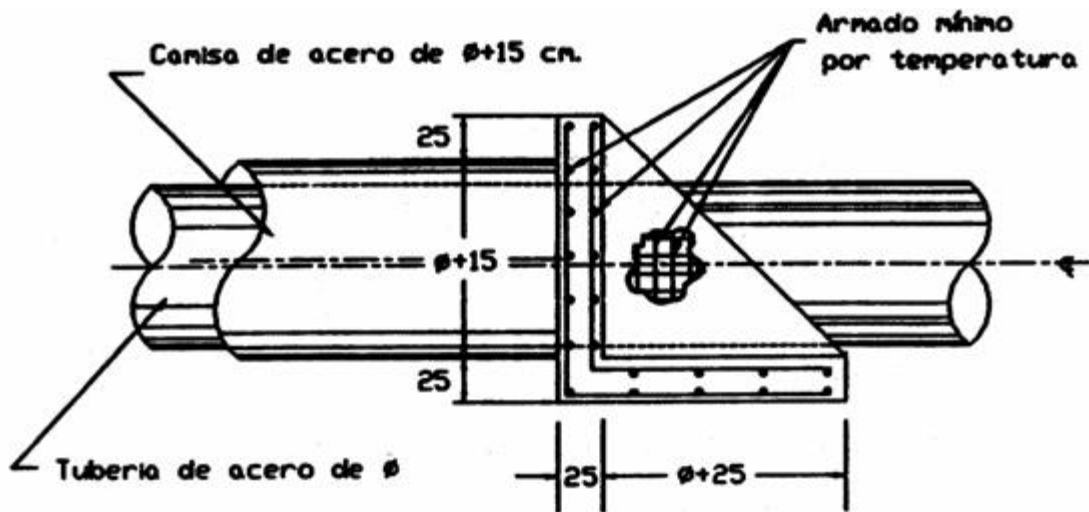


Figura 7.3 Muro de cabecera

7.3.1.4. Inspección y prueba.

La supervisión a inspección de la línea conductora y de la camisa, se deberá hacer durante la etapa de construcción del cruce. Todas las soldaduras circunferenciales serán inspeccionadas por medio de radiografiado o algún otro método no destructivo

de acuerdo a lo indicado en el capítulo 10. Asimismo, se realizarán pruebas para verificar que la tubería conductora esté aislada eléctricamente de la camisa. Esta tubería deberá probarse hidrostáticamente como se indica en la sección 10.6.

7.3.1.5. Recubrimiento anticorrosivo y protección catódica.

Se deberá proporcionar protección mecánica y catódica, tanto a la tubería como a la camisa, con el fin de garantizar la integridad estructural del sistema en el cruce. La protección catódica se hará de acuerdo al capítulo 9.

7.3.2. Cruces con marcos cerrados de concreto

Son estructuras de sección rectangular cuyo diseño y construcción se considera en dos etapas: en una primera etapa será una sección en "u" para poder introducir la línea de conducción y en una segunda etapa se convierte en cajón cerrado. El proceso anterior permite la colocación de una cama de arena o construcción de soportes o silletas en la losa de fondo de la sección en "u", a fin de proceder a instalar sobre ella la tubería de la línea de conducción; para finalmente construir la losa tapa con lo cual se concluye la operación, quedando definido un marco o anillo cerrado.

La estructura en cuestión debe diseñarse para resistir el peso y empuje del relleno, la carga viva y la reacción del terreno. La Figura 7.4 muestra un corte transversal de la estructura de protección que consiste en un marco cerrado de concreto. La estructura protectora se construirá en toda la longitud del derecho de vía.

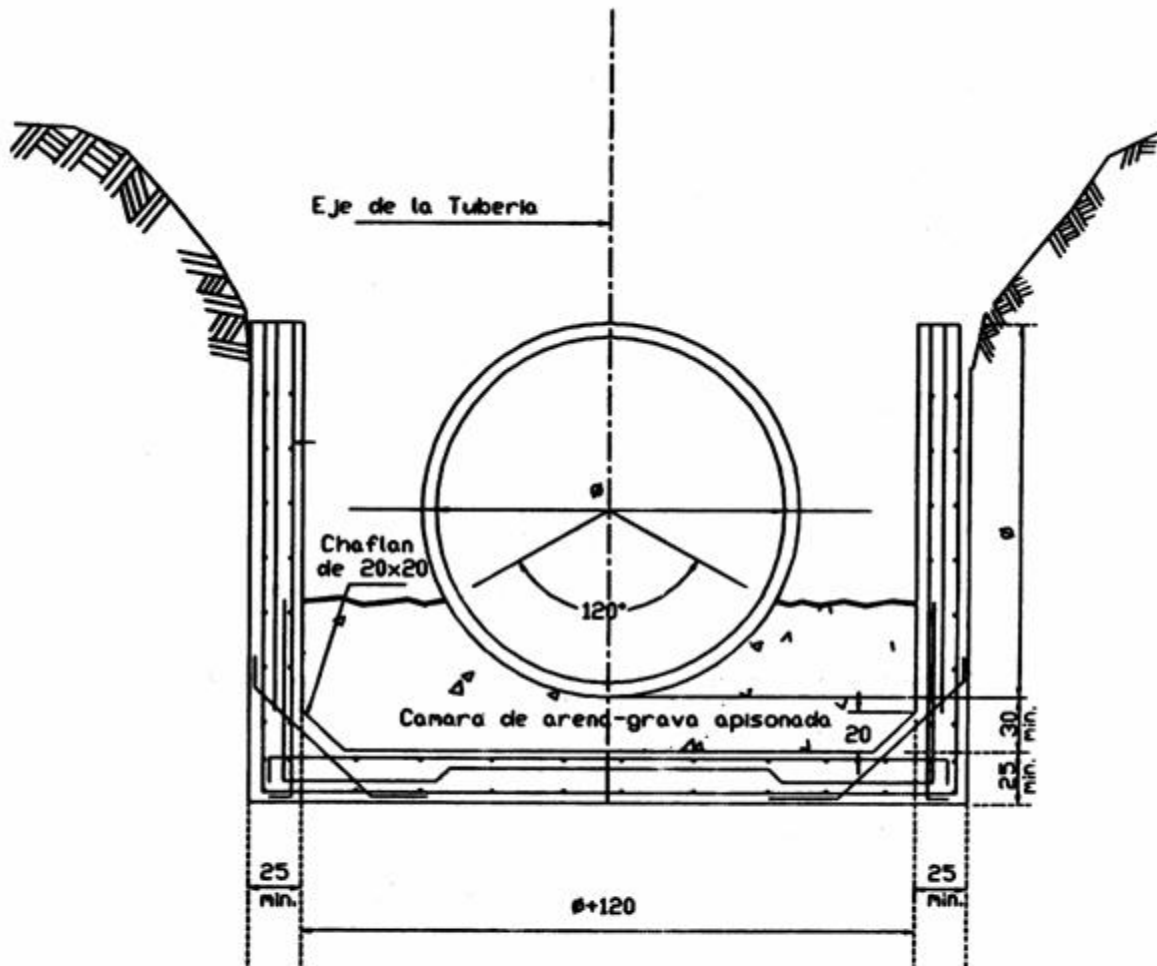
7.3.3. Conformación del plano de cruce

Para realizar un cruce con un camino o carretera se deberá dirigir una solicitud por escrito a la Unidad de Asuntos jurídicos del Centro de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, que contenga la siguiente información:

1. Nombre y apellidos, razón social, dependencia o empresa solicitante.
2. Nacionalidad.
3. Domicilio.
4. Tipo y uso del cruce.
5. Nombre de la carretera donde se hará el cruce.
6. Tramo de la carretera, indicando las poblaciones más cercanas en ambos sentidos.
7. Kilometraje del eje de la carretera en la intersección con el eje del cruce.
8. Indicar si el cruce es en zona urbana, suburbana o rural.
9. Memoria de cálculo.

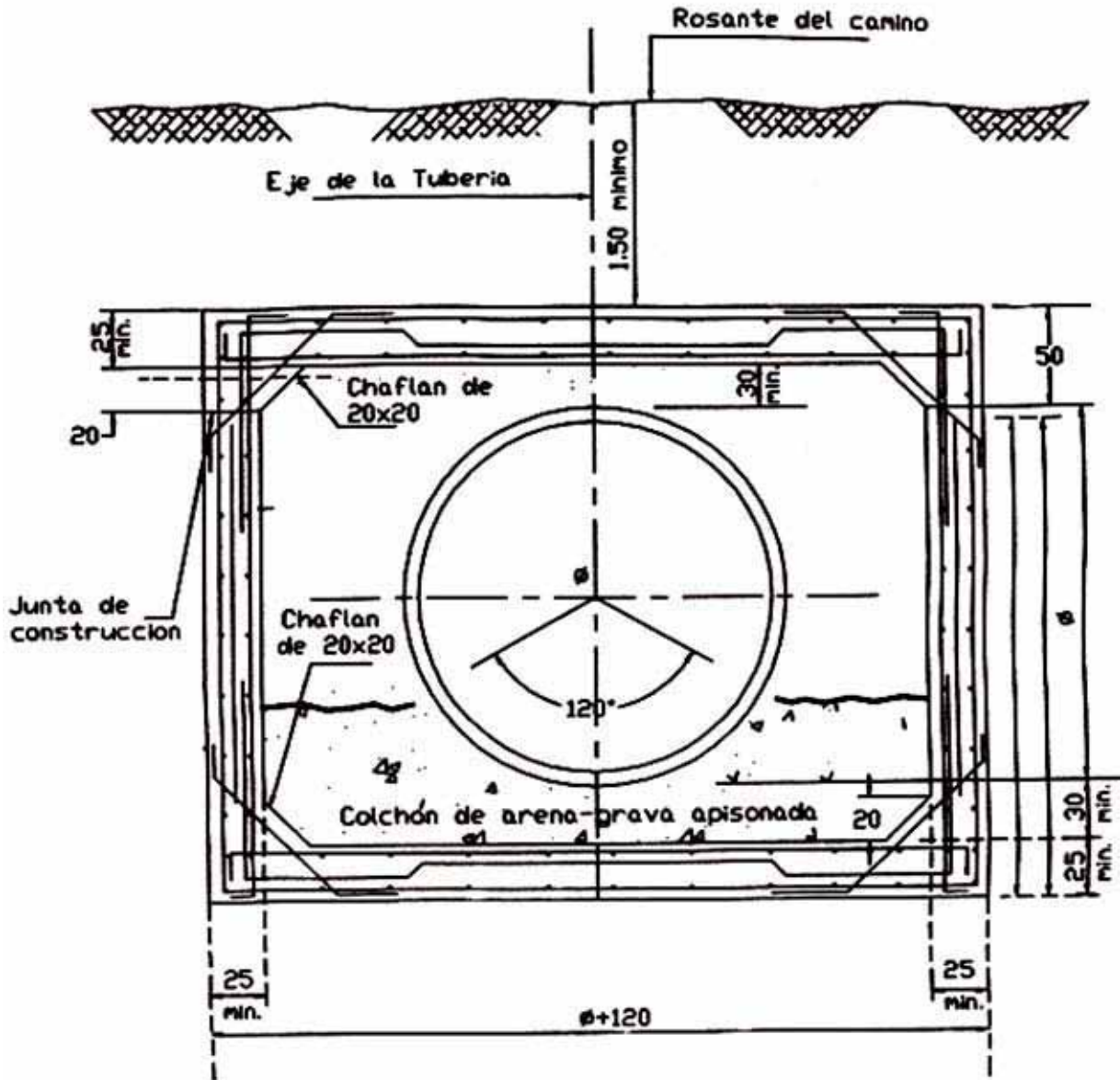
El plano del cruce que habrá de presentarse a la S.C.T. estará conformado de la siguiente manera:

1. Se elaborará en papel albanene o en algún otro material, que permita obtener maduros y heliográficas.
2. Se modulará tomando en cuenta que al doblarlo, el acordeón quede a tamaño carta. Preferentemente será de 900 x 550 milímetros.
3. El margen izquierdo será de 50 mm y tanto el derecho como el superior e inferior, serán de 10 mm.
4. En la parte central superior se dibujará la planta, en la que se indicará:



1a. ETAPA

Figura 7.4 Cajón de concreto



2a. ETAPA

Figura 7.4 Cajón de concreto

- El kilometraje del eje de la carretera en la intersección con el de la instalación, anotando con claridad el ángulo de incidencia entre ambos y el origen según el cadenamamiento de la carretera.
- El límite del derecho de vía de la carretera se indicará con "X" y una línea interrumpida. Además deberá acotarse el ancho que existe entre el eje de la carretera a los límites del derecho de vía.
- Las poblaciones Inmediatas se señalarán con flechas en extremos de la planta, a manera de origen y destino.

- d) Se dimensionará toda la geometría, así como el ancho de la corona de la carpeta asfáltica.
 - e) Las líneas o redes por instalar deberán dibujarse en color rojo, incluyendo el encamisado cuando se requiera.
 - f) Deberá dibujarse todo lo que tenga influencia en el proyecto, como pueden ser: árboles, postes, torres de energía eléctrica, líneas de alta tensión, telefónicas o telegráficas, paramentos de construcción, banquetas, guarniciones, coladeras, pozos, pantanos, arroyos, ríos, bardas, cercas, etc.
5. En zonas urbanas, deberán dibujarse en detalle los paramentos de las construcciones, indicando, el destino del predio o predios (habitación, comercio, estacionamiento, baldío, etc.) frente al cruzamiento.
6. En la parte central, se dibujará una sección transversal, levantada según el eje de la línea o red de que se trate, mostrando:
- a) El eje de la carretera, el ancho del derecho de vía, de la corona y de la carpeta asfáltica; altura de la rasante y desniveles del terreno natural al lomo del tubo, cuando se trate de cruzamientos subterráneos; para aéreos se indicará la altura de la rasante al cable y todo lo que esté contenido dentro del derecho de vía.
 - b) Cuando el cruzamiento se haga es viajado (ángulo de incidencia diferente de $\pi/2$ rad (90°)), las dimensiones características de la carretera deberán acotarse tomando sus dimensiones proyectadas al eje de la línea o red de que se trate.
7. En la parte central inferior se graficarán los datos de cotas de terreno y de zanja, así como la profundidad, ancho y kilometraje de ésta en cruzamientos subterráneos; cuando sean aéreos se representarán cotas de terreno, profundidad de hincado vertical del poste, separación del postes, longitud del poste, catenaria del cable, etc.
8. En el ángulo superior izquierdo se dibujará el croquis general de localización, lo más simplificado a ilustrativo que sea posible, de manera que permita reconocer y ubicar la obra conforme a las poblaciones y carretera. En él se marcarán los siguientes puntos:
- a) El norte geográfico será dibujado de forma visible y hacia arriba.
 - b) La jurisdicción y el número de la carretera.
 - c) Nombre y dirección en que se encuentran las poblaciones más cercanas en ambos sentidos de la carretera.
 - d) En color rojo se dibujará el trazo de la línea o red, encerrando en un círculo la zona donde dicha línea cruza la carretera.
9. En la parte central izquierda se dejará un espacio de 120 x 200 milímetros para notas S.C.T., recomendaciones y procedimientos de construcción, bajo el título de "OBSERVACIONES".

10. En el ángulo inferior izquierdo se dibujará el detalle del corte transversal de la instalación de la zanja, acotando su ancho y profundidad, así como la altura de la rasante y desniveles del terreno natural al lomo del tubo, cuando se trate de instalaciones subterráneas; y para líneas aéreas, se indicará la altura de la rasante al cable.
11. En el ángulo superior derecho se anotará en un cuadro, la lista de materiales, características de la línea o red y especificaciones de fabricación, así como los datos complementarios que se consideren necesarios para el análisis.
12. En la parte central derecha se dejará un espacio de 180 x 230 milímetros para notas S.C.T.
13. En el ángulo inferior derecho se localizará el cuadro usual S.C.T., de 120 x 100 milímetros, y el cuadro de referencia del interesado que contiene datos generales como los siguientes:

Nombre del solicitante, identificación del camino, tipo de cruzamiento, nombre y firma de los que intervienen en el proyecto de la obra y en la autorización de la misma, fecha, número de plano, etc.

7.4. CRUCES CON FERROCARRIL.

Los cruces con ferrocarril podrán resolverse de acuerdo a lo indicado en 7.3 para cruces con caminos y carreteras. El colchón entre la base del durmiente y la parte superior de la camisa protectora no deberá ser menor de 2.0 m. La profundidad, el espesor y el material de la camisa dependerá del análisis de las cargas exteriores de acuerdo a las secciones 5.3 y 6.3. Para el cálculo de dichas cargas se considerará un equipo COOPER E-80.

Lo relativo al diámetro de la camisa, muros de cabeza, inspección y prueba, recubrimiento anticorrosivo y protección catódica, estará regido por lo indicado en la sección 7.3.1.

Cuando la protección se haga mediante zanja a cielo abierto, se instalará una estructura provisional, a fin de sostener la vía de ferrocarril (Figura 7.5). Dicha estructura será provista por Ferrocarriles Nacionales.

7.4.1. Conformación del plano de cruce

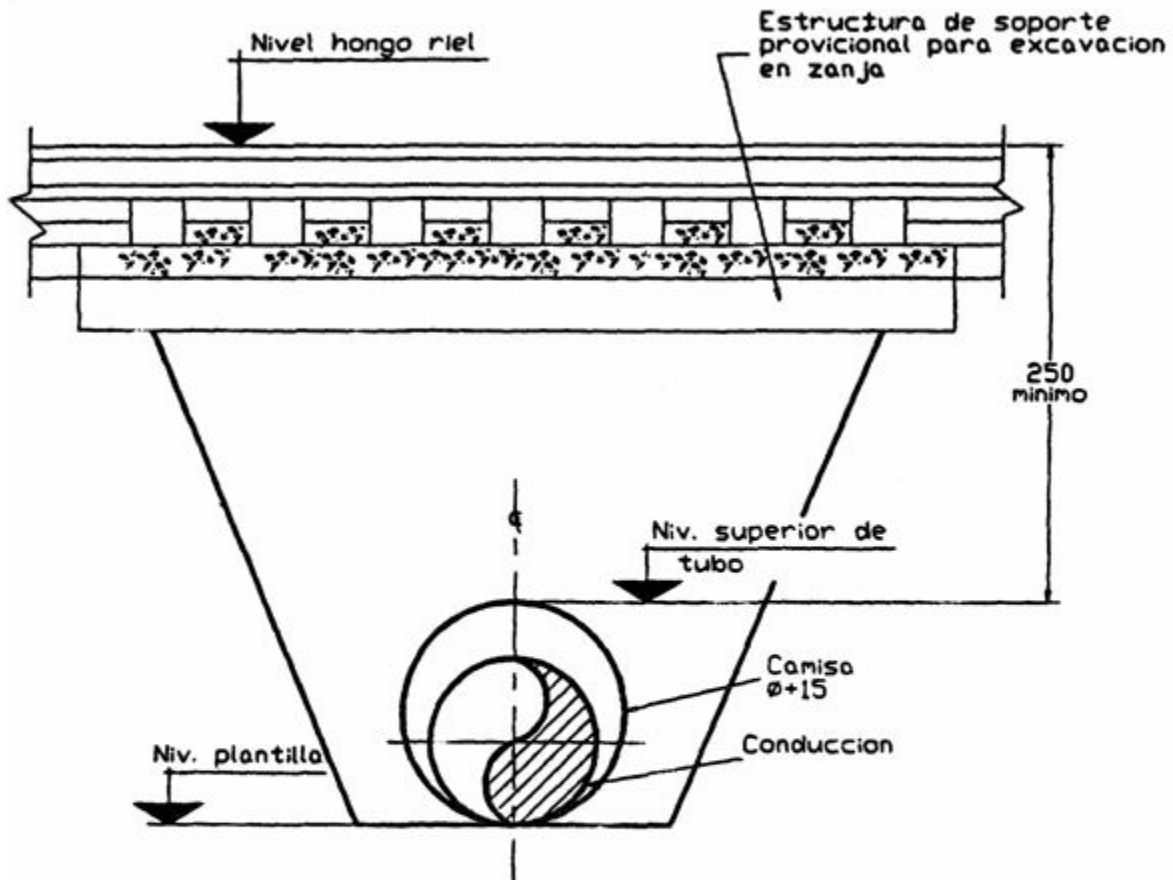
Para realizar un cruce con una vía de ferrocarril, se iniciará la solicitud en el Centro de la Secretaría de Comunicaciones y transportes, para posteriormente pasar a Ferrocarriles. La solicitud contendrá el nombre, firma y cédula profesional del ingeniero o perito responsable.

La documentación que se debe presentar es la siguiente:

- 1) Plano original en papel herculene o tela calca, el cual contará con croquis de localización, planta a detalle, corte longitudinal en sentido del tubo conductor, detalle de conexiones especiales, procedimiento constructivo, recuadro con

datos del solicitante, nombre, firma y cédula profesional del ingeniero responsable.

- 2) Dos maduros.
- 3) Doce copias heliográficas.
- 4) Memoria justificativa.



NOTA

Esta estructura aplica cuando no es posible el incado.

Figura 7.5 Estructura provisional de soporte

- 5) Memoria descriptiva.
- 6) Memoria de cálculo.

Las tres últimas en original y doce copias

Las dimensiones y distribución del plano deberá cumplir con lo indicado para cruces con caminos de la S.C.T. según se establece la sección 7.3.3.

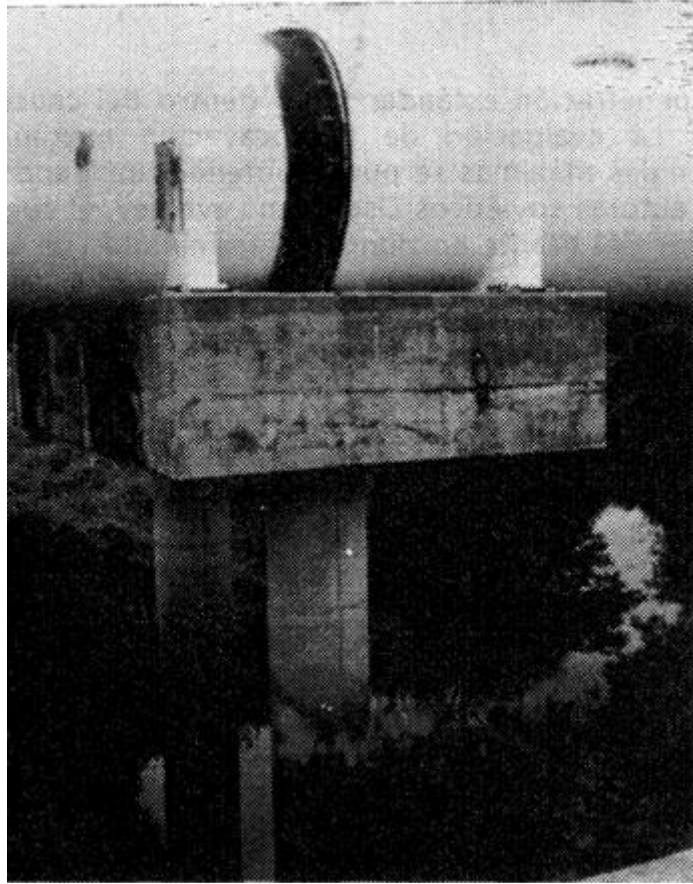
7.5. CRUCES CON RÍOS.

El cruce con ríos, arroyos y canales se puede hacer aéreo o subterráneo. El cruce aéreo se utiliza cuando el claro por salvar no es muy grande, incluso cuando el claro es relativamente corto la tubería se instala con contraflecha al centro y autosoportada en los extremos. También se pueden utilizar puentes existentes, construidos exprofeso o con estructuras de soporte. Las Figuras 6.6, 6.7 y 6.8 muestran cruces aéreos con tubería autosoportada y con estructura de soporte, que pueden aplicarse también a cruces con canales, arroyos y barrancas (ver Fotografías 7.1 y 7.2). El cruce subterráneo se utiliza cuando el claro por salvar es grande. El diseño tiene por objeto proteger la tubería de la acción de la corriente y erosión. Generalmente la tubería se instala en una zanja dragada o excavada bajo el lecho de la corriente. La tubería deberá recubrirse con concreto para contrarrestar la flotación que se presenta durante las fases de construcción y operación. Por otro lado, si existe navegación en el cauce es necesario el enterrado de la tubería, para que ésta no interfiera con las actividades de las embarcaciones y al mismo tiempo se proteja de posibles daños.

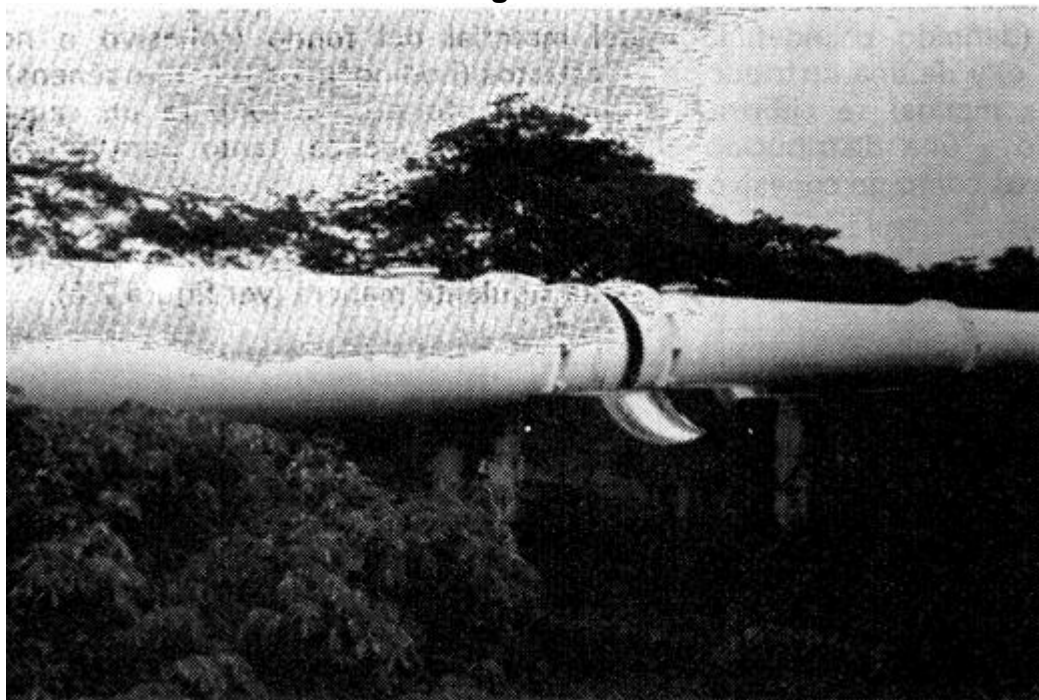
La tubería podrá depositarse en el fondo del cauce cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- El peso de la tubería y lastre de concreto sean suficientes para evitar la flotación.
- No exista navegación que pueda interferir con la línea.
- La velocidad de corriente y la erosión sean tan bajas que no dañen a la tubería.

Para evitar que la tubería quede expuesta a una posible erosión del fondo del cauce, se realizarán sondeos para determinar la estratigrafía del sitio, así como estudios hidrológicos y topohidráulicos. Con la información anterior se calculará la profundidad de socavación y por ende la profundidad de desplante de la tubería.



Fotografía 7.1



Fotografía 7.2

Los sondeos pueden ser de penetración estándar tanto dentro del cauce como en ambos márgenes. La evaluación de la socavación máxima probable causada por las avenidas máximas se puede obtener empleando el método matemático de los autores soviéticos Lischtuan-Levediev, el cual consiste en determinar el valor del tirante en puntos determinados de la sección después de la socavación.

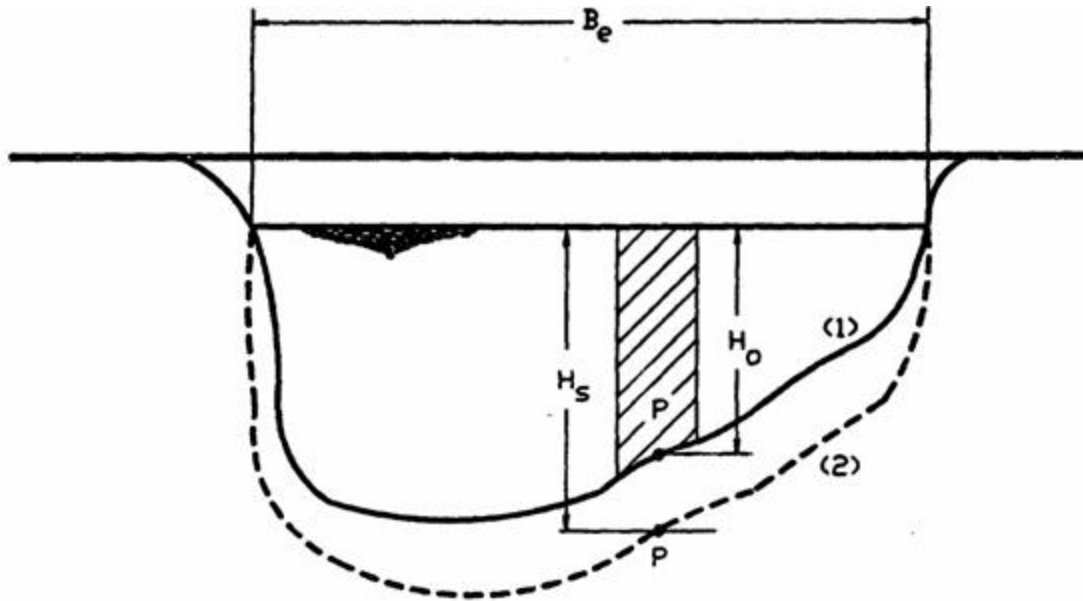
De acuerdo con estos autores, con el incremento del volumen de agua, que pasa por una sección determinada durante las avenidas, se presenta un aumento de la velocidad y capacidad de arrastre de los materiales del fondo. Como resultado, el fondo del cauce tiende a ser socavado y conforme aumenta el área hidráulica disminuye la velocidad, hasta que la capacidad de transporte se iguala puesto que los sedimentos de las secciones vecinas aguas arriba siguen siendo aportados; se alcanza un estado de equilibrio.

El equilibrio existe cuando se igualan la velocidad media real de la corriente (V_r), y la velocidad media que se requiere para que cierto material sea arrastrado (V_e). La primera velocidad depende de las características topohidráulicas del cauce, como son pendiente, velocidad y tirante, mientras que la segunda depende de las características del material del fondo y del tirante de la corriente.

Los autores han desarrollado procedimientos de cálculo que dependen del cauce (definido o indefinido), del material del fondo (cohesivo o no cohesivo) y, de una distribución de estratos (homogéneos o heterogéneos). En este manual se cubrirá el procedimiento propuesto para un cauce definido y una distribución de estratos homogénea, tanto para suelos cohesivos como no cohesivos.

Cuando se trate de suelos cohesivos, el tirante de agua hasta el punto donde hay socavación se calcula de la siguiente manera (ver Figura 7.6).

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_o^{5/3}}{0.60 \beta \gamma_s^{1.18}} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad (7.1)$$



(1) perfil antes de la socavación
 (2) perfil después de la socavación
Figura 7.6 Sección de un río

donde:

- α es el coeficiente de distribución del gasto.
- H_s es el tirante después de la socavación (m)
- H_o es el tirante antes de la socavación (m)
- β es el coeficiente de paso que depende de la frecuencia con que se repite la avenida que se estudia, Tabla 7.1.
- γ_s es el peso volumétrico del material seco (t/m^3)
- x es el exponente variable función de γ_s , Tabla 7.2.

$$\alpha = \frac{Q_d}{H_m^{5/3} B_e} \quad (7.2)$$

donde:

- Q_d es el gasto de diseño (m^3/s).
- H_m es el tirante medio de la sección, se obtiene dividiendo el área hidráulica efectiva entre el ancho B_e (m)
- B_e es el ancho efectivo de la superficie libre (m)

Para suelos no cohesivos, el tirante de agua hasta el punto donde hay socavación se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_o^{5/3}}{0.68 \beta D_m^{0.28}} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad (7.3)$$

donde: D_m es el diámetro medio de los granos del fondo(mm)

Una vez determinada la profundidad de desplante de la línea y el perfil topográfico del cauce, se marca la profundidad requerida y se obtienen las cotas de la zanja hasta llegar a las proximidades de ambos márgenes. Posteriormente, se localizan los puntos de inicio de curva para trazar las curvas verticales de salida. Conocido el radio de curvatura y los puntos de inicio de curva, se calcula, por trigonometría, la localización de los cadenamientos. El plano de cruce debe contener como mínimo un croquis de localización de la obra, una planta que indique la topografía del cauce, un perfil que señale la profundidad del cauce y del enterrado, así como los puntos de inicio y termino de curva, radio de curvatura, deflexión y longitud de curva. En el perfil se indicará kilometraje, profundidad de zanja, cotas de zanja y de terreno. En un recuadro se marcarán las

Tabla 7.1 Valor del coeficiente β

Probabilidad, en porcentaje, de que se presente el gasto de diseño.	Coeficiente β
100.0	0.77
50.0	0.82
20.0	0.86
10.0	0.90
5.0	0.94
2.0	0.97
1.0	1.00
0.3	1.03
0.2	1.05
0.1	1.07

Tabla 7.2 Valores de x y 1/(1+x), para suelos cohesivos y no cohesivos

SUELOS COHESIVOS						SUELOS NO COHESIVOS					
γ_s	x	1/(1+x)	γ_s	x	1/(1+x)	Dm (mm)	x	1/(1+x)	Dm (mm)	x	1/(1+x)
0.80	0.52	0.66	1.20	0.39	0.72	0.05	0.43	0.70	40	0.30	0.77
0.83	0.51	0.66	1.24	0.38	0.72	0.15	0.42	0.70	60	0.29	0.78
0.86	0.50	0.67	1.28	0.37	0.73	0.50	0.41	0.71	90	0.28	0.78
0.88	0.49	0.67	1.34	0.36	0.74	1.00	0.40	0.71	140	0.27	0.79
0.90	0.48	0.67	1.40	0.35	0.74	1.50	0.39	0.72	190	0.26	0.79
0.93	0.47	0.68	1.46	0.34	0.75	2.50	0.38	0.72	250	0.25	0.80
0.96	0.46	0.68	1.52	0.33	0.75	4.00	0.37	0.73	310	0.24	0.81
0.98	0.45	0.69	1.58	0.32	0.76	6.00	0.36	0.74	370	0.23	0.81
1.00	0.44	0.69	1.64	0.31	0.76	8.00	0.35	0.74	450	0.22	0.83
1.04	0.43	0.70	1.71	0.30	0.77	10.00	0.34	0.75	570	0.21	0.83
1.08	0.42	0.70	1.80	0.29	0.78	15.00	0.33	0.75	750	0.20	0.83
1.12	0.41	0.71	1.89	0.28	0.78	20.00	0.32	0.76	1000	0.19	0.84
1.16	0.40	0.71	2.00	0.27	0.79	25.00	0.31	0.76			

características de la tubería y del lastre de concreto. Se incluirá un corte donde se indique el concreto, localización de la malla de alambre y la protección anticorrosiva.

Para protección contra efectos de la corrosión, se instalará, adicional al recubrimiento anticorrosivo, un sistema de protección catódica para la tubería, de acuerdo al capítulo 9., además de la protección mecánica a base de concreto que ofrezca buena resistencia al arrastre y por tanto a la socavación.

7.5.1. Fuerzas de flotación

Para que una tubería en el cruce con un río permanezca estable en las direcciones horizontal, vertical y longitudinal, se requiere que las fuerzas externas a internas que actúen en cualquier momento sobre ella, estén en equilibrio.

Las principales fuerzas verticales que se presentan en la tubería en un cruce con un río, son la fuerza de flotación (F_B) y de hidrodinámica de levantamiento (F_L). La fuerza de flotación resulta del peso sumergido de la tubería en agua. La flotación positiva se presenta sobre aquellos cuerpos que en aire pesan menos que el agua desplazada cuando se sumergen. En el caso de tuberías, debe determinarse la magnitud de la fuerza neta de flotación positiva para estabilizar la tubería. La siguiente expresión es utilizada para el cálculo de la fuerza de flotación:

$$F_B = \frac{\pi}{4}(d_e + 2tr + 2tc)^2 \quad (7.4)$$

donde:

- F_B es la fuerza de flotación (N/m)
- d_e es el diámetro de la tubería (mm)

- tr es el espesor de recubrimiento anticorrosivo (mm)
 tc es el espesor del lastre de concreto (mm)

Se recomienda un factor de seguridad de 1.1 para garantizar la estabilidad de la tubería por flotación:

$$F \cdot S = \frac{gW_T}{F_B} = 1.1 \quad (7.5)$$

donde:

- F·S es el factor de seguridad a flotación.
 W_T es la masa tubo más masa recubrimiento más masa concreto (Kg/m)
 F_B es la fuerza de flotación(N/m)

7.5.2. Espesor de lastre de concreto

Si la suma de las fuerzas de flotación y de levantamiento son más grandes que el peso sumergido de la tubería, se requerirá peso artificial para estabilizarla por el movimiento vertical. Generalmente se utilizará lastre de concreto, cuya fuerza será:

$$F_c = \frac{\pi}{4} g \gamma_c (d_c^2 - d^2) \quad (7.6)$$

donde:

- F_c es la fuerza debida al peso de concreto (N/m)
 γ_c es la densidad del concreto (kg/m³)
 D_c es el diámetro del tubo con el lastre de concreto (m)
 d_i es el diámetro interior del tubo (m)

Para la estabilidad vertical, el peso en exceso de la tubería no debe exceder la capacidad última de soporte del suelo.

En la etapa inicial del análisis de estabilidad hidrodinámica, se considerará un espesor preliminar de recubrimiento de concreto de cero. Si la flotación es positiva, se supondrá un espesor de concreto hasta obtener flotación negativa.

Por requerimientos constructivos, se recomienda que el espesor mínimo del lastre de concreto sea 25.4 mm y el máximo sea de 152.4 mm.

7.5.3. Densidad de lastre de concreto

El lastre de concreto que se aplica sobre el recubrimiento anticorrosivo y se refuerza con una o varias capas de malla de acero galvanizado, debe ser un concreto resistente que se encuentre libre de cavidades y bolsas de aire. La densidad estándar del concreto es 2200 Kg/m³. En caso de requerirse una densidad mayor,

ésta puede conseguirse agregando a la mezcla material ventonítico, mineral de hierro, escoria de alto horno o barita.

7.6. CRUCES CON PANTANOS.

Cuando se tenga que cruzar una zona pantanosa, se deberá seleccionar una ruta que presente el menor número de problemas, tanto para la etapa de construcción como para su mantenimiento.

La construcción de la línea puede realizarse a través de peras de lanzamiento (montículos de tierra firme) construidas para tal efecto, mediante la fabricación y unión de lingadas de tubería que serán flotadas y jaladas hasta el punto de conexión en tierra firme. Se deberá revisar la flotación de la tubería con un espesor mínimo de lastre de concreto (25.4 mm), como se indica en la sección 7.5.

Por las características agresivas que suelen presentarse en este tipo de zonas, debido al alto contenido de agua y baja resistividad del suelo, será necesario proteger a la tubería con un recubrimiento anticorrosivo y protección catódica como se indica en el capítulo 9.

Para el cruce con lagos se considerarán los conceptos mencionados en los puntos 7.5 y 7.6.

7.7. CRUCES CON BARRANCAS.

En los lugares donde la topografía es accidentada, es común encontrarse con problemas relacionados con la trayectoria de la línea conductora y el nivel del terreno natural, ya que éste es muy variable, presentándose en ocasiones en forma de depresiones que forman barrancas naturales.

Se debe tener presente que las características propias de las barrancas dependen de las condiciones climatológicas del lugar durante todo el año. Es por esto que el diseñador debe considerar todos los parámetros que pueden verse involucrados, y contar con información, como puede ser, características del suelo en ambos márgenes del cruce en épocas de avenidas máximas, erosión del suelo, así como los posibles cambios que el lugar pueda experimentar con el transcurso del tiempo.

El cruce con una barranca puede ser superficial o aéreo, pudiendo ser en el último caso tubería autosoportada, apoyada en estructuras existentes o de soporte (Figuras 6.6, 6.7 y 6.8 y Fotografía 7.3).

7.7.1. Tubería superficial

Cuando la selección del cruce sea superficial, se deberán diseñar los soportes y los atraques que servirán para sostener el peso de la tubería. Dependiendo del peso de la tubería, de la pendiente de la barranca y del tipo de suelo, se seleccionará la separación y dimensiones de los atraques (Fotografía 7.4). Cuando la fuerza que

haya que detener sea muy alta o se trate de un suelo blando, se podrá combinar el ataque de concreto embebido en el suelo con pilotes cortos inclinados (anclas) de acero o de concreto, para incrementar su capacidad de carga al deslizamiento. Se seguirán las recomendaciones dadas en el capítulo 6. Cuando se trate de un suelo rocoso, los atraques podrán llevar anclas inclinadas que proporcionarán un volumen o masa mayor a las acciones.

7.7.2. Tuberías autoportables

Son aquellas que se utilizan para salvar claros pequeños y en los cuales no se presentan problemas de deflexión, sin embargo, en el caso de que éstas se presenten, se pueden corregir dándose una contraflecha a la tubería, de tal manera que cuando esta sea instalada y puesta en operación no se tengan problemas de esfuerzos y deflexiones.

7.7.3. Tuberías apoyadas en estructuras existentes

Siempre que sea necesario un cruzamiento, se tiene que investigar la infraestructura existente en el lugar y tratar de aprovechar las estructuras que son utilizadas como vías de acceso de un tramo a otro en las depresiones naturales. En primer término, se debe de tener la seguridad de que la estructura se encuentre en buen estado estructural y que su vida útil sea la suficiente como la de la línea que se pretende instalar.

Posteriormente, se colocarán los puntos de apoyo de la línea conductora, de acuerdo con la configuración y condición de operación de ésta, cuidando siempre que no aparezcan problemas de esfuerzos.

Se debe verificar que los puntos de apoyo seleccionados en la línea correspondan a los elementos principales de la estructura existente y que no causen problemas a ésta.

Se verificará que los posibles efectos de la estructura existente, por sus condiciones de carga propia, no sean transmitidos a la línea conductora, para lo cual se diseñarán apoyos que sean capaces de disminuir las acciones transmitidas, utilizando materiales plásticos como el neopreno en los puntos de contacto.

7.7.4. Tuberías con estructuras de soporte

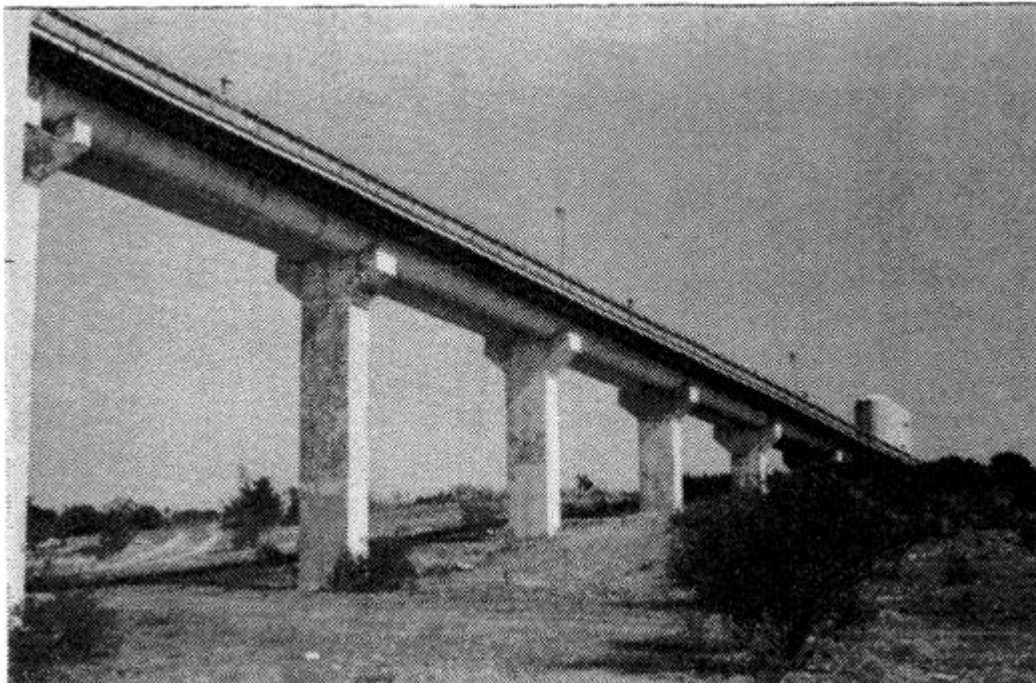
Cuando sea necesario utilizar barrancas grandes, se tendrán que modular los claros de tubería para que no se presenten esfuerzos mayores a los permisibles; para lo cual se hace necesario proyectar una estructura especial que soporte a la línea de conducción.

Entre algunos tipos de estructuras que pueden ser seleccionadas para este caso, se mencionan los arcos, armaduras, puentes suspendidos, puentes continuos, etc., o alguna combinación que pueda que presente mayores ventajas.

En el análisis estructural de este tipo de estructuras, se considerarán todas las posibles cargas o combinación de éstas, que puedan resultar más desfavorables

7.8. CRUCES CON CANALES DE RIEGO

Cuando se requiera realizar un cruce con un canal de riego, se buscará evitar que la línea de conducción cruce por abajo, debido a que se pueden presentar fugas de agua en el canal. Si la tubería es hincada, el suelo puede fluir por el tubo al momento del hincado y si se llega a romper el canal, puede producirse falta de estabilidad en el tubo debido al suelo saturado. El cruce se hará aéreo, pudiendo ser tubería autosoportable (sección 7.7.2), tubería apoyada en estructura existente (sección 7.7.3) y tubería con estructura de soporte (sección 7.7.4). Si se trata de un canal que la mayor parte del tiempo permanecerá seco, y además se tienen buenas condiciones del terreno, se podrá instalar la tubería bajo el canal.



Fotografía 7.3



Fotografía 7.4

8. TUBERÍAS SUBMARINAS

8.1. GENERALIDADES

La instalación de tuberías de acero en el mar ha tenido su mayor uso en la industria petrolera. La primera tubería submarina que registra la historia del petróleo, se instaló durante la Segunda Guerra Mundial, entre las costas de Inglaterra y Francia, con el fin de abastecer de combustible a las Fuerzas Aliadas en el Continente. A fines de la década de los cuarenta, la explotación de petróleo frente a las costas de Louisiana, U.S.A. marcó el inicio de la instalación de tuberías en el mar a gran escala.

Los requisitos de abastecimiento de agua potable a las poblaciones del país, pueden llegar a plantear, ocasionalmente, la necesidad de instalar tuberías de acero en mares y lagunas. A continuación se describen brevemente las actividades involucradas en los procesos de diseño e instalación.

8.2. PROCESO DE DISEÑO.

Las fuerzas que provoca el ambiente marino sobre las tuberías submarinas, hace necesario para el diseñador conocer tanto las características de oleaje y corriente como las condiciones del lecho marino en la ruta, sobre el cual se instalará la tubería submarina. Por ello la primera fase del proceso de diseño es la selección de la ruta para la tubería.

Mediante estudios geofísicos y geotécnicos, el diseñador puede conocer las condiciones del lecho marino sobre el cual se instalará la línea y con estos datos seleccionar una ruta que evite obstáculos. Los estudios geofísicos y geotécnicos deben incluir:

- a) Imagen de fondo marino, mediante sonar de barrido lateral.
- b) Estructura geológica y composición del subfondo marino, mediante perfilador del subfondo marino.
- c) Detección de anomalías magnéticas, con la utilización del magnetómetro.
- d) Muestras de suelo; dependiendo del tipo de suelo, se puede emplear el muestreador de gravedad, de pistón a otros; asimismo, la separación entre muestras a lo largo de la ruta investigada, dependerá de la variabilidad esperada de los sedimentos.

Los estudios geofísicos y geotécnicos se realizan desde un barco llamado "Barco Geofísico", que efectúa un levantamiento continuo de datos geofísicos.

Los datos oceanográficos más usados para definir las condiciones de diseño de la línea, son la combinación más severa de alturas de ola significativa y velocidad de corriente, correspondiente a un período de retorno de 100 años. Igualmente, para definir las condiciones de diseño durante la construcción, se utiliza la combinación más severa de altura de ola significativa y velocidad de corriente que pueda ocurrir durante la temporada de construcción.

Con los datos oceanográficos obtenidos, la ruta definida, la presión y la temperatura de operación, se inicia el diseño.

Primeramente, se define la resistencia del acero y el espesor de pared en función de la presión interna de operación y de la presión externa ambiental, que son aquellas a las que estará sometida la tubería en condiciones normales de operación. Este espesor de pared se deberá revisar para que soporte adecuadamente las fuerzas a las que estará sometida la línea durante la fase de construcción. Generalmente, es durante la etapa de construcción cuando la tubería se somete a las mayores esfuerzos que experimentará durante toda su vida útil.

Existen diversos métodos para tender la tubería submarina sobre el lecho marino. Dependiendo de la profundidad, longitud de la línea y diámetro de la tubería se pueden emplear los métodos de barcaza de tendido convencional, barcaza de tambor, jalado o remolque de la tubería, etcétera. Los esfuerzos que experimenta la tubería durante su instalación varían en función del método empleado y deberán revisarse los esfuerzos que ocurren sobre la tubería durante el proceso de tendido. Los métodos de análisis que se utilizan para realizar la revisión de esfuerzos se describen con más detalle en la sección 8.4 y los procedimientos constructivos se revisarán en la 8.3.

Una vez que la tubería ha sido depositada sobre el lecho marino, la decisión de enterrarla o dejarla permanentemente sobre el lecho marino, dependerá de los resultados que arroje el análisis de estabilidad hidrodinámica.

Dicho análisis tiene por objeto revisar las fuerzas que el peso de la corriente marina alrededor de la tubería produce sobre ésta, como son: fuerzas de arrastre, de levantamiento y de inercia, las cuales se compensan aumentando el peso de la tubería, generalmente con la aplicación de un recubrimiento de concreto como lastre. No obstante, existen otros métodos para anclarla. En la sección 8.5 se describirá con más detalle la forma como se producen las fuerzas hidrodinámicas y el procedimiento para analizar la estabilidad de la tubería ante las fuerzas provocadas por la corriente.

Por otra parte, aun cuando la tubería vaya a ser enterrada, no siempre es posible hacerlo inmediatamente después del tendido. Por esta razón, también se requiere del análisis de estabilidad hidrodinámica, para garantizar la estabilidad de la tubería durante el período que permanezca sobre el lecho marino.

Existen diversos métodos para abrir la zanja en la que se depositará la tubería, entre ellos están el método del chorro, el de corte mecánico, el de fluidización y el de arado. El diseñador podrá definir el método que se empleará, en función de las propiedades mecánicas del suelo marino, determinadas a partir de las muestras obtenidas por el barco geofísico.

Otro aspecto significativo del proceso de diseño es la protección anticorrosiva de la tubería. El mar es uno de los medios más corrosivos que existen y un diseño

apropiado de la protección anticorrosiva es fundamental para lograr un comportamiento adecuado de la línea. Generalmente, las tuberías submarinas de acero se protegen por dos medios: los recubrimientos anticorrosivos externos y la protección catódica.

Entre los recubrimientos anticorrosivos externos que se pueden utilizar se encuentran los esmaltes de alquitrán de hulla, recubrimientos epóxicos y cintas de polietileno, entre otros.

Los recubrimientos anticorrosivos externos pueden llegar a dañarse durante las etapas de transporte, instalación a operación de la tubería. Para complementar la protección que ofrecen los recubrimientos, comúnmente se emplea la protección catódica. La corrosión es en esencia un fenómeno electroquímico, en el cual las partículas anódicas fluyen hacia las catódicas en presencia de un electrólito.

El sistema de protección catódica aprovecha el mismo proceso de corrosión. Mediante la instalación de ánodos de sacrificio se crea un potencial eléctrico de protección. Mientras los ánodos se corroen, la tubería queda protegida contra la corrosión

8.3. PROCEDIMIENTOS DE TENDIDO.

Entre los métodos que existen para colocar la tubería sobre el lecho marino se han mencionado el de la barcaza convencional de tendido, el de la barcaza de tambor y el método de remolque.

El método de la barcaza convencional de tendido es el que más se emplea para tender grandes distancias de tubería, en aguas medias y relativamente profundas, para diámetros medios y grandes.

El método de la barcaza de tambor se ha utilizado con mayor éxito para tender tubería de pequeño diámetro, en aguas hasta de 200 m. de profundidad.

En el método de remolque, una sección de tubería es jalada por un remolcador, ya sea sobre la superficie del mar o bajo ella, incluso corte del fondo. Este sistema constructivo se ha empleado para diversos diámetros de tubería y profundidades de remolque.

La selección del método constructivo depende de factores tales como: longitud de tubería por instalar, diámetro, distancia de la Costa, etc. así como requisitos de economía.

El método de tendido seleccionado tiene un impacto directo sobre el diseño, pues el tipo y nivel de esfuerzos que se presentan sobre la tubería, durante la fase de tendido, dependen del método de instalación empleado. A continuación se describirán los procedimientos de tendido que se siguen con los métodos antes

mencionados. En la sección 8.4 se señalarán los métodos de análisis correspondientes al procedimiento de tendido empleado con mayor frecuencia.

8.3.1. Método de la barcaza convencional de tendido

El proceso de tendido de la tubería submarina se inicia con la fabricación misma del tubo. Los tubos se elaboran mediante diferentes procesos, según el diámetro, espesor de pared y calidad que se requiera. Los procesos de fabricación más comunes son el rolado en caliente, para tubería sin costura, y los procesos de rolado continuo y el denominado UOE, en frío para tubería con costura. Igualmente, los procesos de soldadura van desde la resistencia eléctrica sin metal de aporte, hasta el proceso de arco sumergido (ver capítulo 2.).

Los tubos son entonces llevados hasta el patio de lastrado. Primero se aplica el recubrimiento anticorrosivo, previa limpieza con chorro de arena. A continuación se lastra cada tubo mediante el proceso de concreto lanzado. El concreto queda reforzado con una malla de alambre que se instala alrededor del tubo, previamente a la aplicación del concreto. Es también en el patio de lastrado donde se instalan los ánodos de sacrificio, sobre un cierto número de tubos. Los ánodos son anillos o brazaletes hechos de aleaciones de aluminio, zinc y metales raros, y colados de forma tal, que su espesor sea igual al espesor del lastre de concreto, a fin de que el diámetro exterior sea uniforme. Por otra parte, los extremos de los tubos deben quedar desnudos, a fin de poder soldarlos cuando se realice el tendido desde la barcaza.

Una vez que los tubos han sido recubiertos y lastrados, se colocan sobre chalanes o barcasas, para posteriormente ser remolcados hasta el sitio de la instalación. Los tubos son entonces izados a la cubierta de la barcaza de tendido. La Figura 8.1 muestra una barcaza de tendido convencional con los elementos de mayor significancia para el tendido de tubería; asimismo, se puede observar la configuración en forma de S que adquiere la tubería mientras va siendo bajada al fondo.

El proceso de tendido se inicia soldando una cabeza de jalado al primer tramo de tubo. Esta cabeza es un tapón que evite la entrada de agua de mar a (a tubería. Sobre el tapón se suelda una " oreja " u ojal, para así enganchar sobre ella un cable de acero. En el extremo opuesto del cable se coloca una ancla, que será lanzada al fondo. El cable se hace pasar por el pontón y a lo largo de la línea de montaje hasta un malacate, con el que se logra la tensión inicial requerida. Entonces se transfiere la tensión a la cabeza de jalado y se inicia el tendido.

Conforme se van adicionando tubos, la barcaza va avanzando sobre las líneas de anclaje, cobrando doble con las anclas de proa y liberándolo en las de popa. Sobre el último tubo se instala también una cabeza de jalado, con el fin de bajar esta última sección con una tensión controlada.

Generalmente, después de que la tubería ha sido colocada sobre el lecho marino, se procede a abrir una zanja para depositarla y protegerla contra la hostilidad del ambiente marino. Se pueden emplear diversos métodos para enterrar la tubería, como son: el de chorro, el de corte mecánico y el de fluidización o del arado. El que comúnmente se utiliza en terrenos suaves es el método del chorro.

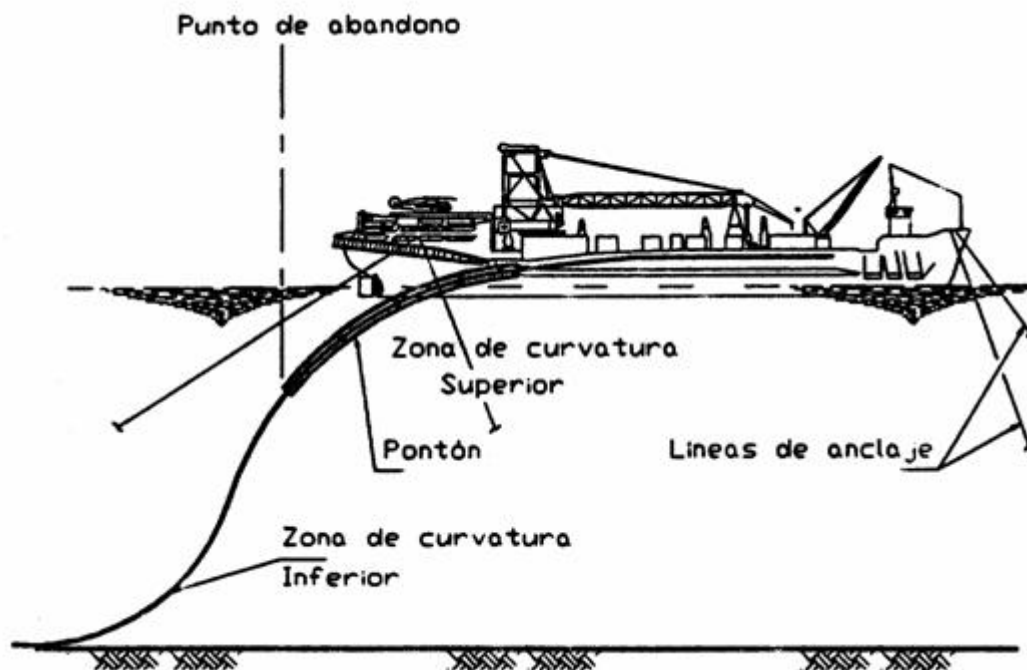


Figura 8.1 Barcaza de tendido convencional

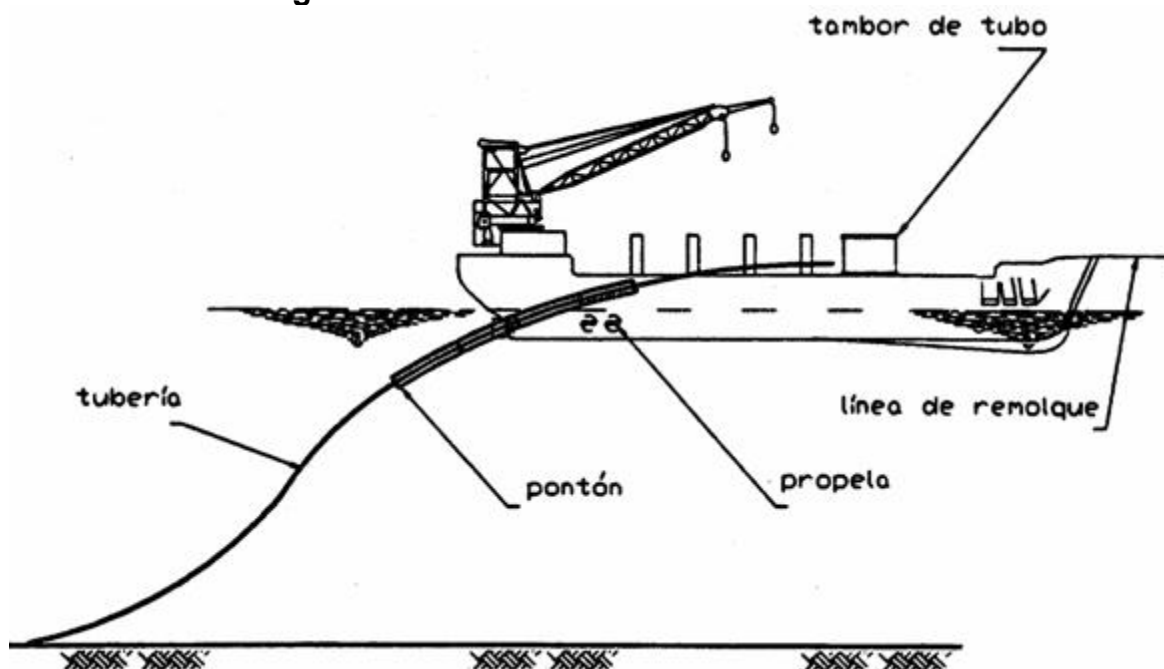


Figura 8.2 Barco de tendido con tambor horizontal

Sobre la cubierta de la barcaza se encuentra la línea de montaje, que generalmente ocupa una banda de la embarcación. Los tubos son pasados uno por uno a la línea de montaje, en donde se alinean y sueldan. Cada soldadura de campo es inspeccionada al 100 % por medios radiográficos. Conviene mencionar que mediante tensionadores instalados sobre la línea de montaje, se mantiene una tensión predeterminada sobre la línea, a fin de controlar la curvatura que adquiere la tubería y por ende los esfuerzos sobre ésta.

8.3.2. Barcaza de tambor

El método de la barcaza de tambor se ha aplicado para instalar tubería en profundidades hasta de 200 m. Sus principales limitaciones son el diámetro de la tubería, con un máximo probable de diez pulgadas de diámetro y la necesidad de emplear espesores de pared gruesos. Dichas limitaciones se deben a que la tubería debe ser enrollada sobre un carrete o tambor. Asimismo, la longitud de tubería que puede ser enrollada sobre el carrete, depende del diámetro del tubo.

Existen dos variantes del método, una en la que el carrete con tubería se coloca verticalmente sobre el barco y otra en la que se ubica horizontalmente. En ambos casos la tubería se ensambla en tierra, es decir, los tubos son soldados y examinados mediante pruebas no destructivas en instalaciones de tierra. La tubería ensamblada y protegida contra la corrosión es entonces arrollada sobre el carrete. Cuando esta operación ha sido concluida, el barco puede zarpar y dirigirse al sitio de la instalación.

El inicio de las maniobras de tendido en el caso de la barcaza de tambor es similar a las operaciones de la barcaza de tendido convencional. En el caso de la barcaza con carrete horizontal, se requiere de un pontón. La tubería pasa primero por enderezadores y posteriormente por el pontón, el cual tiene las mismas funciones especificadas en el caso de barcaza convencional de tendido. La Figura 8.2 muestra un barco con carrete horizontal, así como los principales elementos que intervienen en el tendido de tubería. En este caso, el soporte que requiere el barco de tendido se limita a un remolcador y a un barco de soporte de buceo.

En el sistema de barco de tendido con carrete vertical no es necesaria la instalación de un pontón. Como se puede observar, en la Figura 8.3 la tubería sale de la bobina por la parte superior, lo que permite que entre al agua con un cierto ángulo de inclinación. Dicha inclinación evita la formación de la zona de curva superior, mostrada en la Figura 8.1, y por lo tanto, se descarta la necesidad del pontón.

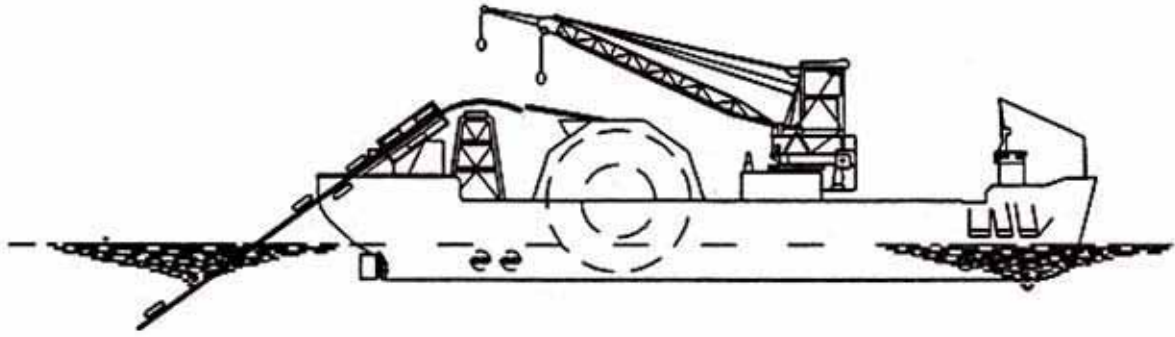


Figura 8.3 Barco de tendido con tambor vertical.

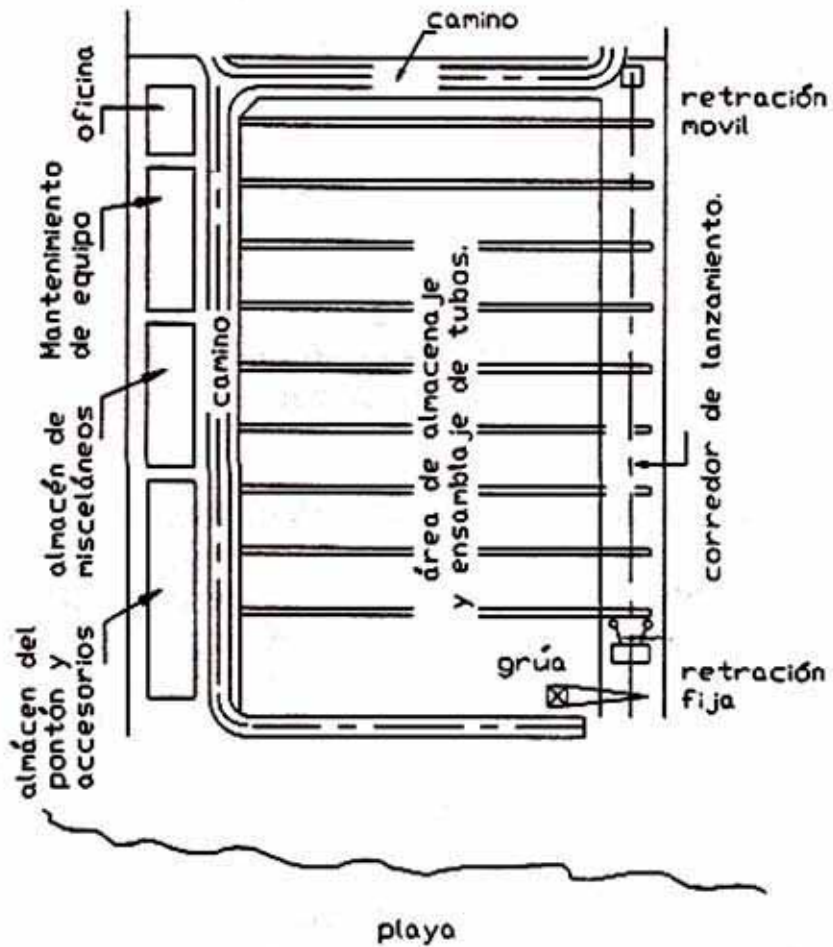


Figura 8.4 Patio de ensamble de tubería

8.3.3. Método de remolque

Los métodos descritos en los dos incisos anteriores, la barcaza convencional de tendido y la barcaza de tambor, son métodos que han probado su eficacia a través de numerosos proyectos de instalación de tubería. Sin embargo, la cantidad y grado de sofisticación de los equipos, instalaciones y maquinaria necesaria para su aplicación, hacen de ellos métodos costosos.

Una de las opciones económicamente atractivas para líneas cortas o en áreas remotas, es el método de jalado. La reducción en las demandas de equipo a bordo, así como las reducciones substanciales en los costos de movilización y desmovilización de las embarcaciones hacen del método de remolque una alternativa viable para el abastecimiento de agua potable.

Existen tres variantes del método de jalado.

- a) Jalado Superficial.
- b) Jalado Subsuperficial.
- c) Jalado Arriba del Fondo.

En todos los casos, la primera etapa en el proceso constructivo consiste en armar, en un patio de fabricación sobre la playa, las secciones de tubería que han de ser remolcadas. La Figura 8.4 muestra la configuración de un patio de ensamblaje de tubería. Como en el caso de la barcaza de tambor, todas las operaciones de soldadura, inspección de las mismas y aplicación de recubrimientos puede llevarse a cabo en el mismo patio. En la Figura 8.4 se observe que en el corredor de lanzamiento se encuentran dos retenciones, una móvil y otra fija, que sostienen la tubería durante las maniobras de unión de los tramos sucesivos de tubería.

Las Figuras 8.5 y 8.6 ilustran las variantes de jalado superficial y subsuperficial. En el caso de jalado subsuperficial, la tubería está menos expuesta al embate de olas y corriente; la utilización de boyas del tipo pértiga limita la cantidad de movimiento superficial transferido a la tubería. En ambos casos, además del remolcador que jala la tubería, se necesita otro más pequeño en el extremo posterior de la línea, para aplicar una ligera tensión, suficiente para controlar el tramo de tubería en flotación.

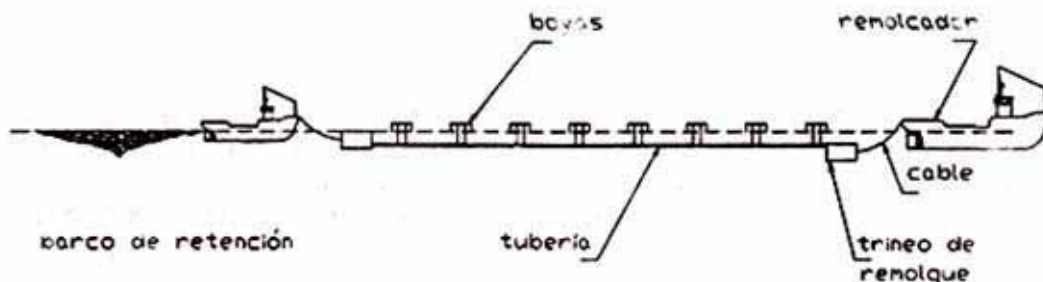


Figura 8.5 Remolque superficial

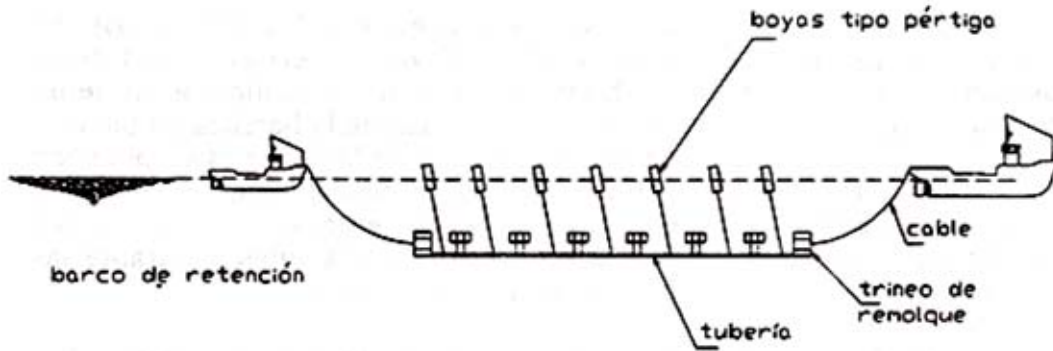


Figura 8.6 Remolque subsuperficial

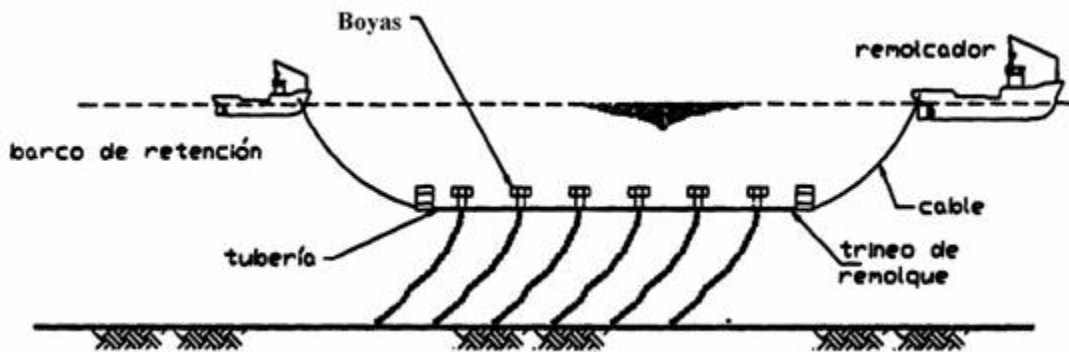


Figura 8.7 Remolque arriba del fondo

Entre las principales desventajas de estas dos variantes están la susceptibilidad de la tubería a las condiciones de la superficie marina, la exposición al tráfico marino y, principalmente, las consideraciones especiales que se requieren para bajar la tubería al fondo del mar.

El método del remolque arriba del fondo es una variante del método de remolque superficial. Se requieren algunos elementos adicionales como longitudes de cadena suspendidas de las boyas o tanques de flotación, como se muestra en la Figura 8.7. Durante el remolque, la sección de cadena que se levanta sobre el lecho marino compensa el empuje de flotación. A diferencia de las otras variantes del método de remolque, el remolque arriba del fondo expone, en menor medida, la tubería a las condiciones climáticas adversas y tráfico marino. Igualmente, los requisitos de bajado de la tubería al lecho marino pueden resultar simplificados.

8.4. ANÁLISIS DE TENDIDO.

Como se describió en la sección anterior, cada método de tendido de tubería submarina posee particularidades que dan lugar a variaciones en los procedimientos de análisis y diseño. En el presente manual sólo se presentarán los principios básicos para el análisis de tendido, correspondiente al método de la barcaza convencional. Para profundizar en el tema se puede recurrir a la referencia 11.

Cuando se emplea la barcaza convencional de tendido, la tubería adquiere un perfil de "S" conforme es bajada al fondo del mar, ver Figura 8.1. La zona superior de dicha "S" está soportada por el pontón de lanzamiento y se denomina zona de curvatura superior, que convencionalmente comprende también la sección soportada sobre la línea de ensamblaje de la barcaza desde el tensionador. Sin embargo, la parte inferior de la curva "S" no cuenta con un medio de soporte continuo, solamente se apoya en el último soporte del pontón y en el punto de toque con el lecho marino. A esta segunda sección se le conoce como zona de curvatura inferior (Figura 8.8).

Debido a las diferentes condiciones de apoyo que presentan estas dos zonas, los métodos de análisis son diferentes. No obstante, en ambos casos el control de la curvatura determina el nivel de los esfuerzos presente, el cual no debe exceder un límite permisible.

El esfuerzo permisible está fijado por los códigos que regulan la construcción de tuberías submarinas. Entre los más reconocidos se encuentran los indicados en las referencias 19 a 23 de este manual.

La curvatura del tubo en la zona superior, se controla usualmente mediante la curvatura del pontón y a través del posicionamiento adecuado de los rodillos que soportan la tubería sobre el mismo. El radio de curvatura de la tubería se selecciona de modo que los esfuerzos de flexión sobre la misma no excedan, generalmente, el 85 % por ciento del esfuerzo de fluencia mínimo especificado. Dicho esfuerzo permisible puede variar de un código a otro.

La deformación por flexión, en función del radio de curvatura está dada por:

$$\varepsilon = \frac{d}{2R} \quad (8.1)$$

donde:

- ε es la deformación unitaria
- d es el diámetro del tubo, en (m)
- R es el radio de curvatura, en (m)

El correspondiente esfuerzo de flexión es:

$$\sigma = \frac{Ed}{2R} \quad (8.2)$$

donde:

- σ es el esfuerzo de flexión (MPa)
- E es el módulo de elasticidad (MPa)

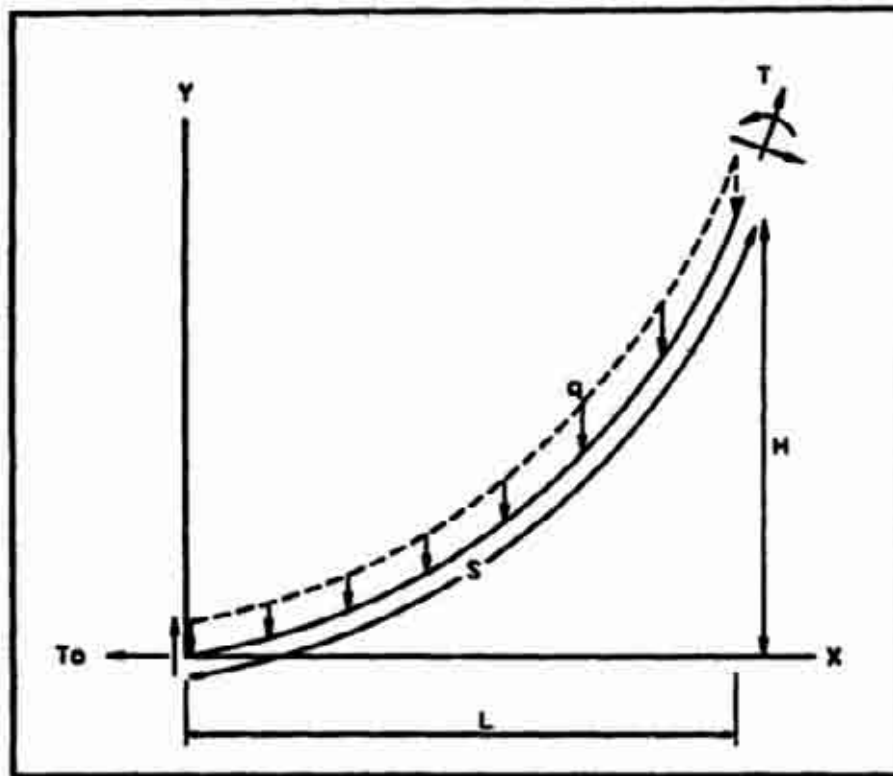
Por lo tanto, el radio mínimo de curvatura para la zona superior puede ser:

$$R = \frac{Ed}{2\sigma_0 F_d} \quad (8.3)$$

donde:

- σ_0 es el esfuerzo de flexión (MPa)
- F_d es el factor de diseño, usualmente 85%.

Este criterio de análisis no toma en cuenta el incremento de deformación local que ocurre sobre los rodillos en que se apoya directamente la tubería, ni los movimientos de la barcaza. Es por eso que la limitación del esfuerzo permisible, al 85% del esfuerzo de fluencia mínimo especificado, puede considerarse conservador. Si se realiza un análisis que considere los efectos anteriores, es posible extender el límite de esfuerzos permisibles o incluso utilizar un criterio de limitación de deformaciones en lugar del de esfuerzos.



- q = peso sumergido por unidad de longitud, kg/m.
- T = tensión, proveniente de los tensionadores, kg.
- T_0 = tensión efectiva en el extremo inferior del tubo, kg.
- S = longitud del arco, m.

Figura 8.8 Diagrama de cuerpo libre de la zona de curvatura inferior

En el caso de la zona de curvatura inferior, la tubería sólo cuenta con dos puntos de apoyo, como fue señalado anteriormente. Por lo tanto, uno de los principales medios para controlar la curvatura de la zona inferior es la tensión aplicada por los tensionadores. La longitud del pontón también es un factor determinante para la curvatura. De ahí que, entre los objetivos del análisis de la zona de curvatura inferior, estén la determinación de la tensión por aplicar y la longitud del pontón.

Existen varios métodos para analizar la zona de curvatura inferior. Todos ellos tienen ventajas y limitaciones, pero los menos sofisticados son aplicables a los casos de aguas someras, rinden resultados suficientemente aproximados, a bajo costo y de manera rápida. Los métodos más sofisticados son aplicables a aguas profundas o bien a todas las profundidades, sin embargo, requieren de grandes programas y equipos de cómputo.

La Tabla 8.1 presenta una lista de los métodos que existen para análisis de la zona de curvatura inferior y sus características de aplicabilidad.

El empleo práctico de dichas teorías, requiere del uso de programas de cómputo que pueden llegar a ser bastantes sofisticados, como es el caso del método del elemento finito. En otros casos, la no linealidad inherente a las formulaciones, obliga al uso de técnicas de análisis numérico que sólo se pueden utilizar adecuadamente con la ayuda de programas complejos. Para la aplicación de las técnicas citadas, se puede consultar la referencia 11.

8.5. ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA.

La estabilidad hidrodinámica de la tubería submarina debe revisarse para las condiciones que prevalecerán durante varias etapas de su vida útil: la construcción y la operación normal. Esta última etapa debe incluir la revisión de supervivencia bajo condiciones de tormenta, en la cual generalmente se aplica la altura de ola significativa para una tormenta con período de recurrencia de 100 años.

En la Tabla 8.2 se resumen las condiciones que determinan la estabilidad hidrodinámica en las diferentes fases de la vida útil de la tubería.

Tabla 8.1 Comparación de los Métodos de Análisis para Tendido de Tubería

MÉTODO	APLICABILIDAD	VALIDEZ
Teoría lineal de la viga.	Aguas Someras	Deformaciones
Teoría No-lineal de la viga	Todas las profundidades	General.
Catenaria natural	Aguas profundas	Fuera de los extremos rigidez pequeña
Catenaria rigidizada.	Aguas profundas	Rigidez pequeña
Elemento finito	Todas las profundidades	General

Tabla 8.2 Condiciones de la tubería

CONDICIÓN	LOCALIZACIÓN	FLUIDO	PERIODO DE RECURRENCIA DE LA TORMENTA.
Construcción	Sobre el lecho marino	vacía	Verano a un año.
Operación	Enterrada Sobre el lecho marino	llena	10 años
Supervivencia	Enterrada	llena	100 años
	Sobre el lecho marino		

Es importante revisar la estabilidad de la tubería bajo todas las condiciones a las que estará expuesta, ya que probablemente la condición más desfavorable, a diferencia de otras estructuras, se presentará durante la construcción o la condición de supervivencia.

Durante la etapa de construcción, la tubería estará vacía y sobre el lecho marino, expuesta a las corrientes marinas y las creadas por el oleaje. La estabilidad en el fondo dependerá de que el peso de la tubería sea mayor al empuje hidrostático a que estará sometida. Sin embargo, debido a la acción de las corrientes, será necesario tomar en consideración los efectos hidrodinámicos.

El proceso de revisión puede desarrollarse de la siguiente manera:

Inicialmente, es posible seleccionar una combinación de espesor de lastre y espesor de pared de la tubería de acero tales, que la tubería se sumerja y no flote. También se deberá tomar en cuenta el espesor y peso de los recubrimientos anticorrosivos. El peso sumergido de la tubería puede calcularse mediante la Ley de Arquímedes: El empuje que experimenta un cuerpo sumergido en el agua es igual al peso del volumen de agua desalojado.

En otras palabras, se busca que la densidad específica de la tubería sea mayor que uno.

El siguiente paso consiste en revisar la estabilidad de la tubería bajo las fuerzas que produce las corrientes marinas. En la Figura 8.9 se indican cuales son las fuerzas que provoca el peso de las corrientes marinas alrededor del tubo en operación.

La estabilidad de la tubería se garantiza verificando el equilibrio de fuerzas:

$$F_D + F_I - F_R - W \sin \theta = 0 \quad \text{Fuerzas horizontales} \quad (8.4)$$

$$N + F_L - W \cos \theta = 0 \quad \text{Fuerzas verticales} \quad (8.5)$$

Las definiciones se encuentran en la Figura 8.9.

Debido a que el tubo descansa sobre el lecho marino, se produce una fuerza de resistencia lateral que depende de la fuerza normal y del coeficiente de fricción entre el tubo y la superficie de lecho marino.

$$F_r = \mu N \quad (8.6)$$

donde:

μ es el coeficiente de fricción lateral entre el tubo y el lecho marino.

Combinando las ecuaciones (8.4) y (8.5), sustituyendo el valor de N de (8.6), y despejando W, o sea la masa sumergida del tubo, obtenemos:

$$W = \frac{F_D + F_I + \mu F_L}{\mu \cos\theta + \sin\theta} \quad (8.7)$$

La ecuación (8.7) representa la masa mínima sumergida del tubo vacío, que debe proporcionarse al tubo para que sea estable durante la fase de construcción.

El siguiente paso consiste en determinar los valores de F_D , F_I y F_U para condiciones de oleaje y corriente esperados para la etapa de construcción.

La deducción detallada de las fórmulas, para determinar las fuerzas hidrodinámicas sobre la tubería, está fuera del alcance del presente manual. Para mayor detalle, véanse las referencias 1 y 2.

La expresión que permita calcular las fuerzas de arrastre e inercia es conocida como ecuación de Morrison, la cual indica el valor de las fuerzas horizontales inducidas por un flujo uniforme alrededor de una sección circular. La ecuación de Morrison es:

$$F_H = F_D + F_I \quad (8.8)$$

$$F_H = \frac{1}{2} \rho C_D d_e |U_e| U_e + \rho C_M \frac{\pi d_e^2}{4} A_e \quad (8.9)$$

donde:

ρ es la densidad del fluido, para el agua de mar = 1025 Kg/m³.

F_D es la fuerza de arrastre (N)

F_I es la fuerza de inercia (N)

F_H es la fuerza horizontal total (N)

$|U_e|$ es el valor absoluto U_e , para obtener el signo propio de F_D

d_e es el diámetro exterior total del tubo, m. (deben considerarse los recubrimientos externos).

U_e es la velocidad horizontal de las partículas de agua sobre la altura del tubo m/s.

A_e es la aceleración horizontal de las partículas de agua sobre la altura del tubo m/s.

C_D es el coeficiente hidrodinámico de arrastre.

C_M es el coeficiente hidrodinámico de inercia o masa.

Para conocer los valores de la velocidad y la aceleración (U_e y A_e), es necesario emplear las formulaciones de alguna de las teorías de oleaje existentes. La Figura 8.11 señala las diferentes regiones de aplicabilidad para varias teorías de oleaje. La Tabla (8.3 a, b, c) es un resumen de las características del oleaje para la teoría lineal, o también conocida como teoría de Airy. Para mayores detalles, consúltese la referencia 15.

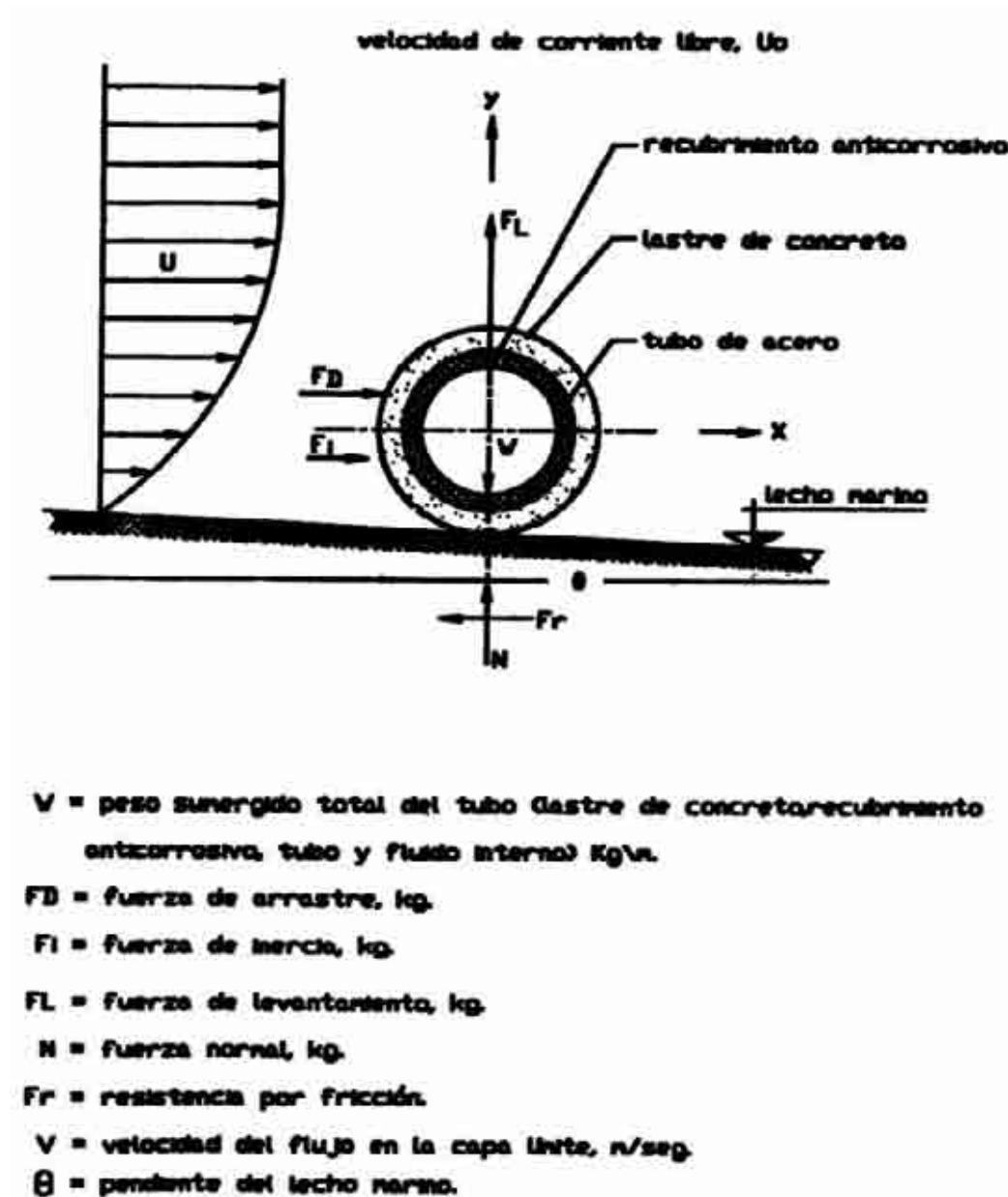


Figura 8.9 Fuerzas hidrodinámicas sobre tubo

La velocidad y aceleración de las partículas de agua, necesarias para aplicar la ecuación 8.10, deben considerar el efecto combinado de las olas y la corriente marina.

Por otra parte, debido al fenómeno de capa límite, la velocidad y la aceleración se evalúan generalmente a un metro por arriba del lecho marino. Se supone la existencia de una capa límite que va desde el lecho marino hasta una altura de un metro por arriba de éste. La velocidad de las partículas se hace cero sobre el lecho marino. Para determinar la velocidad dentro de la capa límite se emplea la regla de potencia a la 1/7 de acuerdo con la referencia 11.

Es decir:

$$\frac{U}{U_0} = \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{1/7} \quad (8.10)$$

donde:

U es la velocidad horizontal de las partículas a una altura y sobre el lecho marino y dentro de la capa límite, m/s.

U_0 es la velocidad de las partículas, medida o calculada a una altura de un metro sobre el lecho marino, m/s.

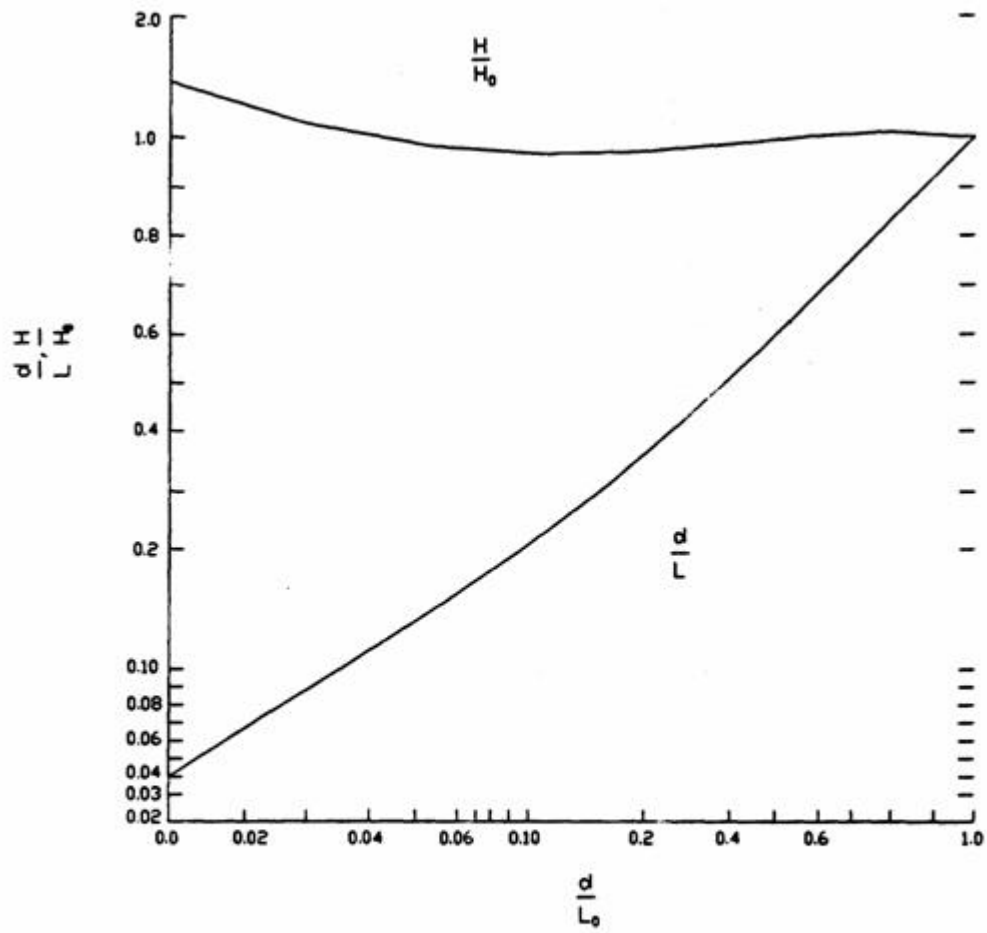
La velocidad U_0 se calcula, como se dijo anteriormente, a una altura de un metro sobre el lecho marino.

El promedio de la velocidad efectiva que se empieza en la ecuación 8.10, se puede obtener de la siguiente expresión:

$$U_e^2 = \int_0^d \cdot U^2(Y)dy \quad (8.11)$$

Ahora, sustituyendo 8.11 en 8.12, tenemos:

$$U_e^2 = 0.778U_0^2 (d_e/Y_0)^{0.286} \quad (8.12)$$



d = profundidad del agua, m

L_0 = longitud de ola en aguas profundas, m

L = longitud de ola, m

H_0 = altura de ola en aguas profundas, m

Figura 8.10 Variación de la longitud y altura de ola con la profundidad

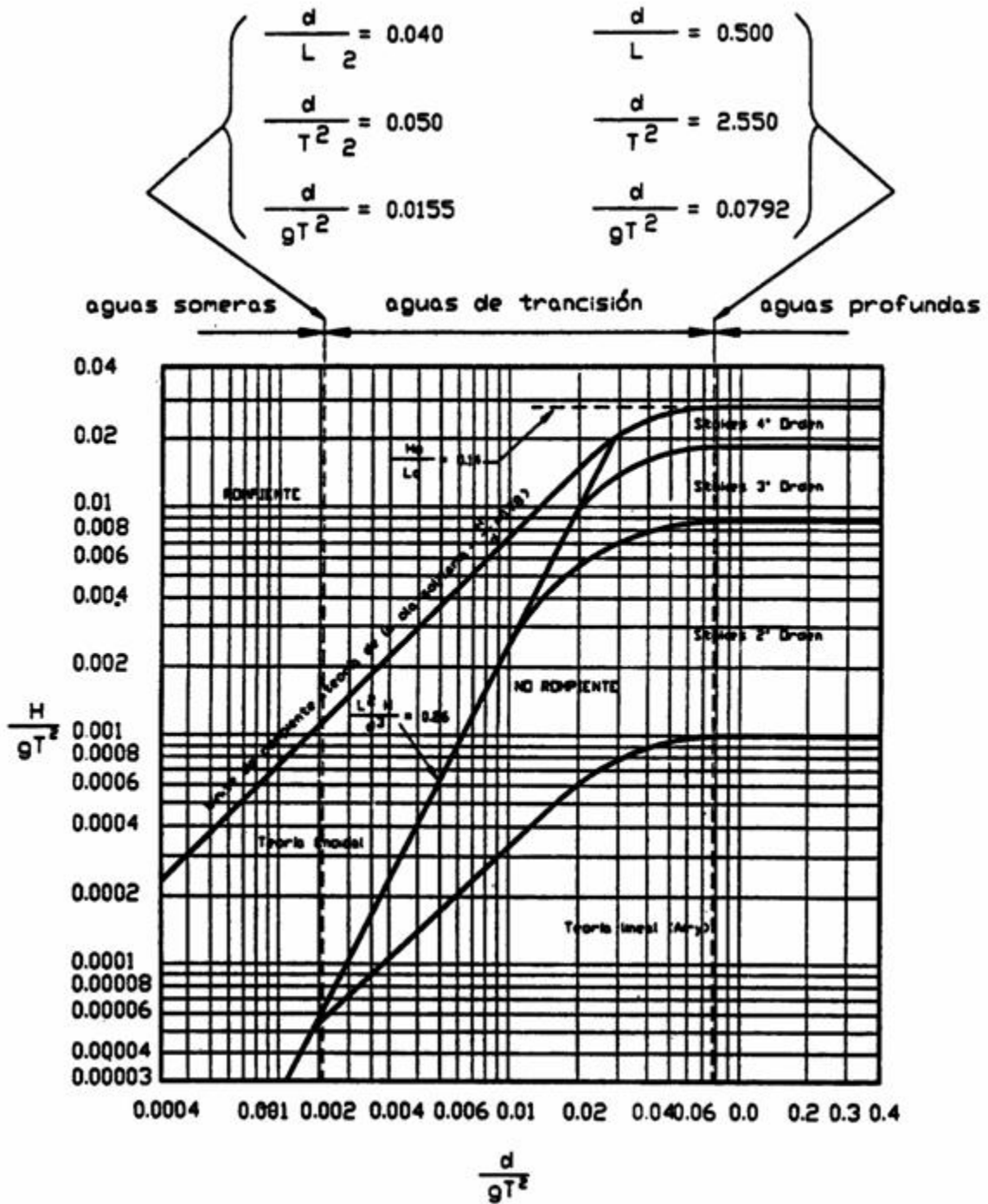


Figura 8.11 Regiones de validez de las teorías de oleaje. (tomado de "shore protection manual")

Adicionalmente a las fuerzas horizontales ya descritas, otro de los efectos hidrodinámicos sobre la tubería o el de la fuerza de levantamiento, está dada por la siguiente expresión:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho a m C_L D U_e^2 \quad (8.13)$$

donde:

C_L es el coeficiente hidrodinámico de levantamiento.

En las ecuaciones 8.10 a 8.14, U_e representa la velocidad efectiva; es decir, las velocidades horizontales determinadas con las fórmulas de la Tablas 8.3 no toman en cuenta el efecto que el fondo marino tiene sobre la altura de ola. Entonces, es necesario ajustar los valores de la altura de ola, H_o , y de la longitud de ola, L_o , para aguas profundas, de acuerdo con la Figura 8.10. La altura de ola, H , y la longitud de ola, L , ajustadas, son aquellas con las que se deberá trabajar en las fórmulas de la Tablas 8.3.

Los coeficientes hidrodinámicos C_D , C_M y C_L se obtienen de mediciones en laboratorio. Algunos códigos o normas que regulan el diseño y construcción de tubería submarina proporcionan valores recomendados para los coeficientes hidrodinámicos. Véase por ejemplo: Apéndice A de "Rules for Submarine Pipeline Systems", 1981, por Det Norske Veritas. En el presente manual, se emplearán los valores sugeridos por la Tabla 8.4.

Para poder seleccionar los coeficientes C_D , C_M y C_L de la Tabla 8.4, es necesario calcular primero el número de Reynolds, de la siguiente manera:

$$R_e = \frac{U_T D}{\nu} \quad (8.14)$$

donde:

- R_e es el número de Reynolds, adimensional.
- U_e es la velocidad horizontal de las partículas de agua, m/s
- D es el diámetro exterior del tubo, incluyendo recubrimiento, m
- ν es la Viscosidad cinemática del agua de mar, $0.0929 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

8.6. PROTECCIÓN CATÓDICA.

En la introducción de la sección 8 de este manual, se presentó un panorama general sobre el diseño de tubería submarina. Asimismo, se mencionó que la protección contra la corrosión es uno de los aspectos significativos para garantizar el correcto funcionamiento de la tubería durante su vida útil.

En esta sección, se presentarán las bases para el diseño de la protección catódica de la tubería.

Antes de describir el proceso de diseño de la protección catódica es conveniente revisar los principios básicos del fenómeno de la corrosión que se describen en el capítulo 11.

La corrosión es un fenómeno electroquímico, en el que las reacciones químicas generan electricidad y viceversa.

El principio de la protección catódica consiste en lograr que la corriente suministrada desde el electrólito (agua de mar) hasta la superficie de metal por proteger. Para esto se emplea un ánodo, el cual va a proporcionar la corriente necesaria para proteger el cátodo (tubería submarina).

Existen dos variantes básicas: la primera se refiere al sistema de ánodos de sacrificio, en el cual se emplean ánodos de un metal diferente al que se va a proteger, y que tiene, en la serie galvánica, un menor potencial que el del metal por proteger. Se llama sistema de ánodos de sacrificio porque la corriente de protección se genera por el fenómeno de corrosión galvánica, en el cual el ánodo se corroe para producir la corriente. Por lo tanto, la vida operacional de este sistema estaría limitada a la vida útil del ánodo.

La Figura 8.12 presenta un diagrama del sistema de protección catódica mediante ánodos de sacrificio.

La segunda variante hace referencia al sistema de protección mediante corriente impresa, el cual prácticamente no se emplea en tubería submarina.

Las tuberías submarinas se protegen contra la corrosión mediante el empleo de dos sistemas: recubrimientos anticorrosivos y protección catódica. Los recubrimientos anticorrosivos tienen la función de aislar del medio corrosivo (en este caso el agua de mar) la superficie del tubo de acero. Siendo la corrosión un fenómeno electroquímico, como se describió anteriormente, el aislar uno de los dos electrodos suite el peso de la corriente y, por lo tanto, inhibe el proceso de corrosión.

Por esta razón, el sistema de protección catódica se diseña para proteger aquellas zonas donde el recubrimiento anticorrosivo fue dañado durante la construcción o a lo largo de su vida útil. Generalmente, el diseño de la protección catódica se base, en la consideración de una superficie desnuda del orden del 20 % al final de la vida útil de la tubería, y del 1% al inicio de la misma. Esto es válido cuando se emplean recubrimientos gruesos, como es el caso del esmalte de alquitrán de hulla reforzado con fibra de vidrio, que es el recubrimiento mayormente empleado en tuberías submarinas.

El diseño de la protección catódica por medio de ánodos de sacrificio depende básicamente de dos parámetros: la corriente total requerida por el sistema y la corriente de salida que cada ánodo puede proporcionar.

Sin embargo, estos dos factores pueden sufrir variaciones debido a las condiciones del medio marino, tales como temperatura, oxígeno disuelto, composición química, resistividad, actividad biológica, etc. A continuación se presenta un procedimiento de diseño general, así como parámetros de diseño aceptados comúnmente; sin embargo, un diseño más detallado debe considerar la medición de los datos antes señalados, en el sitio particular de instalación de la tubería.

La corriente total que se requiere para proteger adecuadamente la tubería, está determinada por los requisitos de densidad de corriente y la superficie expuesta. Con respecto a esta última, como ya se señaló anteriormente, lo que se tome en cuenta son los daños que sufre el recubrimiento, lo cual se considera como un porcentaje del área total de la tubería, mismo que se señala en la Tabla 8.5.

Los requisitos de densidad de corriente dependen de las condiciones ambientales, y el diseño puede basarse en experiencia con estructuras y en ambientes semejantes. Una guía para la selección de los requisitos mínimos de densidad de corriente es la proporcionada por las normas de Det Norske Veritas: " Rules For Submarine Pipeline Systems ", 1981, en su apéndice D. La Tabla 8.6 proporciona los valores necesarios para determinar la densidad de la corriente requerida.

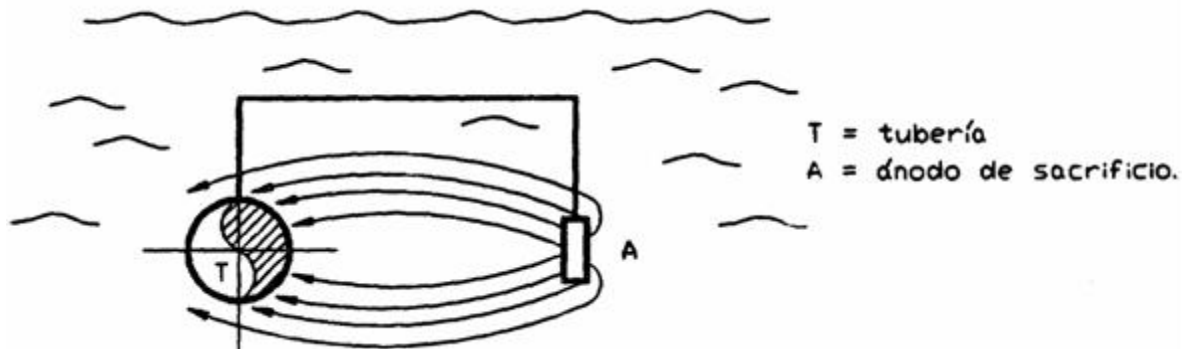


Figura 8.12 Protección catódica por medio de ánodos de sacrificio

La densidad total de corriente se obtiene multiplicando el área total de la tubería por el porcentaje seleccionado de área dañada y por el requisito mínimo de densidad de corriente.

El siguiente paso consiste en determinar la corriente de salida que el tipo de ánodo seleccionado es capaz de drenar (corriente de salida). La corriente de salida de un ánodo depende de varios factores, principalmente: composición química, resistencia anódica, resistividad del medio, y geometría.

La capacidad de corriente drenada o corriente de salida, (I_a) está dada por la ley de Ohm:

$$I_a = \frac{\Delta V}{R_a} \quad (8.15)$$

donde:

ΔV es el potencial de salida.

R_a es la resistencia del circuito o resistencia anódica

El potencial de salida es uno de los parámetros electroquímicos que se muestran en la Tabla 8.6, que es solamente una guía.

La resistencia anódica (R_a) depende de la resistividad del medio y de la geometría del ánodo. La Figura 8.13 indica como calcular la resistencia anódica para un ánodo tipo brazaletes, que es uno de los más comúnmente empleados en tuberías submarinas.

La Figura 8.14 muestra los detalles constructivos de un ánodo tipo brazaletes. Algunos de los más importantes que debe considerar el diseño del ánodo son:

- Que el soporte del ánodo sea capaz de sostenerlo, considerando el desgaste que tendrá.
- La permanencia de la conexión eléctrica.
- El diámetro exterior del ánodo debe ser igual al de la tubería recubierta.

Finalmente, el diseño termina con una revisión de la vida útil de los ánodos de sacrificio.

El código de Det Norske Veritas, " Rules for Submarine Pipeline Systems ", 1981, define la vida útil del ánodo de la siguiente manera:

$$L = \frac{W \cdot U}{E \cdot I} \quad (8.16)$$

donde:

L es la vida efectiva de los ánodos, años.

W es la masa neta de los ánodos (Kg)

u es el factor de utilización, determinado por la cantidad de material del ánodo consumido cuando el material remanente del ánodo ya no puede entregar la corriente requerida. = 0.75 - 0.80 para nodos tipo brazaletes.

E es la velocidad de consumo del ánodo, Kg/A-año (de la Tabla 8.6).

I es el requerimiento promedio de corriente por ánodo durante la vida útil, v. (de la Tabla 8.6)



Para tuberías superficiales ζ se puede tomar como 20 ohm-cm en aguas tropicales (t = 25°C) y 33 ohm-cm en aguas mas frías (t = 5-10°C).

Para tuberías enterradas ζ para el primer metro de la capa del lecho marino puede tomarse como 100 ohm-cm, si no se han tomado mediciones.

Figura 8.13 Resistencia anódica de un ánodo tipo brazalete



Figura 8.14 Detalles constructivos de ánodo

Tabla 8.3a Resumen de las características de ola, teoría de Airy (lineal) (de "Shore Protection Manual")

Profundidad Relativa	Aguas Someras $\frac{d}{L} < \frac{1}{25}$
1. Perfil de la ola	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \theta$
2. Celeridad de la ola	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gd}$
3. Longitud de la ola	$L = T\sqrt{gd} = CT$
4. Velocidad de grupo	$C_g = C\sqrt{gd}$
5. Velocidad de la particular de agua a) Horizontal b) Vertical	$U = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos \pi$ $W = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{d} \right) \text{sen} \theta$
6. Aceleración de la partícula de agua a) Horizontal b) Vertical	$A_x = \frac{H\pi}{T} \sqrt{\frac{g}{d}} \text{sen} \theta$ $A_z = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \left(1 + \frac{z}{d} \right) \cos \theta$

$$\theta = \frac{2\pi t}{T}, \quad T = \text{período de la ola, } t = \text{tiempo}$$

Tabla 8.3b Resumen de las características de ola, teoría de Airy (lineal) (de "Shore Protection Manual")

Profundidad Relativa	Aguas de Transición $\frac{1}{25} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$
1. Perfil de la ola	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} \cos \theta$
2. Celeridad de la ola	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$
3. Longitud de la ola	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)$
4. Velocidad de grupo	$C_g = C = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d / L}{\sinh(4\pi d / L)} \right] C$
5. Velocidad de la partícula de agua a) Horizontal b) Vertical	$U = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$ $W = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \sin \theta$
6. Aceleración de la partícula de agua a) Horizontal b) Vertical	$A_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$ $A_z = -\frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \theta$

$$\theta = \frac{2\pi t}{T}, \quad T = \text{período de la ola, } t = \text{tiempo}$$

Tabla 8.3c Resumen de las características de ola, teoría de Airy (lineal) (de "Shore Protection Manual")

Profundidad Relativa	Aguas Profundas $\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
1. Perfil de ola	$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right] = \frac{H}{2} 2 \cos \theta$
2. Celeridad de la ola	$C = C_o = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
3. Longitud de la ola	$L = L_o = \frac{gT^2}{2\pi} = C_o T$
4. Velocidad de grupo	$C_g = \frac{1}{2} C = \frac{gT}{4\pi}$
5. Velocidad de la partícula de agua a) Horizontal b) Vertical	$U = \frac{\pi H}{T} \exp \left(\frac{2\pi z}{L} \right) \cos \theta$ $W = \frac{\pi H}{T} \exp \left(\frac{2\pi z}{L} \right) \text{sen} \theta$
6. Aceleración de la partícula de agua a) Horizontal b) Vertical	$A_x = 2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \exp \left(\frac{2\pi z}{L} \right) \text{sen} \theta$ $A_z = -2H \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \exp \left(\frac{2\pi z}{L} \right) \cos \theta$

$$\theta = \frac{2\pi t}{T} = \text{periodo de la ola, } t = \text{tiempo}$$

Tabla 8.4 Guía para el criterio de porcentaje de recubrimiento dañado, para algunos recubrimientos (vida esperada, 25 años)

	INICIAL	MEDIO	FINAL
Recubrimientos de película gruesa	1	10	20
Sistemas de vinil	2	20	50
Alquitrán de hulla a óxido	2	20	50
Epóxico de altos Sólidos	2	20	50

(Tomando de "Rules for Submarine Pipeline Systems", 1981, de Det Norske Veritas)

Tabla 8.5 Guía sobre las densidades de corriente mínimas para diseño, (mA/m²)

	VALOR INICIAL	VALOR MEDIO	VALOR FINAL
Golfo de México U.S.A.	100	80	70
Tuberías (se especifica enterrado)	50	40	30
Lecho Marino (Temperatura ambiente)	2 5	20	15
Ductos Ascendentes en Conductos con Agua de Mar en Circulación	180	140	120
Ductos Ascendentes en Conductos con Agua de Mar Estancada	120	90	80
			-

(Tomado de "Rules for Submarine Pipeline Systems" 1981, Det Norske Veritas)

Nota:

La densidad de corriente inicial se uso para determinar la capacidad de corriente drenada necesaria para los ánodos nuevos.

La densidad de corriente final se utiliza para determinar la capacidad de corriente drenada de los ánodos, cuando se han consumido hasta el factor de utilización.

La densidad de corriente media se uso para determinar el peso de los ánodos.

Tabla 8.6 Parámetros Electroquímicos para Algunas Aleaciones de Ánodos de Sacrificio

ALEACIÓN	AMBIENTE	POTENCIAL MOTRIZ (mV)	CAPACIDAD DE CORRIENTE (Ah-kg)	VELOCIDAD DE CONSUMO Kg/A-AÑO
Al-Zn-Hg	Agua de Mar (5-30°C)	200-500	2600-2800	3.1-3.4
Al-Zn-In	Agua de Mar (5-30°C)	2 50-300	2 500-2700	3.2-3.5
Al-Zn-In	Lodo Salino (5-30°C)	150-250	1300-2300	3.85-6.7
Al-Zip-In	Lodo Salino (30-90°C)	100-200	400-1300	6.7-22.0
Zn	Agua de Mar	200-250	760-780	11.2-11.5
Zn	Lodo Salino (0-60°)	150-200	760-780	1 1.2-11.5

(Tomado de " Rules for Submarine Pipeline Systems", 1981, de Det Norske Veritas).

9. PRINCIPIOS DE LA CORROSIÓN

9.1. TEORIA GENERAL DE LA CORROSIÓN

La corrosión se puede definir como la degradación o deterioro de un metal, provocado por su reacción con el medio en que se encuentra inmerso, para retornar a su condición de equilibrio original.

La corrosión del acero es el tributo que el hombre tiene que pagar a la naturaleza, por la industrialización del mineral de hierro, ya que la naturaleza tardó millones de años en reducir, mediante altas temperaturas y presiones, a los átomos de hierro y carbón a la condición estable de mineral de hierro; así, mientras el hombre rompa esta condición de equilibrio, con la adición de energía calorífica durante el proceso de elaboración del acero, esta temperatura permanece almacenada en las piezas de acero, tubos, placas, perfiles estructurales, etc., en forma de energía potencial, la cual en combinación con el medio ambiente tiende a revertir al acero a su condición original de equilibrio, es decir, a óxidos de Hierro, ver Figura 9.1. La herrumbre que se observe en las estructuras metálicas dañadas por la corrosión no es más que óxidos de hierro hidratados, de similar composición que el mineral de hierro.

Los materiales como el oro, platino y grafito, requieren poca energía calorífica para su elaboración, por lo que su energía almacenada es baja, permitiendo así que tengan alta resistencia a la corrosión, ya que su tendencia de retornar a su condición de equilibrio original es baja. Por su parte, el magnesio, zinc y aluminio, necesitan de mucho mas energía para su elaboración, presentando una resistencia a la corrosión baja.

La corrosión se considera como un proceso electroquímico, ya que envuelve al mismo tiempo una reacción química y un flujo de corriente en las piezas metálicas. En el presente capítulo solo se tratará la corrosión electroquímica de los metales.

Para que ocurra la corrosión deben existir necesariamente los siguientes elementos: un ánodo y un cátodo, unidos eléctricamente a inmersos en un electrólito. Se considera un electrólito a cualquier sustancia que contiene iones, y que es capaz de transmitir la corriente eléctrica.

Por ejemplo el agua pura, la cual contiene una cantidad igual de iones de hidrógeno cargados positivamente, así como de iones hidróxilos cargados negativamente.

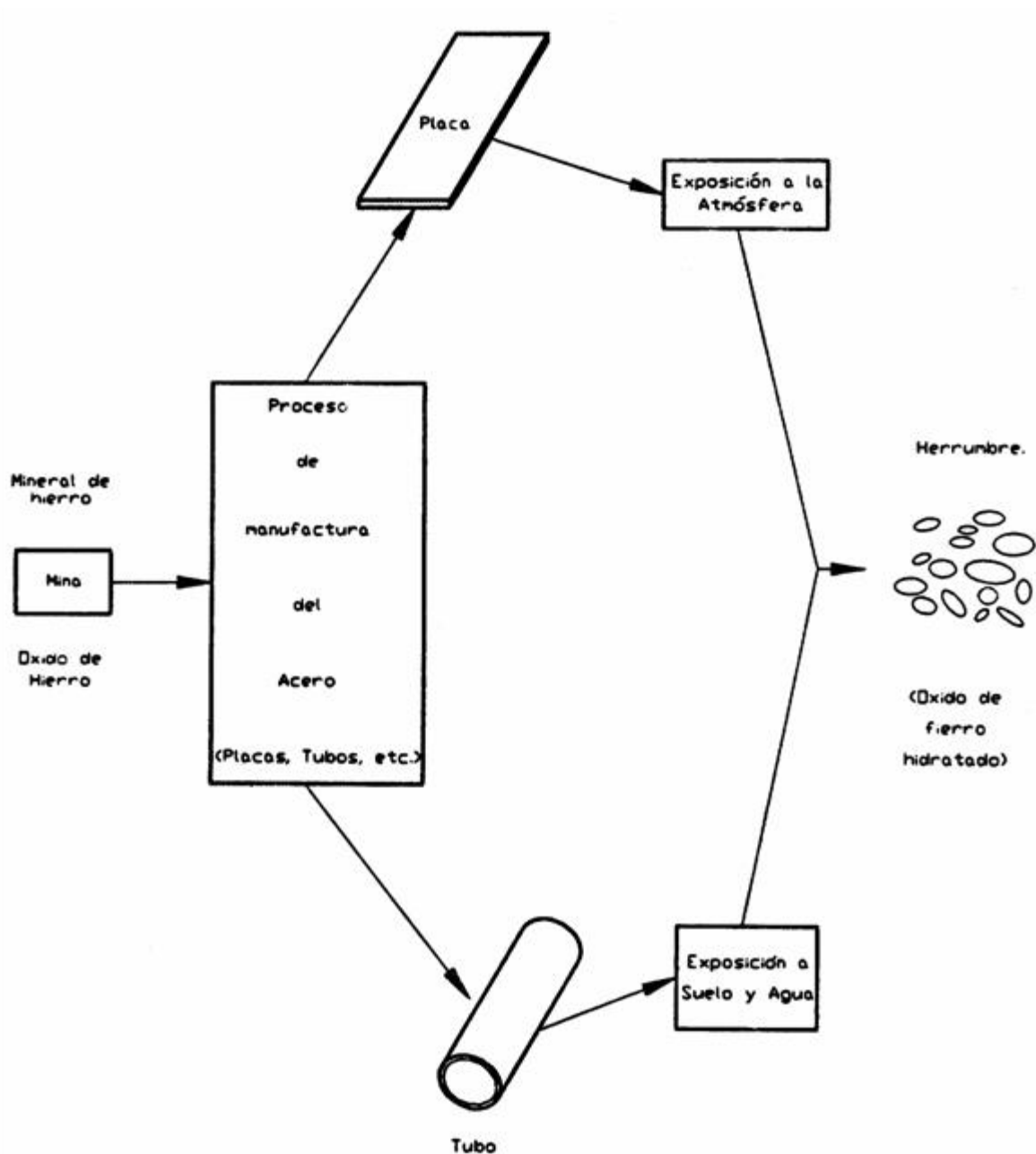


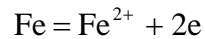
Figura 9.1 Diagrama de flujo del fenómeno de corrosión

Con objeto de visualizar el fenómeno de la corrosión, consideremos una placa de acero inmersa en agua neutra, ver Figura 9.2, si pudiéramos ver bajo un microscopio la placa, se distinguirían dos áreas bien definidas, una anódica y otra catódica, en toda la superficie de la placa, intercambiándose en forma continua.

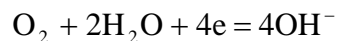
La razón de estas zonas anódicas y catódicas se debe a inclusiones en la microestructura del material, orientación del grano, variaciones en el ambiente, esfuerzos localizados, etc.

Es importante notar, que en caso de que la zona anódica permanezca en un solo punto, la corrosión se puede concentrar atravesando completamente el espesor de pared de las tuberías, provocando con esto posibles fugas de agua y gastos por concepto de reparación.

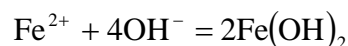
Si pudiéramos ver sólo un ánodo y un cátodo en una formación gigante, observaríamos que los átomos de hierro se ionizan liberando dos electrones y convirtiéndose en un átomo cargado positivamente, es decir, en un ion positivo de hierro, de acuerdo con la siguiente ecuación:



Al mismo tiempo, los electrones liberados viajan a través de la misma placa de la zona anódica hacia la zona catódica, donde se encuentran y se combinan con una molécula de oxígeno y dos de agua, reduciendo las moléculas de oxígeno a cuatro iones hidróxilo, de acuerdo con la siguiente ecuación



Estos iones hidróxilos se combinan con los iones de hierro, (Fe^{2+}), de acuerdo con la siguiente ecuación



Precipitándose de la solución como óxido férrico, el cual es un compuesto inestable y se oxida nuevamente convirtiéndose en una sal ferrítica

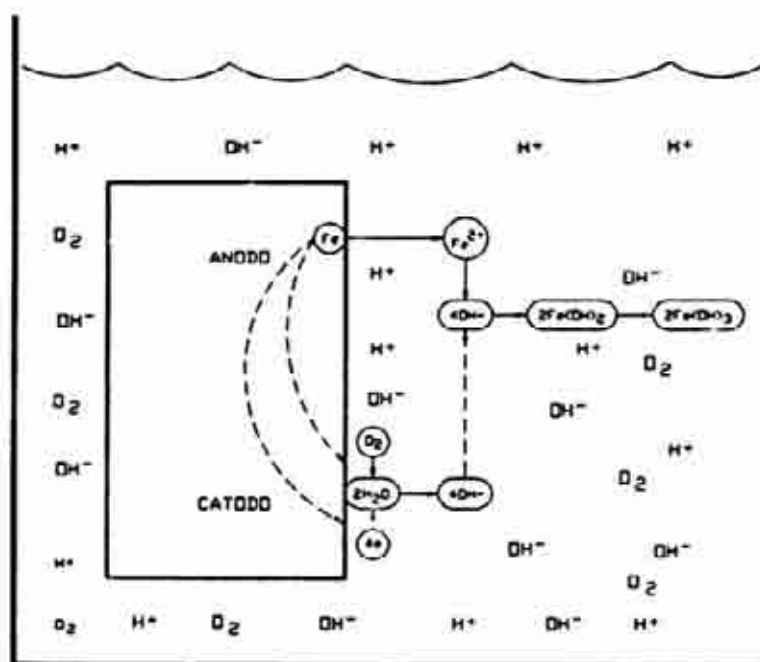


Figura 9.2 Corrosión del acero en aguas neutras

Nótese que el producto final es lo que se conoce comúnmente como herrumbre.

Como puede observarse la velocidad de corrosión del acero en aguas neutras, está regida por la reducción del oxígeno presente en el electrólito.

Las celdas electroquímicas pueden ser clasificadas como

- Celdas galvánicas
- Celdas de concentración
- Celdas electrolíticas

9.2. CORROSIÓN EXTERNA DE TUBERÍAS

Las tuberías de acero al carbón empleadas en la conducción de agua están expuestas a la acción corrosiva del suelo, y en ellas se pueden presentar los tipos de corrosión externa que a continuación se mencionan.

9.2.1. Corrosión galvánica

La corrosión galvánica ocurre cuando dos materiales de diferente composición química son conectados e inmersos en un electrólito, un ejemplo claro de este tipo de celda es la batería común y corriente, ver Figura 9.3, donde se observe que la batería está compuesta de un recipiente de zinc, el cual contiene una solución de cloruro de amonio, que es el electrólito y una barra de grafito.

Los átomos de zinc son ionizados por el electrólito y abandonan la placa de zinc en forma de iones, dejando atrás dos electrones; estos iones viajan a través del electrólito combinándose con la solución de cloruro de amonio y perdiendo su carga eléctrica, que los convierte en iones de hidrógeno, estos últimos viajan hasta llegar a la superficie de la barra de grafito, donde se combinan con los electrones que habían dejado atrás, los cuales viajaron a través de la conexión eléctrica, para formar átomos de hidrógeno, que posteriormente se combinan entre sí formando burbujas de gas.

Puede observarse como el recipiente de zinc sufre corrosión, funcionando como zona anódica, mientras que la barra de grafito permanece inalterada, la cual se conoce como zona catódica, por lo tanto, se concluye de acuerdo con la Figura 9.3, que para que exista corrosión se deben cumplir las siguientes condiciones

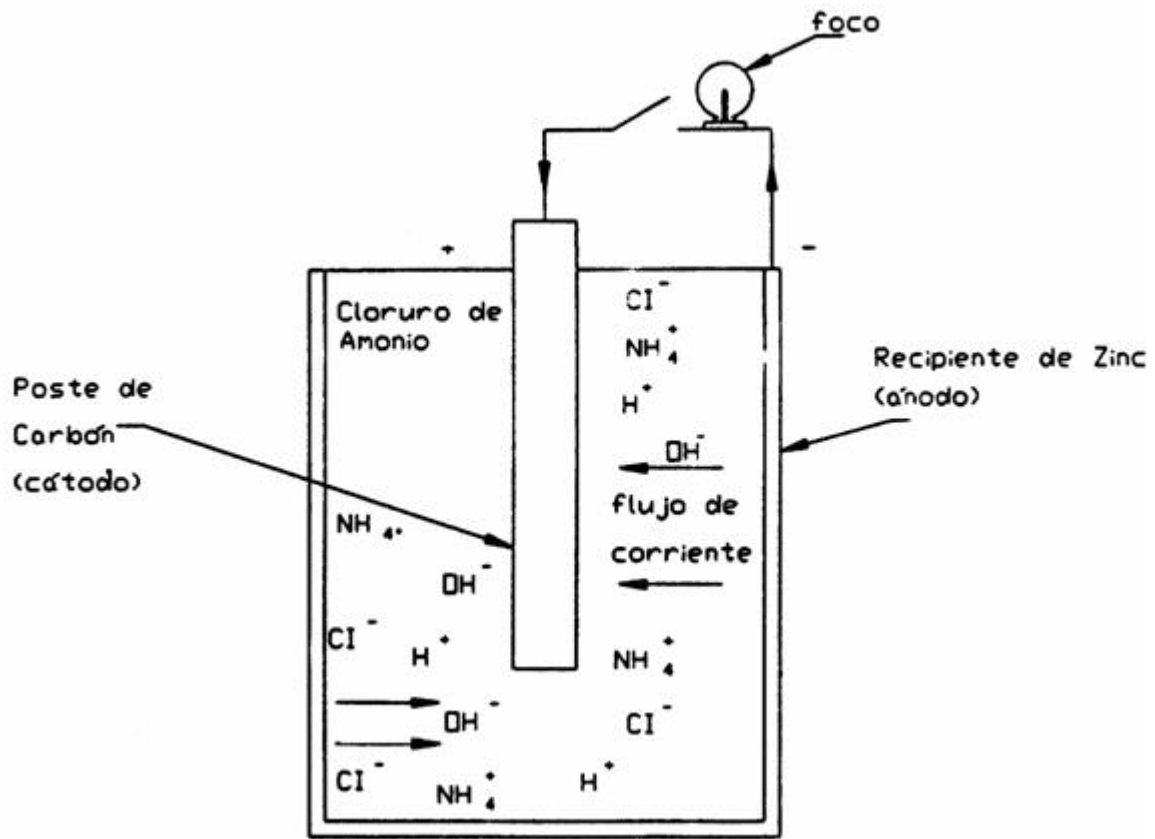


Figura 9.3 Batería

- Debe existir un ánodo, es decir, donde ocurre la corrosión, que en este caso es el recipiente de zinc.
- Debe existir un cátodo, es decir, donde no ocurre corrosión, en este caso la barra de grafito.
- Una sustancia conductora de la corriente (electrolito).
- Conexión eléctrica.

Si cualquiera de las condiciones anteriores no se cumple, entonces la corrosión no ocurre, esto tiene una aplicación práctica importante, ya que la conexión eléctrica entre dos metales diferentes se puede romper o evitar mediante el empleo de juntas aislantes, pero en el caso de que no se pueda romper esta continuidad eléctrica, se debe aplicar un recubrimiento anticorrosivo a las zonas catódica y anódica, y por lo tanto se disminuye en forma considerable la velocidad de corrosión.

Cabe aclarar, que en caso de que el recubrimiento anticorrosivo se aplique sobre la zona anódica, este último puede sufrir daños, dejando pequeñas zonas desnudas a incrementando en forma acelerada la corrosión, debido a la relación de área anódica pequeña y área catódica grande.

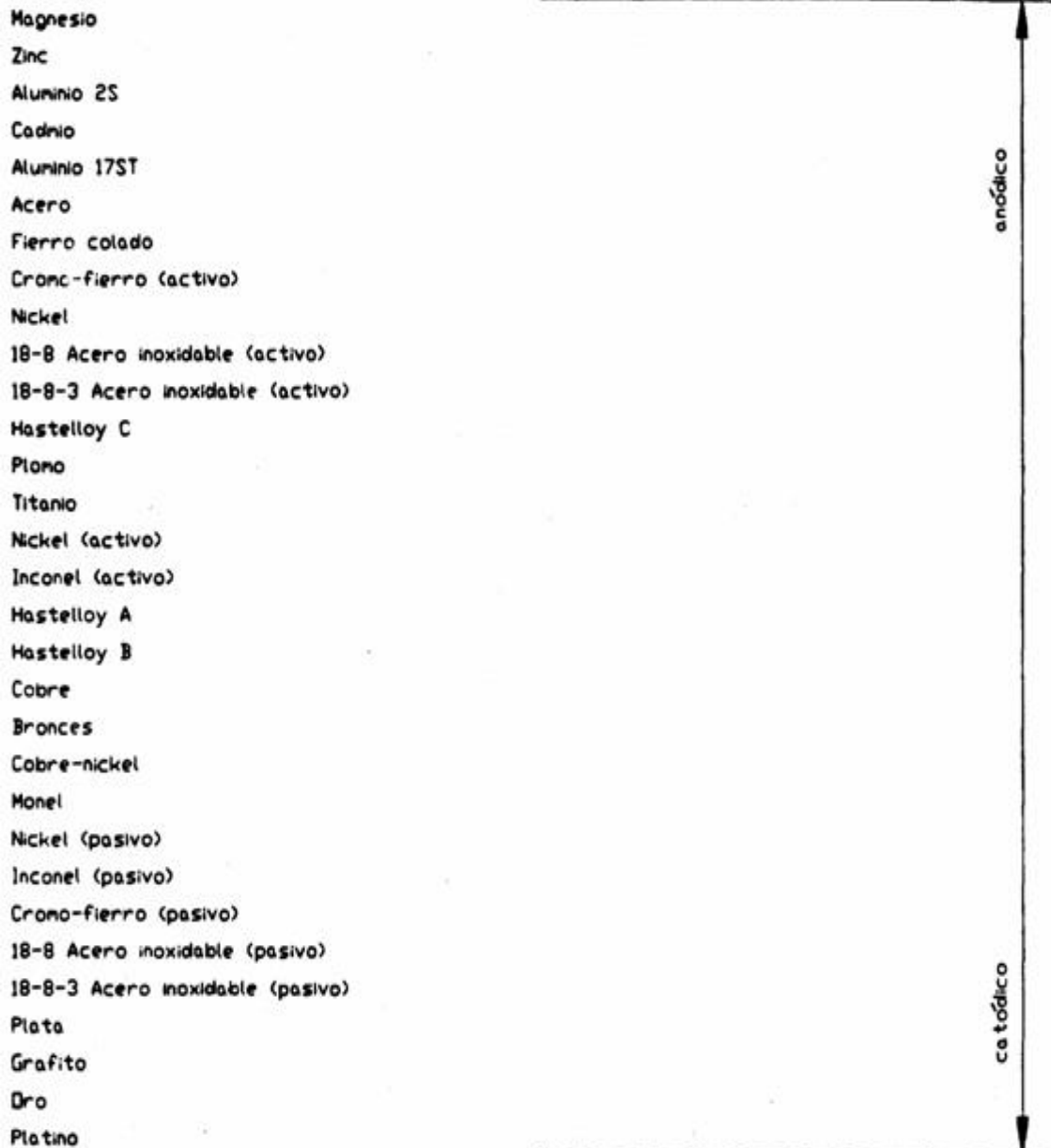
9.2.1.1. Serie galvánica

En la Figura 9.4, se muestra la Tabla galvánica para metales inmersos en un electrólito neutro, donde se indica la posición relativa de cada metal o aleación con respecto a los metales que muestran buena resistencia a la corrosión (oro, platino, y grafito), así como los metales que tienen poca resistencia a la corrosión (magnesio, zinc y aluminio); a medida que dos metales están más separados en la tabla galvánica es mayor la probabilidad de corrosión galvánica.

9.2.1.2. Celdas de concentración

Este tipo de corrosión ocurre cuando se tiene un electrólito no homogéneo o diferencias en la composición de la estructura, enseguida se muestran los tipos de celdas de corrosión más comunes que se presentan en tuberías enterradas.

Serie galvánica de metales y aleaciones.*



* Un metal pasivo forma una película o capa que protege al metal contra la corrosión.

Composición de las aleaciones: Aluminio 17ST - 95% Al, 4% Cu, 0.5% Mn, 0.5% Mg; 188 Acero inoxidable 18% Cr, 8% Ni; 1883 Acero inoxidable 18% Cr, 8% Ni, 3% Mo; Hastelloy C - 59% Ni, 17% Mo, 14% Cr, 5% Fe, 5% W; Inconel - 59-80% Ni, 10-20% Cr, 0-23% Fe; Hastelloy A - 60% Ni, 20% Mo, 20% Fe; Monel - 63-67% Ni, 29-30% Cu, 1-2% Fe, 0.4-1.1% Mn.

Figura 9.4 Serie galvánica de metales y aleaciones

9.2.1.3.Diferencia de concentración de oxígeno

Para el caso de tubería enterrada se tiene que la parte superior de la tubería está inmersa en suelo con mayor contenido de oxígeno, mientras que el fondo de la misma se encuentra rodeado por suelo con menor concentración de oxígeno, ver Figura 9.5, lo cual conduce a que se forma una zona catódica en la parte superior y una zona anódica en la inferior, debido a la diferencia de concentración de oxígeno en el suelo, produciéndose con esto la corrosión del fondo del tubo, lo cual se puede evitar aplicando protección catódica.

9.2.1.4.Tubería nueva unida a tubería vieja

Cuando por alguna razón se tiene que cambiar algún tramo de tubería en una línea existente, la tubería existente funciona como cátodo, mientras que la nueva como ánodo, produciéndose la corrosión de la tubería nueva, lo anterior puede evitarse si se aplica un recubrimiento anticorrosivo al tramo de tubería nuevo, ver Figura 9.6.

9.2.1.5.Rayones de tubería

Los daños mecánicos que sufre una tubería enterrada como son rayones, se comportan como una zona anódica con respecto al resto de la tubería que funciona como zona catódica, ver Figura 9.7, incrementándose la corrosión en la zona del rayón, lo cual se puede evitar si primero se repara la zona dañada y después se aplica un recubrimiento anticorrosivo en la misma.

9.3. CORROSIÓN ELECTROLÍTICA

La mayoría de las líneas enterradas que conducen agua o hidrocarburos en México, están protegidas por un sistema de protección catódica, el cual inyecta corriente directa a la superficie externa de la tubería, protegiendo con esto las zonas dañadas del recubrimiento anticorrosivo de la misma.

En caso de que otra línea ajena se construya corte de la línea protegida catódicamente, se pueden presentar problemas de corrosión localizada en la tubería ajena.

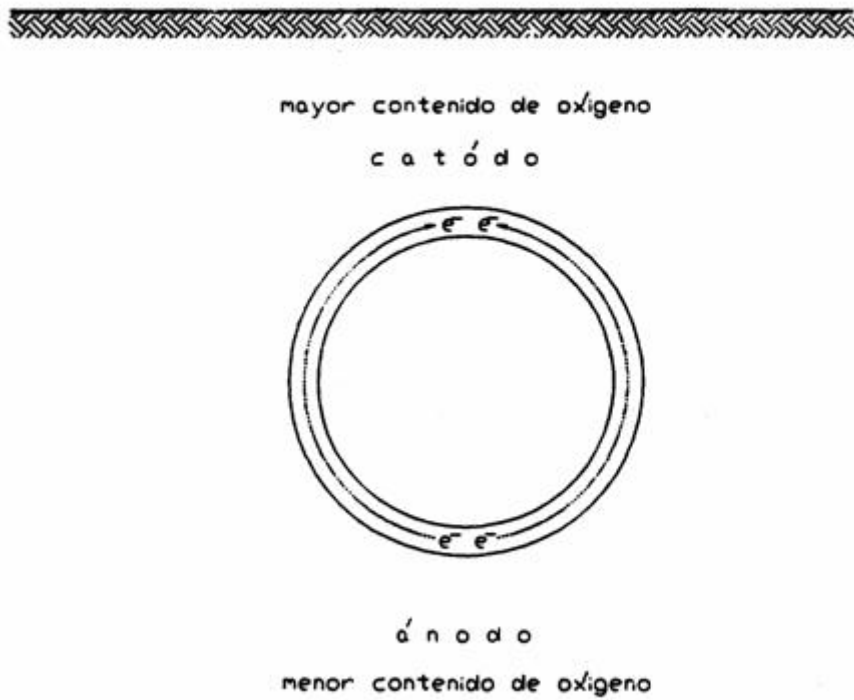


Figura 9.5 Corrosión debido a diferencia en concentración de oxígeno



Figura 9.6 Corrosión por diferencias en el metal

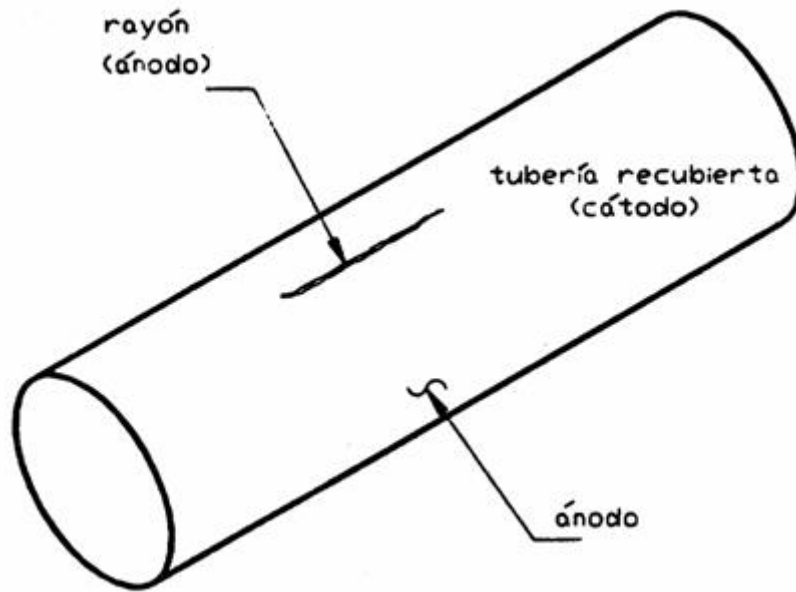


Figura 9.7 Corrosión en zonas dañada

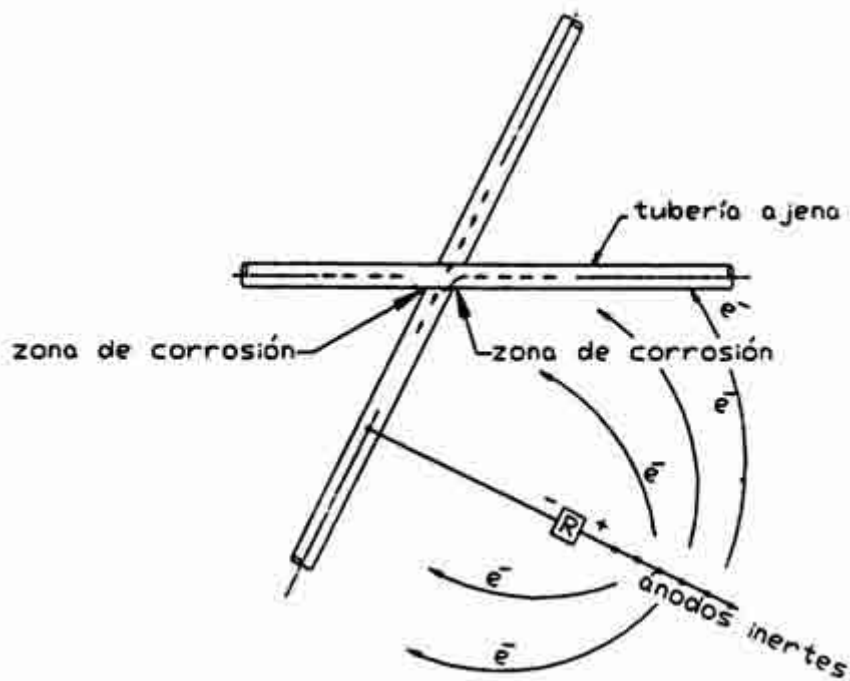


Figura 9.8 Corrosión electroquímica

Un sistema de protección catódica genera corriente directa, que se transmite, a través del suelo, hacia la tubería a proteger. Esta corriente generalmente se transmite por el camino del suelo que ofrezca menos resistencia a su paso, entonces si se instala una línea ajena en la cercanía de la tubería protegida, la corriente toma el camino más fácil que es a través de la tubería ajena que recolecta esta corriente, en los puntos donde la corriente directa entra a la tubería ajena no ocurre corrosión

ya que está siendo protegida por esta corriente, el problema se presenta cuando la corriente sale de la tubería ajena, donde la tubería sufre corrosión acelerada, ver Figura 9.8.

La corrosión electrolítica se puede evitar aplicando un recubrimiento anticorrosivo a la tubería ajena (por ejemplo, de Petróleos Mexicanos), que cruza o está localizada en la cercanía de tuberías protegidas catódicamente. Cuando se tenga un cruce con otra línea, se podrán utilizar sacos de arena para separar las dos líneas.

También, se deben instalar ánodos de sacrificio en la zona del cruce, con objeto de proteger catódicamente a la línea de conducción de agua, ver Figura 9.8.

9.4. SEVERIDAD DE LA CORROSIÓN

La severidad de la corrosión externa de tuberías enterradas que conducen agua, depende de varios factores, entre los que se encuentran

- a) Relación de áreas entre las zonas ánódica y catódica
- b) Separación entre las zonas ánódica y catódica
- c) Resistividad del suelo
- d) Composición química del suelo
- e) Uniformidad del suelo

Entre los factores que se deben estudiar en campo, sobresale la resistividad del suelo, la cual debe ser medida para poder estimar el grado de corrosividad del mismo, enseguida se muestra una tabla de valores de resistividad y su corrosividad asociada, de acuerdo con la Norma Mexicana NOM-C-346:

Resistividad		corrosividad del suelo	
0	- 1,000 Ohm-cm	extremadamente agresivo	
1,000	- 2,500 Ohm-cm	muy agresivo	
2,500	- 4,000 Ohm-cm	medianamente agresivo	
4,000	- 10,000 Ohm-cm	ligeramente agresivo	
10,000	- Ohm-cm	no agresivos	

9.4.1. Mediciones de resistividad en campo

Las mediciones de resistividad del suelo, se deben realizar por medio del equipo Nilson 400, el cual está constituido por varillas de aluminio que se entierran con una separación entre ellas igual a la profundidad de muestreo de la resistividad del suelo; el equipo inyecta una cantidad de corriente conocida a través de las varillas extremas, como se muestra en la Figura 9.9, midiendo la caída de potencial entre las varillas interna, alta caída de potencial está relacionada con la resistividad del suelo, mediante el balanceo de un galvanómetro. La lectura de resistividad correspondiente, es la indicada una vez que el galvanómetro del equipo ha sido balanceado. Las lecturas de corrosividad del suelo se expresan en ohms-cm.

9.5. MÉTODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN EXTERNA

Los métodos que usualmente se emplean para el control de la corrosión externa de tuberías enterradas, son: el empleo de ánodos de sacrificio y corriente impresa, ambos combinados con un recubrimiento anticorrosivo.

9.5.1. Recubrimientos anticorrosivos

Entre los recubrimientos anticorrosivos empleados para la protección externa de tuberías enterradas se tiene el alquitrán de hulla, reforzado con fieltros de fibra de vidrio y papel saturado con asfalto, cintas de polietileno y los últimamente desarrollados del tipo epóxico (Fusion Bonded Epoxy) y recubrimientos a base de tres capea (una capa primaria de epóxico con capas externa de polietileno extruido); altos recubrimientos no tienen una aplicación amplia en líneas de conducción de agua en México, debido a su costo y a que fueron desarrollados para una elevada temperatura de operación (mayor de 323.15 °K).

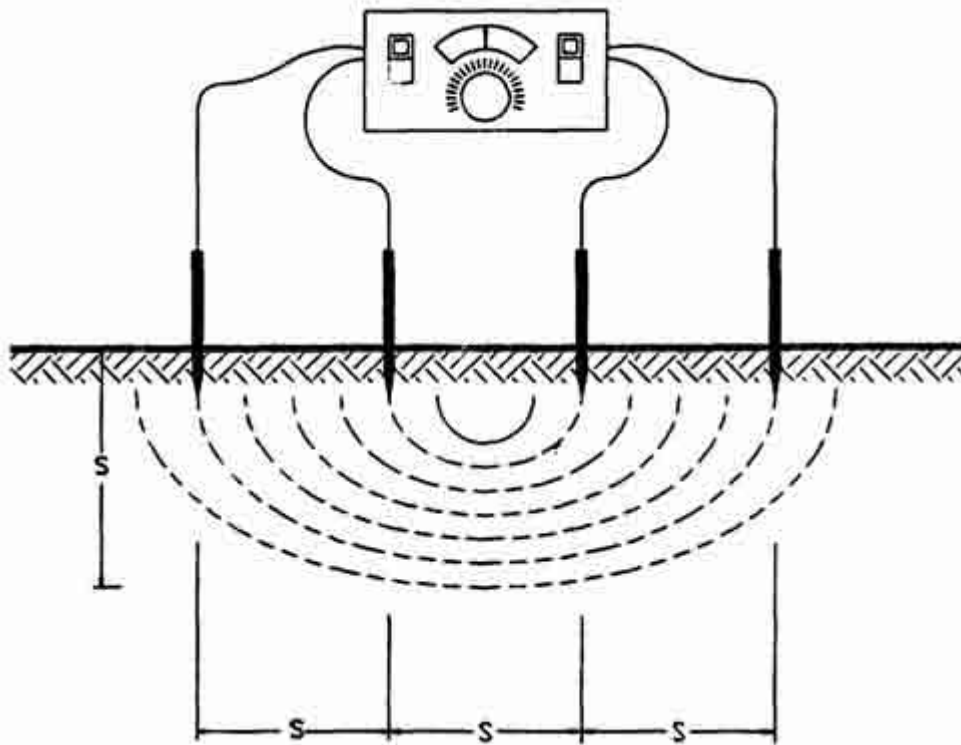


Figura 9.9 Diagrama para la medición de resistividad del suelo

El alquitrán de hulla se aplica cuando la temperatura de operación de la tubería no excede de 323.15 °K, este recubrimiento ofrece un buen comportamiento siempre y cuando la temperatura de calentamiento del alquitrán de hulla no exceda de 353.15 °K y se limpie continuamente el recipiente donde se calienta el alquitrán.

Las cintas de polietileno ofrecen buena protección anticorrosiva, sin embargo, tiene la desventaja de que cuando sufren desprendimiento, forman zonas donde la corriente de protección catódica no puede penetrar (zonas apantalladas), ocasionando con esto áreas desprotegidas y susceptibles de corrosión.

Los recubrimientos del tipo epóxico, tal como "Fusion Bonded Epoxy", proporcionan una excelente protección anticorrosiva de las tuberías enterradas, sin embargo, su costo de aplicación es elevado comparado con el alquitrán de hulla y las cintas.

9.5.2. Ánodos de sacrificio

En la Figura 9.10, se muestra el arreglo general de protección catódica de tuberías enterradas, empleando ánodos de sacrificio.

Los ánodos que se utilizan para tuberías enterradas son generalmente de aleación de magnesio, cada uno cuenta con un cable de instalación, por lo que se recomienda que éstos sean instalados con relleno especial (backfill) con una composición de 75% de sulfato de calcio hidratado (CaSO_4), 20% de bentonita en polvo y 5% de sulfato de sodio (Na_2SO_4).

La protección de las tuberías de acero se produce a consecuencia de la corrosión del magnesio, ya que la diferencia de potencial que existe entre el acero y el magnesio, genera un flujo de electrones que fluye del ánodo hacia la tubería a través de la conexión eléctrica, al mismo tiempo el ánodo produce iones de magnesio que viajan por el suelo para polarizar las zonas dañadas del recubrimiento externo de las tuberías.

Generalmente, el sistema de ánodos de sacrificio se emplea en tuberías que tienen un recubrimiento anticorrosivo en buen estado, y que están instaladas en suelos cuya resistividad es menor de 6,000 ohms-cm.

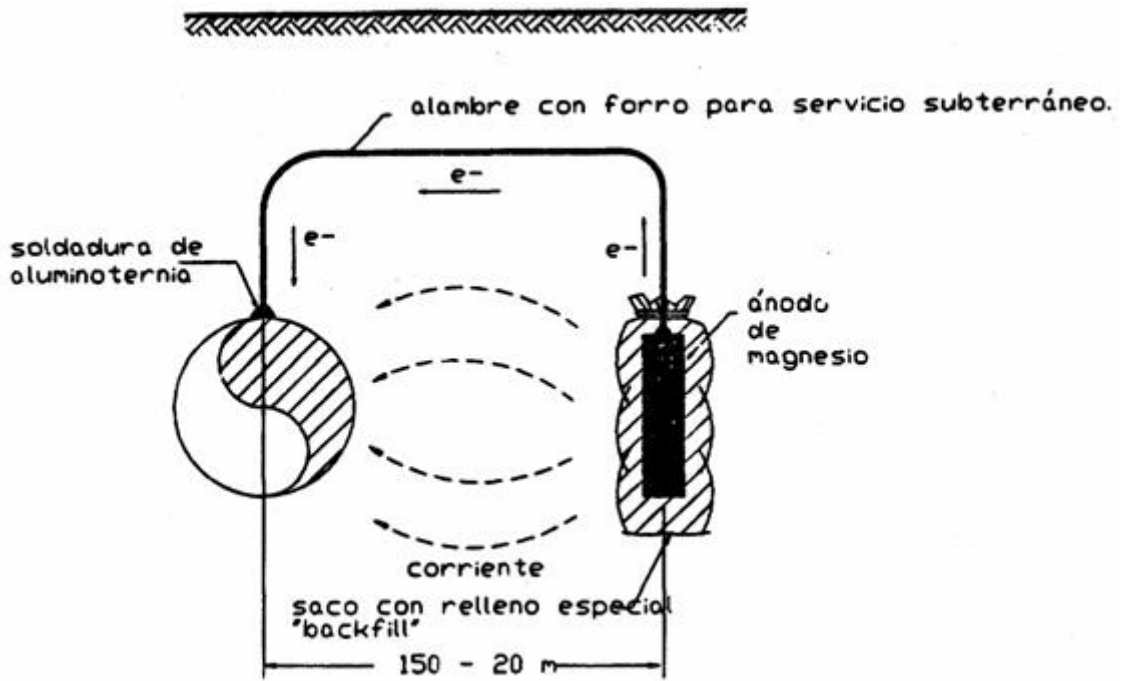


Figura 9.10 Protección catódica a base de ánodos de sacrificio

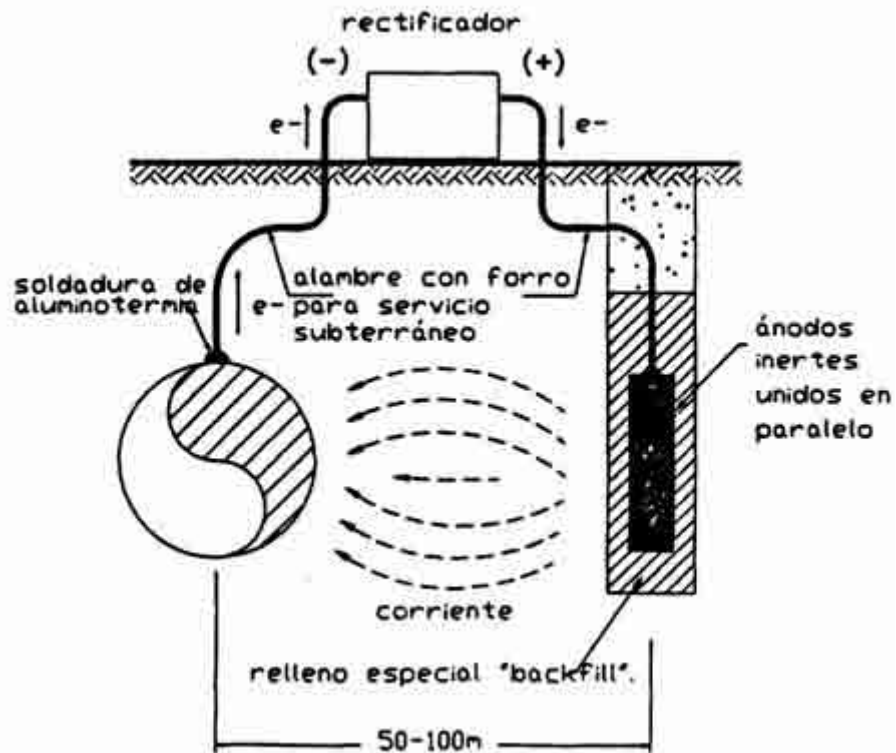


Figura 9.11 Protección catódica a base de corriente impresa

9.5.3. Corriente impresa

Este sistema consiste en inducir corriente directa a una tubería enterrada, mediante el empleo de un rectificador y cama de ánodos inertes. El rectificador transforma corriente alterna en corriente directa, y se trasmite en la masa del suelo a través de varios ánodos inertes unidos en paralelo y conectados a la terminal positiva del rectificador, como se muestra en la Figura 9.11, mientras que la terminal negativa se conecta a un cable que une a la tubería con el rectificador.

La corriente directa viaja de los ánodos inertes hacia la tubería a través del suelo, y se cierra el circuito por medio del cable que une a la tubería con la terminal negativa del rectificador (cable de retorno). Los ánodos inertes que comúnmente se emplean son de grafito o fierro-silicio.

El sistema de corriente impresa se utiliza en tuberías enterradas de gran longitud (por ejemplo 20 kilómetros) a instaladas en suelos de mediana a alta resistividad.

Para aplicar este sistema, es necesario que se tenga disponible una línea de corriente alterna en la cercanía de la tubería enterrada.

9.5.4. Corrosión interna

La corrosión interna se produce generalmente por celdas galvánicas que se originan en la pared interna de la tubería, generándose zonas corroídas con incrustaciones de hidróxido férrico. Estas incrustaciones o costras reducen la sección transversal de la tubería y por lo tanto su capacidad de transporta de agua.

Una forma de evitar la corrosión interna consiste en la aplicación de recubrimiento anticorrosivo a la pared interna del tubo:

9.5.4.1. Recubrimientos anticorrosivos

La función principal del recubrimiento anticorrosivo interno es crear una barrera entre el metal de la tubería y el electrólito (agua), y adicionalmente proporcionar una superficie lisa, a fin de evitar la corrosión de la pared interna de tuberías que conducen agua Ver Tabla A.1 de la Guía.

10. TRANSPORTE, INSTALACIÓN Y PRUEBA

10.1. GENERALIDADES

Los procedimientos para el transporte, zanjado, tendido, relleno y prueba hidrostática de tuberías de acero depende de varios factores, como son: su diámetro, condiciones de operación, su localización (urbana, suburbana o rural), el terreno donde será colocada (plano, inclinado o montañoso), así como del tipo del suelo, profundidad de enterrado y relleno.

Este capítulo especifica los requerimientos mínimos que deben cumplirse para el transporte, instalación y prueba. Es importante señalar que las propiedades mecánicas del suelo excavado, así como las del suelo que será usado de relleno son de gran importancia. Asimismo los principios de mecánica de suelos adecuadamente aplicados a las prácticas de excavación y relleno, conducirán a que los sistemas de tubería bajo condiciones de trabajo sean más seguros y económicos.

10.2. TRANSPORTE Y MANEJO

Las tuberías de acero con protección mecánica (recubrimiento anticorrosivo) son transportadas generalmente por camiones, ferrocarriles o barcos, y los requerimientos para estibar y restringir las tuberías durante el tránsito dependen del modo de transporte.

10.2.1. Camión

La mayoría de las tuberías de acero con recubrimiento anticorrosivo aplicado en planta son transportadas directamente al sitio de instalación en tractocamiones equipados con plataforma. Para el transporte en camiones, los tubos deberán ser colocados sobre entablados previamente instalados en las plataformas de los camiones, para lo cual se emplearán materiales que sirvan de amortiguadores en las superficies de contacto de los tubos. Todos los cables, cadenas y demás elementos que se utilicen para asegurar los tubos en su posición correcta, deberán estar forrados de materiales adecuados para evitar que se pueda dañar el recubrimiento anticorrosivo o la superficie del tubo.

En tubos de gran diámetro (1.143 m ϕ y mayores) se recomienda el empleo de camas formadas por sales de arena.

10.2.2. Ferrocarril

Cuando el transporte se efectúe en ferrocarril, todos los tubos deberán ser cuidadosamente estibados en los carros o góndolas, intercalando camas de material que amortigüe entre cada cama de tubos, y entre tubo y tubo de cada cama. Las tuberías serán firmemente sujetadas por medio de travesaños, cables u otros elementos que impidan su movimiento durante el transporte. Todas las superficies de contacto y de carga entre las tuberías y las partes de la caja o furgón deberán ser

cubiertas con materiales que sirvan de amortiguadores. Asimismo, se tomarán las medidas pertinentes para que cede tramo de tubo quede separado de su inmediato, a fin de evitar que se dañen mutuamente.

10.2.3. Barco

En el transporte por barco, se sugiere que las tuberías pequeñas (1.066 m ϕ y menores) deben empacarse y las grandes (1.143 m ϕ y mayores) estibarse, de tal manera que absorban la vibración y el movimiento de rodado. Además se emplearán colchones de madera adecuados o barreras similares para evitar que las tuberías se rocen entre sí. El inspector responsable de revisar los arreglos de la carga, debe asegurarse que el equipo de manejo tanto en el muelle como en el barco esté aprobado para su uso en tubería con recubrimiento anticorrosivo; es posible considerar la factibilidad de introducir tuberías de diámetro menor en tuberías de diámetro mayor para reducir los costes del flete, sin embargo, deberán utilizarse colchones para asegurar que se mantenga la integridad del recubrimiento.

10.2.4. Helicóptero

En casos especiales, cuando el sitio de instalación sea inaccesible y se trate de tuberías menores de 0.61 m de diámetro, puede requerirse de helicóptero para su transportación, en tal caso, debe haber comunicación con la aerolínea para conocer la longitud máxima, ancho, altura y limitaciones de peso para la trayectoria seleccionada.

10.2.5. Carga y descarga

En la maniobra de carga y descarga de los tubos se deberá emplear equipo adecuado, para evitar el contacto directo entre las superficies de los tubos y partes metálicas del equipo. Deben utilizarse correas de nylon, lonas, bandas y horquillas acolchonadas, así como patinas diseñados para prevenir daños al recubrimiento anticorrosivo. Las cadenas y cables deberán estar forrados con materiales apropiados, a fin de evitar los deterioros mencionados. Mientras los tubos se encuentren suspendidos en la maniobra de carga y descarga, se inspeccionará que no existan daños en la parte inferior de los mismos.

10.2.6. Descarga a lo largo de derecho de vía

Los tubos deberán ser colocados paralelamente a lo largo de las zanjas o excavaciones en las que después serán instaladas. Si el terreno es rocoso existe riesgo de daño al recubrimiento anticorrosivo, ambos extremos (aproximadamente a un cuarto de los mismos) deberán apoyarse en bloques de madera acolchados, sales de arena, montículos de arena a otro tipo de soporte que proteja el recubrimiento de la tubería.

10.3. ZANJADO

10.3.1. Profundidad

Por lo general las tuberías son enterradas para protegerlas de golpes y cargas pesadas o concentradas que puedan dañarlas, así como para evitar la flotación, ya que al presentarse la lluvia, la tubería podría flotar en caso de encontrarse en el fondo de la zanja y sin relleno. Al estar la tubería enterrada, las cargas exteriores resultan uniformemente distribuidas, por lo que es recomendable que el relleno tenga una altura mínima de 900 milímetros a partir del lomo del tubo, si el diámetro es menor o igual a 900 milímetros; para diámetros mayores la altura debe ser de 1.0 a 1.5 metros, y se revisará que las cargas aplicadas a la tubería no afecten al tubo. En el capítulo sobre Acciones se indica el procedimiento para la determinación de estas cargas.

10.3.2. Ancho

Para facilitar el trabajo durante la instalación de la tubería, la excavación se hace de un ancho B mayor que el diámetro exterior del tubo, incluyendo protección mecánica.

$$B = \frac{4}{3}d_e + 400 \quad (10.1)$$

donde:

- B es el ancho de la zanja en (mm)
- d_e es el diámetro nominal del tubo en (mm)

10.4. CAMA Y RELLENO DE ZANJA

10.4.1. Cama

El fondo de la zanja no deberá tener irregularidades ni objetos que generen concentración de esfuerzos, ya que debe permitir un apoyo uniforme sin forzamientos ni dobleces mecánicos de la tubería. Las zanjas con el fondo plano deben excavarse a una profundidad mínima de 50 milímetros abajo de la línea establecida para el fondo.

El exceso de excavación en donde se han removido todas las piedras y terrones duros debe llenarse con material suelto. El material suelto debe acomodarse uniformemente en toda la longitud de la tubería. Cuando el fondo de la zanja contenga objetos duros, sólidos, que puedan dañar el recubrimiento protector, se colocará bajo la tubería una cama de 80 a 150 milímetros de espesor de arena.

Si la excavación se realiza en material rocoso, deberá tener por lo menos una profundidad adicional de 150 milímetros. La sobre excavación deberá reemplazarse

por dos capas; la primera de 100 milímetros con una plantilla de Brava y la segunda, donde apoyará la tubería, de 50 milímetros con material suelto.

10.4.2. Relleno

Después de que se han instalado en la zanja las tuberías, conexiones, válvulas y otros aditamentos y se hayan inspeccionado debidamente, ésta se rellenará a volteo con material seleccionado, esto es, un relleno que se encuentre exento de rocas y piedras grandes para evitar daños a la tubería y/o recubrimiento anticorrosivo. El material de relleno podrá ser el material excavado. Las juntas se deben dejar expuestas hasta que se hayan concluido las pruebas de presión y de fugas. En calles y otros lugares donde no es recomendable el asentamiento, se debe consolidar el relleno por compactación, la cual se debe realizar en capas no mayores de 150 milímetros.

Sí la tubería se encuentra localizada en una zona clasificada como de alta sismicidad, para el relleno se tomará en cuenta lo indicado en la recomendación Numero 2 para diseño de tuberías enterradas que cruzan fallas geológicas activas, de la sección 5.3.5 de este manual.

Se deberá restaurar adecuadamente el pavimento, aceras, prados y arbustos.

10.5. PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN

10.5.1. Preparación de la tubería

En caso de que el proyecto requiera dobleces en la tubería, éstos deberán efectuarse antes de la preparación de la tubería para la aplicación del recubrimiento anticorrosivo.

Antes de aplicar el recubrimiento anticorrosivo a la tubería esta debe prepararse adecuadamente. Primero se tendrá que calentar el tubo uniformemente, a una temperatura de 383.15 °K, con el fin de quitar por completo toda la humedad, después, se limpiará con chorro de arena o granalla de acero, para remover también todo el aceite, grasa, alquitrán, derrumbe, escamas, escoria a otros contaminantes que existan sobre la tubería, el metal base debe presentar una apariencia grisácea mate, comparable a la limpieza de metal blanco, durante la limpieza.

Los extremos de la tubería, deberán protegerse con tapones que impidan la entrada de abrasivo al interior de la tubería. El abrasivo que penetre a la tubería deberá ser removido antes de aplicar el recubrimiento.

Una vez terminada la limpieza, la superficie exterior del tubo debe inspeccionarse cuidadosamente, bajo iluminación adecuada; todos los defectos de la superficie, como son: astillas, incrustaciones, rebabas, salpicaduras de soldadura, golpes, etc., deben removerse completamente por esmerilado. Pequeños defectos superficiales pueden removerse por esmerilado. La tubería que contenga alguna abolladura

deberá apartarse por el contratista, para efectuarle pruebas de inspección de acuerdo a los códigos correspondientes y se determinará que hacer con ella. Todas las áreas esmeriladas deben limpiarse con chorro de arena. Todo el polvo y residuos nocivos, deben removerse con el uso de aire comprimido, que deberá estar libre de aceite y humedad.

La tubería que se limpia con chorro de arena, y no ha sido recubierta, antes de que se presenta el efecto de oxidación superficial visible, o no se haya recubierto dentro de las tres horas después de la limpieza, deberá limpiarse nuevamente con chorro de arena.

El recubrimiento anticorrosivo a base de cinta de polietileno ó alquitrán de hulla, será aplicado a la tubería, siempre y cuando la superficie de la misma esté perfectamente limpia; su aplicación se hará de la siguiente forma:

La cinta se aplicará envolviendo a la tubería, espiralmente con un traslape mínimo de 25.4 mm y una tensión controlada de 0.069 MPa (0.70 Kg/cm²).

La cinta puede ser aplicada: manualmente, con máquina manual encintadora, con máquina de transmisión, o bien, con equipo de aplicación en planta.

En la planta, los procedimientos bajo los cuales se aplicará la cinta a la tubería serán: por transportación lineal de la cinta y por transportación espiral de la cinta.

En cada extremo de la tubería, deberá dejarse una franja libre de recubrimiento de 300 mm de ancho, para la fase de alineamiento y soldadura de campo.

Una vez aplicado el recubrimiento a la tubería, éste deberá ser inspeccionado con el objeto de comprobar su calidad, o bien, para detectar las posibles fallas y repararlas apropiadamente.

Para inspeccionar el recubrimiento, se usará un detector eléctrico de bajo amperaje y de voltaje ajustable, que detecte las fallas de recubrimiento, mediante pulsaciones eléctricas.

El voltaje mínimo de operación del detector, será de 10,000 Volts. El voltaje deberá ajustarse apropiadamente, por lo menos una vez al día, ya que la humedad y la temperatura podrían desajustarlo. El detector será aplicado al recubrimiento, pasándolo una sola vez a una velocidad de 0.15 a 0.30 m/s. Cualquier falla en el recubrimiento será indicada por una chispa entre el electrodo y la superficie del tubo y/o también por una señal luminosa y audible.

Las fallas detectadas en el recubrimiento, serán reparadas en la forma siguiente:

Reparaciones menores. El área por reparar, se limpiará perfectamente y sobre ella se colocará un parche del mismo material de cinco cm. mayor en todas direcciones del área por reparar.

El área por reparar y el parche por colocar, deberán estar perfectamente libres de impurezas y secos.

Tanto el área dañada como el lado adhesivo del parche se deben calentar, y una vez que el adhesivo comience a fluir, se colocará sobre el área dañada, moldeándolo del centro hacia los extremos. La zona reparada deberá ser nuevamente inspeccionada.

Reparaciones mayores. En estos casos, el área defectuosa se calienta hasta que el material se ablande, y posteriormente, se remueve con la ayuda de una espátula o navaja, y en su lugar se colocará el parche, siguiendo el procedimiento adecuado para su instalación.

10.5.2. Manejo y tendido

Durante la instalación de la línea en las zanjas debe observarse un cuidado similar al que se tiene durante la carga, transporte y descarga de la tubería. Las tuberías con recubrimiento anticorrosivo requieren un cuidado adicional cuando se manejan temperaturas arriba o abajo de las recomendadas por el fabricante.

Las tuberías recubiertas no deben depositarse en terrenos ásperos, ni rodarse en tales superficies. Únicamente se permitirá el rodado de tuberías revestidas cuando los extremos estén desnudos y se disponga de rieles en donde se rueda el acero expuesto.

Durante el manejo y colocado de la tubería en la zanja, se deberán utilizar protectores para evitar su daño la tubería no debe arrastrarse sobre el fondo de la zanja ni tampoco golpearse contra el fondo. Mientras se prepara para realizar la junta, la tubería debe soportarse sobre las bandas. El recubrimiento de la tubería se inspeccionará en tanto esté suspendida de las bandas, además cualquier daño visible al recubrimiento debe repararse antes de bajar la tubería a la zanja.

La zanja debe mantenerse libre de agua que pueda afectar la integridad de la cama y las operaciones de soldado de las juntas.

Pueden permitirse algunos soportes especiales, pero de ninguna manera deben instalarse permanentemente secciones de tubería sobre maderos, montículos de tierra, o apoyos similares.

El grado máximo de deflexión permanente permitido para dobleces de la tubería en frío, se determinará de acuerdo a la siguiente tabla que expresa el radio mínimo en función del diámetro exterior:

Diámetro exterior de la tubería	Radio mínimo de doblado
323.8 mm (12.75")	$18d_e$
355.6 mm (14")	$21d_e$
406.4 mm (16")	$24d_e$

457.2 mm (18")	27d _e
505.8 mm y mayores (20" y mayores)	30d _e

donde:

d_e es el diámetro exterior de la tubería(m)

Deberá vigilarse que los dobleces se efectúen antes de aplicar el recubrimiento anticorrosivo, ya que de otra manera éste podría dañarse.

10.5.3. Ensamble de la tubería

Durante el ensamble de la línea, previo a su instalación en la zanja, deberá limitarse el grado de curvatura elástica, de tal manera que no se exceda el esfuerzo de fluencia del material y/o se dañen los recubrimientos interiores y exteriores de la tubería. La deflexión de la tubería en cualquier punto debe limitarse a las recomendaciones indicadas anteriormente.

10.5.4. Soldaduras de uniones

Para requerimientos técnicos en prácticas de soldadura de campo, se recomienda ver el capítulo 11 de este manual, correspondiente a Soldadura de Uniones.

Cuando se realiza una soldadura de campo (de unión) en una tubería revestida interior y/o exteriormente, debe permanecer desnuda una longitud corta (de aproximadamente 40 mm) en cada extremo, de tal manera que el calor de la soldadura no afecte adversamente el recubrimiento protector. La longitud del tramo desprotegido puede variar dependiendo del tipo de recubrimiento y el espesor de pared de la tubería.

10.5.5. Recubrimiento de juntas de campo

Después de haber completado la soldadura de unión, deberán recubrirse los tramos desnudos con el mismo material que se revistió el resto de la tubería. En tuberías de 610 milímetros de diámetro y mayores el recubrimiento interior de las juntas es recomendable sea reparado desde el interior, para lo cual los trabajadores que deban entrar a la tubería para completar el recubrimiento, tengan una ventilación adecuada. Las juntas en tuberías menores de 610 milímetros, deben repararse desde el exterior por medio de registros de mano.

10.6. PRUEBA HIDROSTÁTICA DE CAMPO

El objetivo primordial de la prueba hidrostática es verificar que las juntas no presenten fugas. Esta se realiza a un valor fijo arriba de la presión de trabajo.

Para realizar la prueba, la tubería se llena lentamente con agua, eliminando el aire de la línea a través de las válvulas de admisión y expulsión de aire colocadas en las partes más altas de la tubería; la presión de prueba debe ser verificada por medio de

una bomba y un manómetro de prueba, y será, cuando menos, 1.25 veces la presión de trabajo en la línea (ver referencia 11), debiéndose mantener como mínimo por dos horas, posteriormente, se realizará una inspección de la línea para detectar fugas visibles o desplazamientos en la tubería.

Cualquier defecto debe ser reparado antes de realizar la prueba de fuga, la cual determine, por medio de un medidor calibrado, la cantidad de agua que entra en la sección de prueba, bajo la presión normal de trabajo, durante un período de dos horas como mínimo. Los defectos permisibles se indican en el punto 10.6.3.

10.6.1. Tapones

Generalmente la prueba hidrostática se efectúa por secciones de tubería. Los extremos de la sección por probar pueden aislarse mediante válvulas o tapones soldados. Las válvulas no necesariamente son permanentes y podrán retirarse una vez terminada la prueba.

El empleo de tapones soldados puede resultar más económico. Un tapón convencional consiste en un tramo de tubo de aproximadamente un metro de largo, al que se suelda una placa plana por un extremo, y la tubería por probar por el otro. La placa plana puede ser de forma rectangular o circular. Sobre el tapón se colocan los aditamentos necesarios para la entrada de agua y salida de aire. Al término de la prueba se retira el tapón cortando la tubería de conducción a cierta distancia antes de la soldadura con el tapón.

10.6.2. Venteos

La tubería debe llenarse despacio para prevenir el posible golpe de ariete, asimismo, se tendrá cuidado para permitir que el aire escape durante la operación de llenado. Después de llenar la línea, puede ser necesario el uso de bombas para levantar y mantener la presión deseada.

10.6.3. Defectos permisibles

No se aceptará una instalación hasta que la fuga sea menor del número de litros por hora que se determine por la fórmula siguiente:

$$L = \frac{Nd_i \sqrt{P_m}}{1.033} \quad (10.2)$$

donde:

- L es la fuga permisible, l/h
- N es el número de juntas en la longitud de línea probada
- d_i es el diámetro de la tubería (mm)
- P_m es la presión media durante la prueba de fugas (MPa)

Las fugas presentadas en las juntas de soldadura deben ser marcadas para una adecuada reparación con soldadura, (ver capítulo 11). Tales soldaduras pueden ser realizadas sin vaciar la tubería, únicamente bajando la presión.

Si una tubería no pasa la prueba hidrostática, será necesario localizar, descubrir, reparar o reemplazar cualquier defecto en la tubería, válvula, junta o accesorios. Una vez que esto se realizó, se probará nuevamente la tubería.

10.6.4. Desinfección de las tuberías

El interior de la tubería y los accesorios deben mantenerse libres de desechos y contaminación, y aunque se tomen precauciones durante la instalación, se debe realizar la limpieza a chorro de agua y la desinfección de la tubería, para tener la seguridad que se entrega a los consumidores agua potable segura. Al terminar el día de trabajo, el uso de tapas o cubiertas evita que entren a la tubería, durante las horas nocturnas, animales, insectos y drenaje superficial.

Para la desinfección de las tuberías se puede utilizar hipoclorito de calcio (de sodio), cloro gaseoso o cloro líquido. El hipoclorito de calcio es particularmente seguro y fácil de aplicar, aunque se debe tener cuidado que el desinfectante no pierda su potencia por una exposición prolongada a la atmósfera. El hipoclorito seco se mezcla con agua para obtener una solución de cloro al uno por ciento. Esta se aplica en el extremo de la tubería, donde la conducción del agua lo puede distribuir por toda la longitud del tramo. La dosis del cloro debe ser tal que produzca un residual de diez, cuando menos, en el extremo opuesto de la tubería, después de un reposo de 24 horas. Esto se puede esperar con una aplicación de 25 mg/l de cloro.

También puede utilizarse un inyector de cloro gaseoso, o bien, entregar grandes cantidades de cloro, el cual es especialmente útil en la esterilización de tuberías de gran diámetro. Además se puede regular la tasa de aplicación y reducir la duración del proceso de inyección.

Otro método es el uso de cilindros de cloro gaseoso, el cual puede ser peligroso si es que la inyección no queda bajo la supervisión de un empleado competente. Después de una reducción en la presión, el cloro líquido se inyecta en la tubería. Es necesario un cierto gasto de agua para distribuir el cloro. Se puede presentar la congelación del cloro, si la tasa de aplicación no se regula apropiadamente.

El lavado a chorro de la tubería debe ser íntegro para eliminar el agua intensamente clorada antes que la línea se ponga en servicio.

11. SOLDADURAS DE UNIONES. (CON MATERIAL DE APORTE)

11.1. GENERALIDADES

La soldadura es un proceso de ensamble de metales en el que la coalescencia se obtiene por calor y/o presión. También se puede definir como una liga metalúrgica efectuada por fuerzas de atracción entre átomos.

Antes que estos átomos se puedan unir, deben eliminarse los vapores absorbidos y los óxidos de las superficies en contacto. Si se aplica una fuerza entre las dos superficies metálicas lisas por unir, algunos cristales se fragmentarán a lo largo de las superficies y se mantendrán en contacto. En tanto se aplique más presión, estas áreas aumentan y se efectúan otros contactos. La coalescencia se obtiene cuando los límites entre las dos superficies forman planos cristalinos. El rompimiento o eliminación de las capas de oxígeno en la superficie es fundamentalmente lo que sucede cuando se efectúa una soldadura. Este proceso, es conocido como soldadura en frío.

Si se añade temperatura a la presión, se facilitará la soldadura de las dos superficies, y la coalescencia se obtendrá de la misma manera que para la soldadura por presión en frío. Conforme se incrementa la temperatura, la ductilidad del metal de base aumenta y la difusión atómica progresa más rápidamente.

Se han desarrollado diversos procesos de soldadura que difieren ampliamente en el modo de aplicar el calor y en el equipo usado. Estos procesos son:

- Soldadura fuerte
- Soldadura por forja
- Soldadura con gas
- Soldadura por resistencia
- Soldadura por inducción
- Soldadura por arco
- Haz de electrones
- Soldadura por láser
- Soldadura por fricción
- Soldadura aluminotérmica
- Soldadura por vaciado
- Soldadura en frío
- Soldadura por explosión

En cualquier tipo de soldadura, la coalescencia mejora con la limpieza de las superficies por soldar. Los óxidos superficiales se deben eliminar ya que tienden a quedar atrapados en el metal en solidificación. Frecuentemente se utilizan fundentes para eliminar los óxidos en escorias fusibles que flotan en el metal fundido, protegiéndose de la contaminación atmosférica. En la soldadura por arco eléctrico, el

electrodo está revestido de fúndente, creando una atmósfera antioxidante en el momento en que se está efectuando la soldadura.

Para el caso en particular de fabricación de tubería para conducción de agua, el proceso de soldadura más empleado es el de fusión por arco eléctrico, donde la coalescencia se obtiene por medio del calor producido por un arco eléctrico entre la pieza y el electrodo. El electrodo o metal de aporte se calienta a un estado líquido y se deposita en la junta para efectuar la soldadura. Primero se hace contacto entre el electrodo y la pieza para crear un circuito eléctrico y después separando los conductores, se forma un arco. La energía eléctrica es convertida en calor intenso en el arco, que alcanza una temperatura de alrededor de 5,773.15 °K (5,500 °C).

Para la soldadura por arco se puede usar ya sea corriente alterna o directa, prefiriéndose la corriente directa para la mayoría de los propósitos; debiéndose tener un voltaje de arco de 18 a 40 V, de acuerdo a las Normas National Electrical Manufactures Association.

En la soldadura por fusión con arco eléctrico, los dos bordes o superficies a unir son calentados hasta llegar al punto de fusión, añadiendo metal de relleno (aporte) fundido. Estas soldaduras comprenden tres zonas metalúrgicas:

Zona de fusión, zona afectada por el calor sin fundir adyacente a la zona de fusión y el metal base por soldar, tal como se muestra en la Figura 11.1

Para la soldadura por arco, ésta puede ser continua (1 peso), formando un depósito de soldadura fundida que atraviesa la unión a lo largo, continuamente. En forma alterna, puede realizarse en cierto número de cordones superpuestos, que se funden cada uno con los de abajo, como se muestra en la Figura 11.2.

Para la fabricación de tubería por arco eléctrico se recomienda el uso de lo siguientes procesos de soldadura.

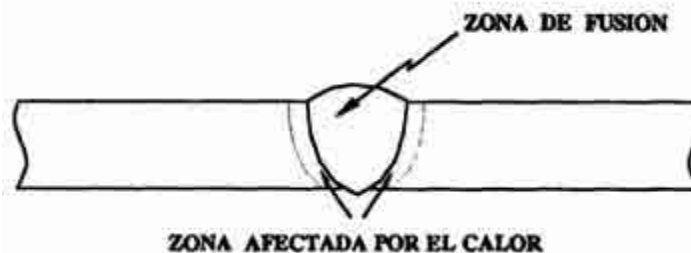
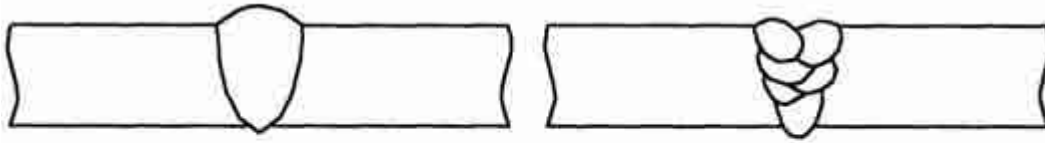


Figura 11.1 Soldadura por Fusión



**Soldadura por Fusión de Simple
Cordón.**

**Soldadura por Fusión de
Cordón Múltiple.**

Figura 11.2 Soldaduras de Cordón Simple y Múltiple

- SMAW = Soldadura por arco eléctrico manual.
 SAW = Soldadura por arco eléctrico sumergido.
 GMAW = Soldadura por arco eléctrico metálico con protección de gas.

La soldadura por arco eléctrico manual (SMAW), se efectúa formando un arco entre un electrodo de varilla y la pieza de trabajo, calentando así simultáneamente la pieza de trabajo calentando así simultáneamente la pieza y fundiendo el electrodo, que suministra el material de relleno para la unión. En la práctica moderna virtualmente todos los electrodos de soldadura de arco metálicos están revestidos con un espesor sustancial de material fundente.

En el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW), se mantiene un arco entre un electrodo de alambre desnudo que avanza continuamente y la pieza de trabajo que está situada debajo de una masa de flujo granular fundible. El arco que se forma, funde una parte del fundente que protege el depósito de soldadura de contaminación atmosférica, mientras que el fundente sin derretir actúa como recubrimiento del mismo arco.

Para los procesos SMAW y SAW, los fundentes y revestimientos tienen las siguientes funciones:

- A) Proporcionar una atmósfera gaseosa adecuada para el arco y el depósito de soldadura.
- B) Producir una escoria que dará protección adicional al depósito de soldadura, refinará el metal de soldadura fundido, y ayudará a la manipulación del depósito de soldadura.
- C) Actuar como transformador de ferroaleaciones, desoxidantes y polvo de hierro.
- D) Producir el arco deseado y las características de traslado del metal que se requieran.

En el proceso de arco metálico con protección de gas (GMAW), el arco se mantiene en una corriente de gas inerte entre un electrodo consumible y la pieza de trabajo. El arco calienta la pieza y funde el electrodo, que de esta forma suministra el metal de relleno para la unión, los gases recomendados se listan en la Tabla 11.3.

Para la unión de tubería mediante alguno de los procesos mencionados, es necesario preparar los extremos por soldar, a dicha preparación se le conoce como bisel, que puede ser de los tipos que se indican en la Figura 11.5.

El tipo de bisel se considera como "variable" en la elaboración de un procedimiento de soldadura, necesario para garantizar la eficiencia y calidad de una junta. La elaboración y calificación de procedimientos se describe en la parte 11.1.1 de este Manual.

Una vez que se cuenta con la calificación de procedimientos y del personal que se usará en una obra, se debe considerar la inspección de las uniones realizadas, la técnica recomendada para esta práctica, es la radiografía, que deberá aplicarse en un 100 % en la fase inicial de construcción y que podrá disminuir en función de los resultados obtenidos, como se muestra en la Tabla 11.6.

La fabricación a instalación de tubería mediante una unión soldada (con material de aporte), estará respaldada por un procedimiento de soldadura por escrito, elaborado y calificado mediante pruebas mecánicas, por la compañía contratista.

La "Especificación del Procedimiento de Soldadura" (EPS), establece las variables que intervienen para producir la junta soldada.

La finalidad de elaborar y calificar un procedimiento de soldadura es el de establecer una guía de parámetros técnicos, capaz de producir uniones soldadas de buena calidad metalúrgica, que tengan como mínimo las mismas propiedades del metal base.

El procedimiento de soldadura debe aprobarse antes de iniciar la fabricación a instalación de tubería, y su elaboración debe cumplir con el Código ASME Sección IX Artículo 2.

Para la manufactura en taller de tubería y piezas especiales de baja y alta presión, instalación de piezas de alta presión en campo; y montaje en campo de línea regular y habilitado de piezas especiales (codos, tees, bifurcaciones, etc.), rige el Código API 1104.

11.1.1. Parámetros técnicos requeridos en la elaboración del procedimiento de soldadura

Los procesos de soldadura empleados comúnmente en la manufactura de tubería son: el arco eléctrico manual (SMAW), el arco eléctrico con protección de gas (GMAW) y el arco eléctrico sumergido (SAW). Se puede establecer el procedimiento de soldadura considerando los parámetros técnicos típicos de una junta soldada a partir de estos procesos

A continuación se indican las principales variables de un procedimiento de soldadura:

- Tipo de junta.
- Metal Base.
- Metal de Aporte.
- Posición de Soldeo.
- Precalentamiento.
- Tratamiento Térmico de Postcalentamiento.
- Composición del Gas ó fundente de Protección.
- Características Eléctricas.
- Técnicas de soldeo

Algunos de estos parámetros son considerados variables esenciales, y es obligación del constructor o usuario de la especificación del procedimiento de soldadura (EPS), conocerlas y recalificar el procedimiento cuando existe un cambio que modifique de los intervalos de la calificación inicial.

El objetivo de describir estos parámetros, es que el inspector y/o contratante conozca, revise y de seguimiento a su cumplimiento durante el proceso del soldeo en la fabricación o instalación de la tubería.

Tipo de junta

Se entiende como junta a la unión de materiales mediante un enlace llamado aporte o electrodo. Estas juntas por su diseño pueden ser de dos tipos:

- 1) Junta a tope.

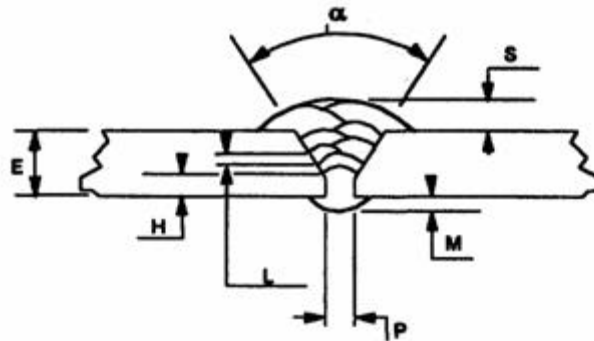
Los materiales a unir presentan sus caras paralelas y en el mismo eje. Estas uniones son empleadas principalmente en juntas de tubos de taller y campo.

- 2) Junta de filete.

- a) En "T" donde los materiales a unir presentan posiciones disímiles y en ejes perpendiculares. Estas juntas son empleadas en cartelas de sujeción, líneas con cambios de derivación y conexiones de tubos con accesorios, refuerzos de solapa, anillos, etc.
- b) En traslape.- Donde los materiales se traslapan en ejes paralelos. Estas juntas son empleadas en inserciones de válvulas de admisión y expulsión de aire y refuerzos para registros-hombre y conexiones en general.
- c) En esquina.- Donde los materiales a unir presentan posiciones diferentes en eje angulado, distintos a $\pi/2$ rad (90°). Estas juntas son características en bifurcaciones.

Una junta ya sea de tope ó de filete debe de presentar una preparación en la superficie o cara de soldeo, misma que se conoce con el nombre de bisel, y en el cual se deben especificar sus dimensiones y geometría.

En las Figuras 11.3, 11.4, y 11.5, se muestran esquemáticamente las juntas, biseles y acotaciones más relevantes que deben ser indicados en el EPS.



- α = ANGULO DE LA JUNTA A SOLDAR
- E = ESPESOR DE LA PLACA
- S = REFUERZO DEL CORDON
- L = TRASLAPE DEL CORDON
- M = PENETRACION DE LA SOLDADURA
- H = HOMBRO DE LA SOLDADURA
- P = ABERTURA DE RAIZ

Figura 11.3 Componentes de una junta a Tope

Metal base

La materia prima o placa usada como metal base en la fabricación de tubo de acero debe estar indicada en el EPS, tanto en su especificación de material, tipo y/o grado, así como su clasificación basada en ASME Sección 9, debiéndose señalar el número de grupo y el número P (en el de API SL solo se mencionará material y grado). El número de grupo reúne los metales con propiedades mecánicas similares y el número P clasifica los metales por sus características de composición química y soldabilidad.

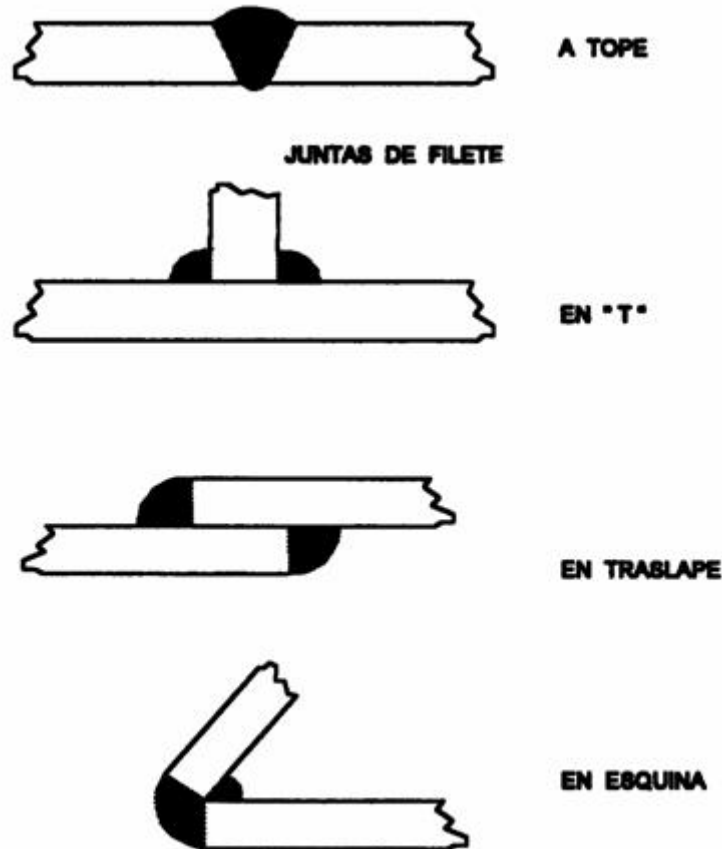


Figura 11.4 Tipos de juntas

En la Tabla 11.1, se muestra la clasificación según ASME y API 5L para los materiales utilizados en la manufacture de tubos.

Los materiales ASTM A-570, A-572 y los Grados API 5L, no se encuentran tabulados por ASME Sección 9, sin embargo pueden ser empleados siempre y cuando cumplan con el requisito de elaborar su EPS, y su Registro de Calificación del Procedimiento de Soldadura (RCP).

El empleo de otros materiales diferentes a los descritos anteriormente no se excluye, sin embargo requieren ser soportados técnicamente mediante su EPS.

El espesor del metal base y el diámetro del tubo por fabricar tienen que asentarse en el EPS, ya que la calificación proveerá el rango de espesores que son permitidos en las juntas de producción, sin requerir recalificación del procedimiento.

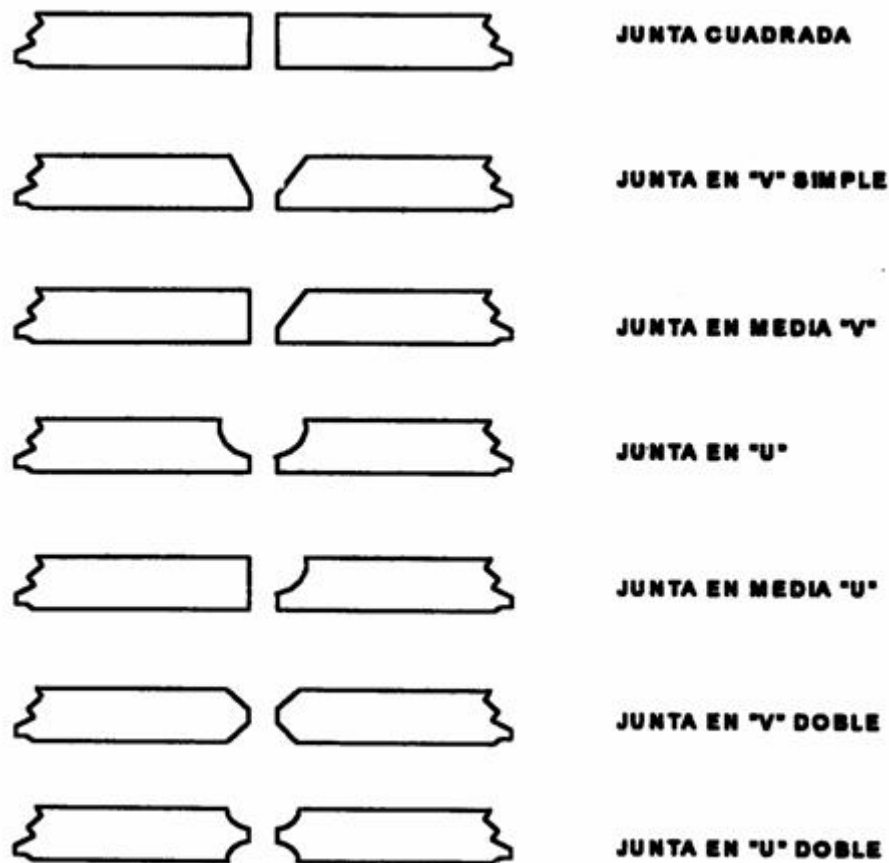


Figura 11.5 Tipos de Bisel

Metal de aporte

Los materiales de aporte o electrodos, son clasificados en dos grandes grupos.

El primero, agrupa a los electrodos y varillas de aporte con base en sus características de utilización, lo cual determine fundamentalmente la habilidad de los soldadores para efectuar trabajos de buena calidad, mediante el uso de un metal de relleno determinado. Esta agrupación se ha realizado para reducir el número de procedimientos y por lo tanto reducir el número de pruebas de calificación.

Un segundo grupo, clasifica a los electrodos con base en los métodos de aporte, de acuerdo con sus análisis químicos. La composición química de un metal de aporte que no está dentro de un grupo, se debe hacer constar en las especificaciones del procedimiento.

Tabla 11.1

NºP	GRUPO	NºDE ESP.	GRADO	RT(min) MPa	COMP. QUIM.	PRODUCTO
		SA53	A B	324,412	C-Mn	TUBO C/C
1	1	SA-283	A,B,C,D	314,343, 382,412	C-Mn	PLACA
1	1	SA-36		392	C-Mn-SI	PLACA
1	1	SA-570	30,33,36, 40,45, 50	334,353,363,3 82,412,441	C-Mn	PLACA
1	1	SA-572	42,50,60	412 441 .510	C-Mn-SI	PLACA
		API	Gr-B	412	C-Mn	TUBO C/C
		API	X-42	412	C-Mn	TUBO C/C
		API	X-52	451	C-Mn	TUBO C/C
		API	X-65	530	C-Mn	TUBO C/C

Limites de diámetro en soldadura a tope

Diámetro exterior de la probeta	Diámetro mínimo calificado
menor de 25.4 mm	El tamaño de la probeta
de 25.4 a 73.0 mm	25.4mm
mayor de 73.0 mm	73.0 mm

Limites de espesor

Espesor de probeta	Espesor calificado
menor de 9.5 mm	de 1.6 mm a 2 t
menor de 9.5 mm	de 4.7 mm a 2 t

De acuerdo con los materiales considerados en la fabricación y montaje de tubería se proponen los siguientes electrodos (ver Tabla 11.2).

Tabla 11.2

PROCESO SOLDADURA	MATERIAL BASE ASTM	MATERIAL APORTE AWS	GRUPO F. ASME
SMAW	A-36	E6010	3
	A-53	E6010	3
	A-283	E6010	3
	A-570	E6010	3
	A-572	E7018	4
	Gr-B	E6010	3
	X-42	E6010	3
	X-52	E7018	4
	X-65	E8018-C	4
SAW	A-36	F6AZEM1 SK	6
	A-53	F6AZEMI SK	6
	A-283	F6AZEM1 SK	6
	A-570	F6AZEMI SK	6
	A-572	F7AZEM15K	6
	Gr-B	F6AZEM 12 K	6
	X-42	F6AZEM 12 K	6
	X-52	F7AZEM 12 K	6
	X-65	FBAZEMI3K	6
GMAW	A-36	E60S-2	6
	A-53	E60S-2	6
	A-2 83	E60S-2	6
	A-570	E60S-3	6
	A-5 72	E70S-3	6
	Gr-B	E60S-2	6
	X-42	E60S-2	6
	X-52	E70S-2	6
	X-65	E80C-Ni 1	6

La agrupación anterior nos indica que los metales base o de aporte dentro de un grupo, no pueden ser sustituidos indiscriminadamente por otros materiales, sin recurrir a las pruebas de calificación. Sin embargo, se pueden realizar combinaciones de materiales de aporte, donde se usan electrodos de alta penetración y electrodos de alta resistencia, con el fin de aumentar la calidad de la unión; lo anterior deberá estar indicado claramente en el EPS, por ejemplo: (E6010-E7018).

El diámetro y tipo de electrodo no deberá omitirse en el EPS., sin embargo, estas variables están en función del tipo de bisel seleccionado y del espesor de pared de la placa, por lo que no se indican en el presente estudio, debiendo seguirse las recomendaciones del fabricante de éstos.

Posiciones de soldeo

Para la elaboración de un procedimiento de soldadura, se debe especificar la posición en la que se va a aplicar el material de aporte, la cual deberá ser la misma

posición a usar durante la fabricación de las juntas de producción en taller y campo (incluyendo las que cubra dentro de los alcances de calificación).

Las posiciones para soldadura de filete y de ranura a tope se desglosan a continuación:

Soldaduras de filete:

I. En placa:

- a) Plana (1 F)
- b) Horizontal (2 F)
- c) Vertical (3 F)
- d). Sobre cabeza (4 F)

II. En tubería:

- a) Plana (1 F)
- b) Horizontal (2 F)
- c) Sobre cabeza (4 F)
- d) Múltiple (S F)

Soldaduras a tope:

I. En placa:

- a) Plana (1 G)
- b) Horizontal (2 G)
- c) Vertical (3 G)
- d) Sobre cabeza (4 G)

II. En tubería:

- a) Plana (1 G)
- b) Horizontal (2 G)
- c) Múltiple (5 G)
- d) Múltiple a $0.79 \text{ rad } (45^\circ)$ (6 G)
- f) Múltiple a $0.79 \text{ rad } (45^\circ)$ T,K,Y (6GR)

Cualquiera que sea la posición de aplicación de la soldadura ésta deberá ser especificada en el EPS, así mismo, es conveniente ilustrarlo esquemáticamente.

En las Figuras 11.6, 11.7, 11.8 y 11.9, se presentan los croquis con las posiciones indicadas anteriormente.

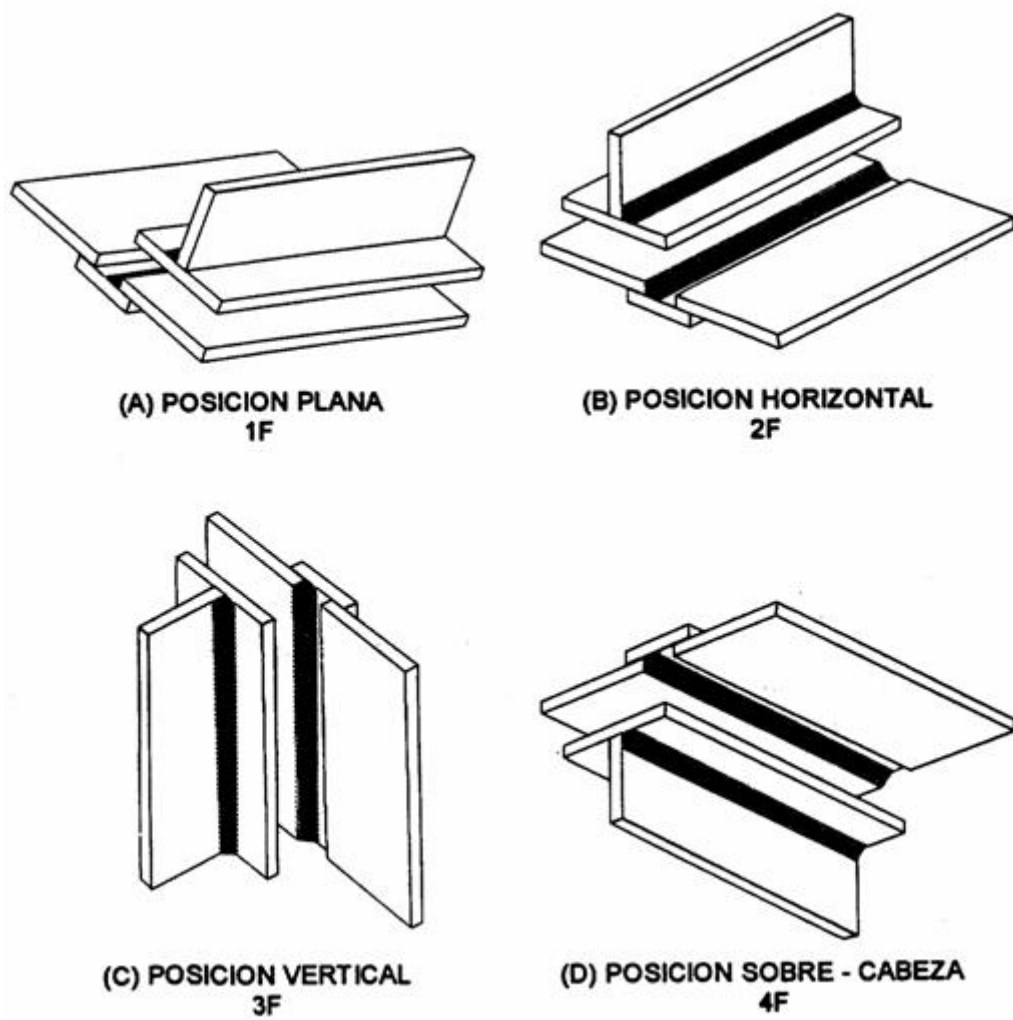


Figura 11.6 Soldadura de Filete en Placa

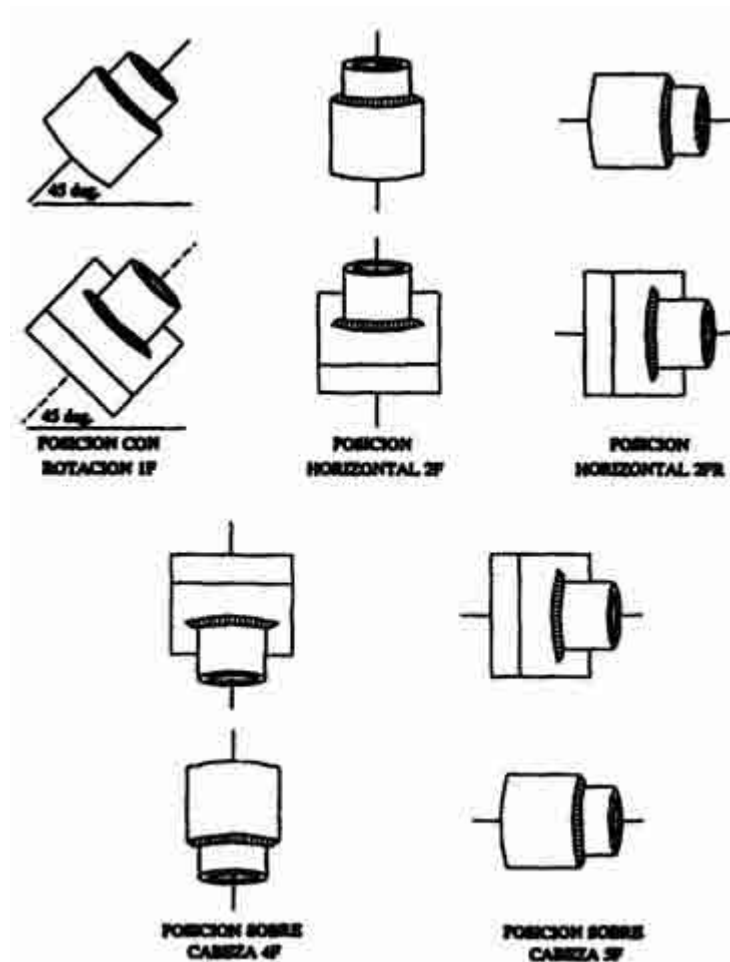


Figura 11.7 Soldadura de Filete en Tubería

Pre calentamiento

El pre calentamiento es la operación de someter a calentamiento los biseles y metal base adyacente del material que se va a soldar, previamente a cualquier depósito de soldadura. La finalidad es disminuir el gradiente térmico para mejorar las propiedades en la junta al evitar o reducir al menos alguna de las siguientes situaciones:

- La presencia de estructuras frágiles.
- La zona afectada por el calor.
- La distorsión en el ensamble.
- La presencia de hidrógeno en el depósito.

El pre calentamiento depende del espesor, de la composición química y de otros factores, sin embargo, en forma general se recomienda para los materiales contenidos en la Tabla 11.1, alcanzar al menos una temperatura de 1.14 rad (65.6 °C) para espesores hasta de 38.1 mm, sin tomar en cuenta el tipo de electrodo por usar.

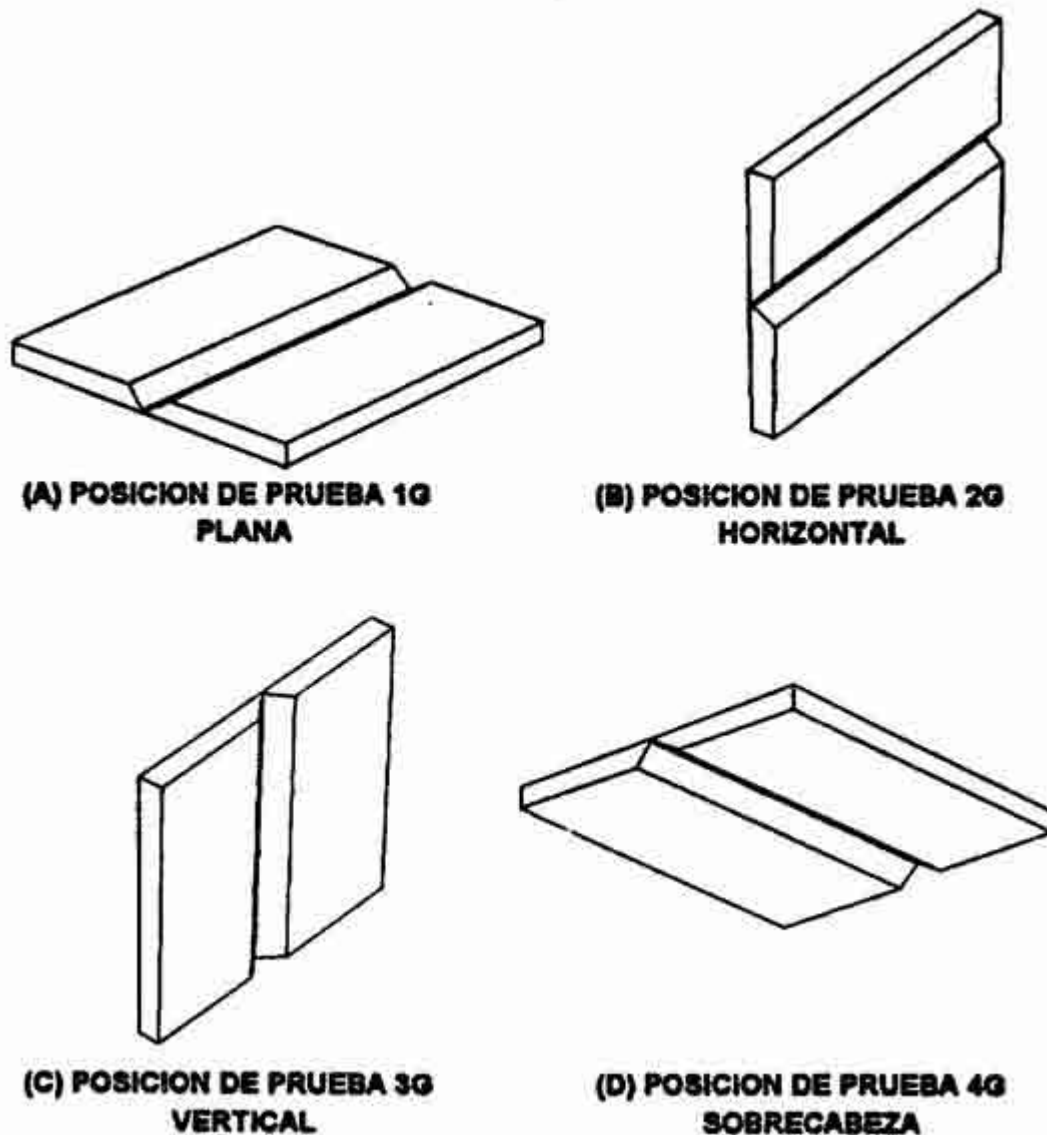


Figura 11.8 Soldadura a Tope en Placa

Tratamiento térmico posterior a la soldadura

En algunas ocasiones se requiere un tratamiento para aliviar los esfuerzos residuales producidos en la soldadura o bien para restituir las propiedades originales del metal en la junta soldada y zona afectada por el calor.

En el EPS invariablemente se deberán señalar los parámetros del tratamiento térmico posterior a la soldadura en caso de que éste sea requerido.

Para los materiales de la Tabla 11.1, el alivio de esfuerzos es necesario solo para espesores que sobrepasan 38.1 mm, y en forma práctica se recomienda llevar el material a una temperatura de 873.15 °K (600 °C) mínimo y mantenerlo a esa temperatura una hora por cada pulgada de sección. Precauciones adicionales

deberán ser tomadas en el caso de los aceros microaleados por ejemplo aceros API de alta resistencia, aceros de baja aleación, aceros borados, etc. ya que ahí será necesario evaluar mediante pruebas de calificación y desde el punto de vista metalúrgico si es requerido además del precalentamiento, el control de temperatura entre pesos y/o el tratamiento térmico posterior a la soldadura.

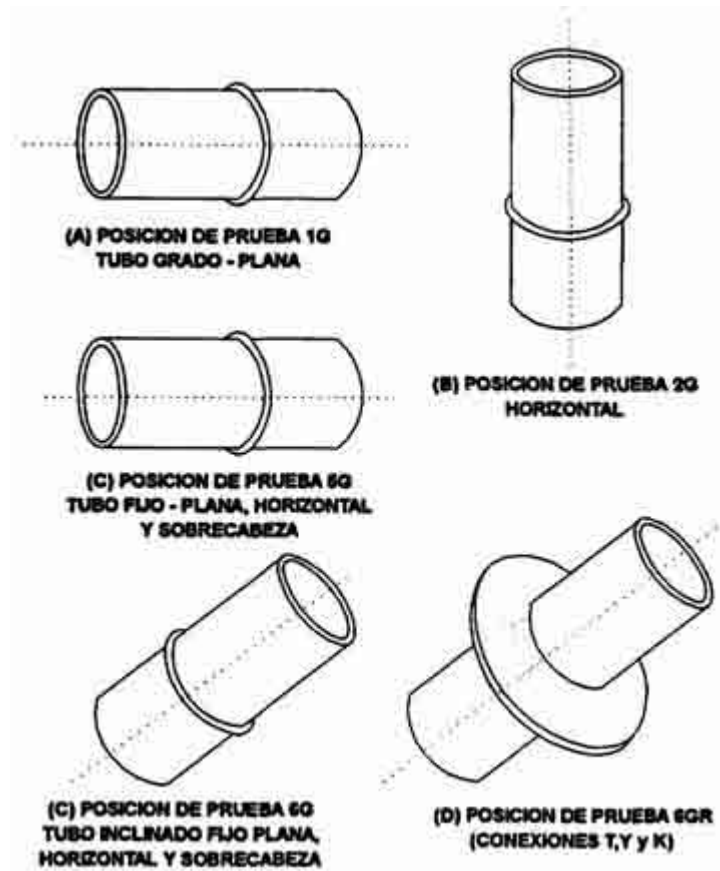


Figura 11.9 Soldaduras a Tope en Tubería

Los parámetros de control para un tratamiento térmico de este tipo son como mínimo:

- a) La velocidad de calentamiento.
- b) La temperatura máxima del tratamiento.
- e) El tiempo de tratamiento.
- d) La velocidad de enfriamiento.

Composición del gas de protección

Para los procesos SMAW (Arco Eléctrico Manual con Electrodo Revestido), SAW (Arco Eléctrico Sumergido), el gas de protección es suministrado por el fundente del revestimiento y de la capa protectora respectivamente.

En el caso del proceso SAW (Soldadura de Arco Sumergido), la especificación del procedimiento de soldadura requiere que se mencione el tipo de fundente que será empleado.

En el caso del proceso GMAW (Arco Eléctrico Metálico con Protección de Gas), la composición del gas es un aspecto relevante y en el EPS se deberá definir claramente el modo de transferencia del metal de aporte ya que esto es compatible con el tipo de atmósfera de protección.

Los consumibles de la soldadura son los indicados en la Tabla 11.2 y los tipos de transferencia son cuatro de acuerdo a la Sociedad Americana de Soldadura.

En la Tabla 11.3 se presentan las composiciones de gas o gases de protección compatibles con el tipo de transferencia para el proceso GMAW.

Tabla 11.3

TIPO DE TRANSFERENCIA	COMPOSICIÓN DEL GAS O GASES
Spray	Argón 2 a 5% Oxígeno)
Spray pulsado	Argón (2 a 59b Oxígeno)
Globular	Bióxido de Carbono
Corto circuito	Bióxido de Carbono 0 Argón (50 a 80%)-Bióxido de carbono

Características eléctricas

El voltaje (V), el tipo de corriente (DC/AC) y amperaje (A), así como la polaridad (\pm) con que se usarán los consumibles de la soldadura se debe de incluir en el EPS. Estas variables fijan las características del depósito en cuanto a velocidad de pasada, penetración, estabilidad del arco, energía de ingreso, etc., y por lo tanto las propiedades del mismo, por lo que se deberá indicar claramente los intervalos a usar en el procedimiento.

Es importante seguir las recomendaciones del fabricante de electrodos, ya que éstas están basadas en pruebas realizadas para cada tipo de electrodo, varilla de aporte, clase de revestimiento, diámetro, etc.

Técnicas de soldeo

Aquí se consideran detalles del procedimiento de soldadura que no son esenciales ya que por su naturaleza cualquier cambio no afectaría las propiedades mecánicas de la unión soldada. Algunas de ellas se refieren a los métodos de limpieza, dirección de soldeo, tipo de oscilación de electrodo, longitud de arco, etc., no obstante, en el EPS deberán subrayarse para referencia del inspector.

11.2. CALIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTOS

11.2.1. Calificación de procedimiento de soldadura para la fabricación de tubería en taller y para el montaje de tubería en campo

La calificación del EPS, es decir el registro de calificación del procedimiento de soldadura (RCP), deberá reportar el tipo y número de pruebas de calificación, así como los resultados de la evaluación de las pruebas destructivas y no destructivas empleadas en la fabricación.

En el caso concreto de los materiales considerados en la Tabla 11.1 se tienen sólo aleaciones de acero al carbono y para elaborar el registro de calificación de procedimiento (RCP) se tomarán como referencia los lineamientos del Código ASME Sección 9, para la manufactura de tubería en taller, quedando la especificación API 1104 exclusivamente para la evaluación de montaje en campo.

A continuación se presenta un cuadro resumen adaptado de QW 451.1 de ASME, en donde se muestran los alcances de calificación, el tipo y número de pruebas para diferentes espesores de metal base.

Las dimensiones de las probetas para la calificación del procedimiento se muestran en las Figuras 11.10 a 11.14.

Ensayos para la calificación del procedimiento de soldadura para la fabricación en taller y montaje de tubería en campo.

Tabla 11.4

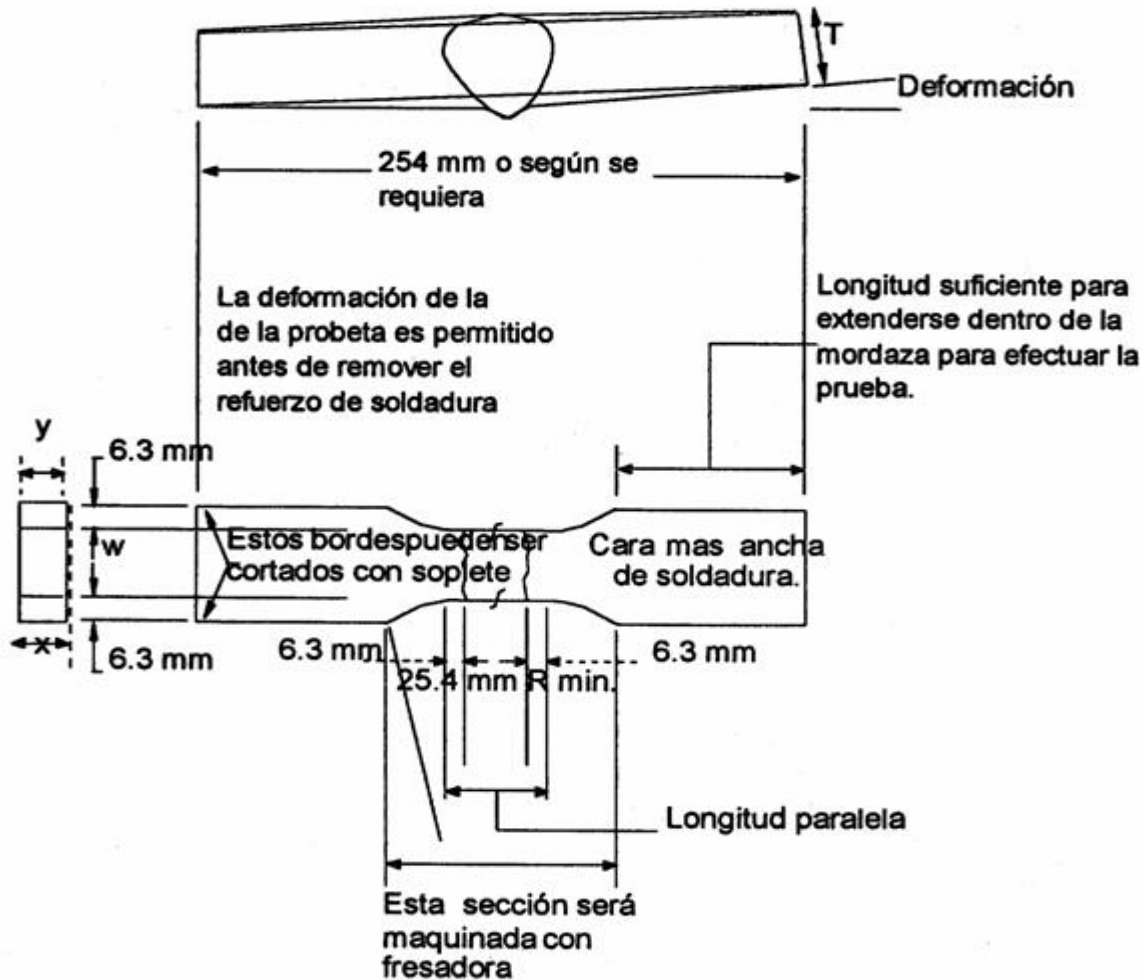
ESPESORES HASTA 19 mm	Se requieren 2 probetas de tensión 4 probetas de doblez (2 cara y 2 raíz) y es válida la calificación del mismo material hasta para dos veces el espesor.
ESPESORES > DE 19 mm	Se requieren 2 probetas de tensión 4 probetas de doblez lateral Se califica hasta 203.2 mm (8") de espesor. NOTA: Para procesos multipasos SMAW, SAW, GMAW, y si la placa no recibe tratamiento térmico posterior a la soldadura a una temperatura mayor de 1,036.15 °K (763°C).

11.2.2. Criterios de aceptación de las pruebas para calificación de procedimiento de soldadura de tubería en taller y campo

Prueba de resistencia a la tracción: Si la probeta rompe en soldadura, el esfuerzo deberá ser igual o mayor que la resistencia a la tensión del metal base. Si la probeta rompe fuera de la línea de fusión o soldadura se permite que ocurra a un esfuerzo de hasta 95 % de la resistencia a la tracción del metal base.

Prueba de doblez (cara o raíz): Se permiten defectos en la superficie convexa de la soldadura cuya dimensión no exceda de 3.1 mm Para evaluar la probeta la soldadura

y la zona afectada por el calor deberán estar dentro del área doblada. Si se presentan fracturas en las esquinas de las probetas que ocurran como resultado de defectos evidentes en la soldadura tal como escoria o a otros defectos internos la probeta se considera inaceptable. Si el procedimiento calificado requiere algún cambio en las variables esenciales, entonces se requiere también una nueva calificación con los nuevos valores o cambios en esas variables, las siguientes son consideradas variables esenciales:



x = Espesor del cupón incluyendo el refuerzo

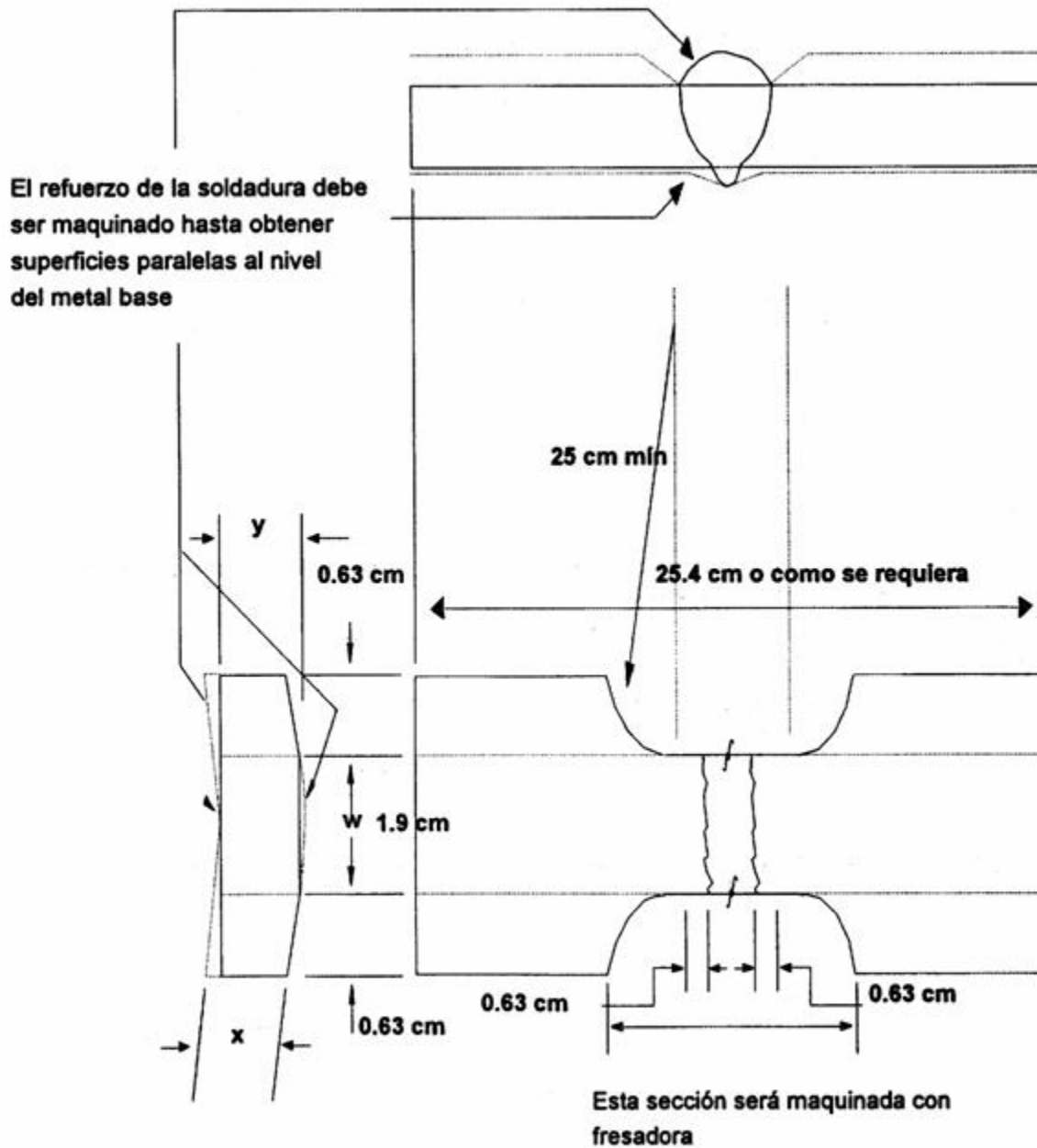
y = Espesor de la probeta

T = Espesor del cupón sin refuerzo

w = Espesor de la probeta 19 mm

QW-462.1(a) TENSION-SECCION REDUCIDA-PLACA

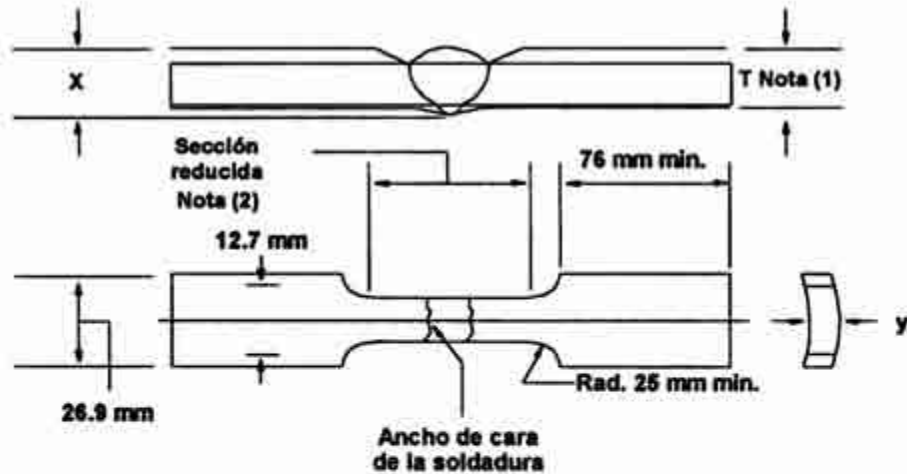
Figura 11.10 Probeta de tensión sección reducida - placa



x = Espesor del cupón incluyendo el refuerzo

y = Espesor de la probeta

Figura 11.11 Probeta de tensión sección reducción tubería



NOTAS:

- 1) El refuerzo de la soldadura deberá ser maquinado, sin exceder de espesor de pared del metal base t . el maquinado deberá dejar caras paralelas.
- 2) la sección reducida no deberá ser menor que la de la soldadura más $2y$.

x = Espesor del cupón incluyendo el refuerzo
 y = Espesor de la probeta
 T = Espesor del cupón sin refuerzo

Figura 11.12 Prueba alternativa de tensión de sección reducida para la tubería

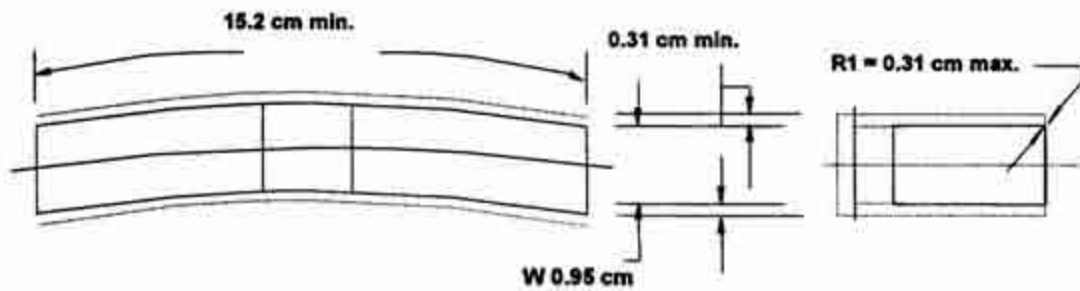


Figura 11.13 Dimensiones de las pruebas de dobles

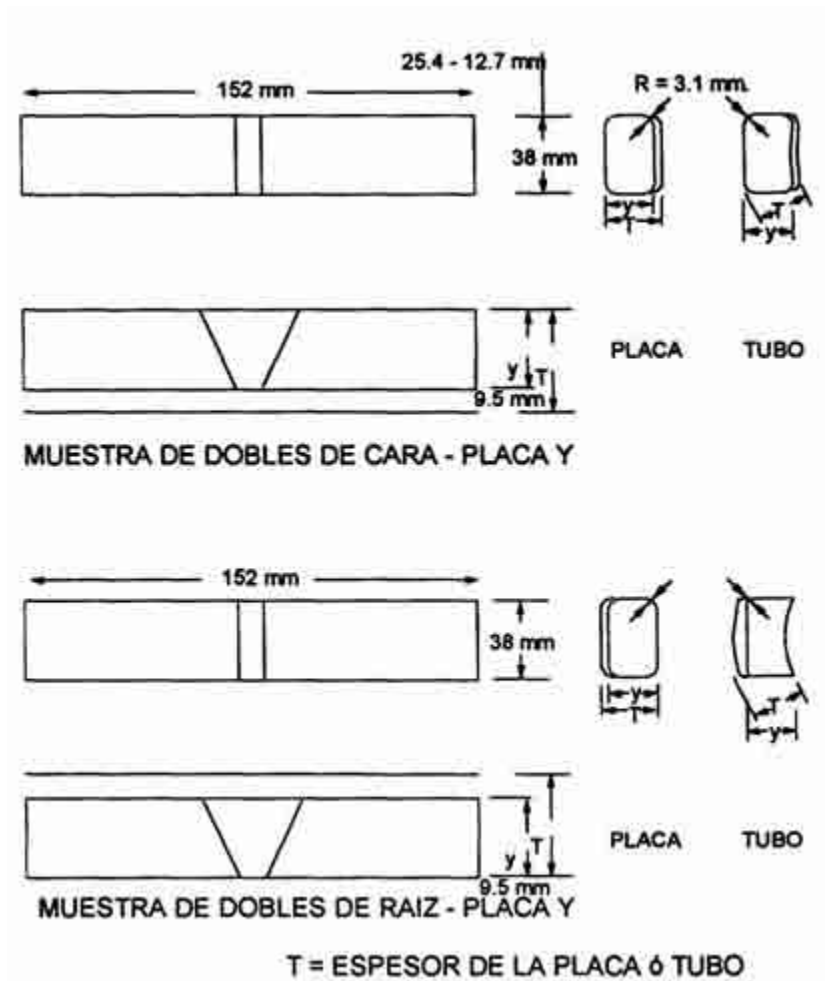


Figura 11.14 Dimensiones de las probetas de doblez transversal en cara y raíz

- a) Cambio en el proceso de soldadura.
- b) Cambio de material base en función de su resistencia a la cadencia.

Grupo I hasta	290 MPa (2,952.9 kg/cm ²).
Grupo II entre	290 MPa y 448 MPa (2,952.9 y 4,570.0 kg/cm ²).
Grupo III mayor de	448 MPa (4,570.0 kg/cm ²).
- c) Cambio en el diseño de la junta.
- d) Cambio de posición fija a rotada.
- e) Cambio de espesor de pared.
- f) Cambio del metal de aporte.
- g) Cambio del tiempo entre pesos.
- h) Cambio en la dirección de la soldadura.
- i) Cambio en la velocidad del flujo de gas de protección.

11.3. CALIFICACIÓN DE SOLDADORES

Una vez que el procedimiento ha sido calificado, es necesario calificar a los soldadores que lo emplearán durante la producción. El objetivo primordial, es determinar si los soldadores poseen suficiente habilidad para producir soldaduras satisfactorias usando el procedimiento calificado.

Las pruebas de calificación de soldadores, están diseñadas para verificar la habilidad manual del soldador para el proceso SMAW y habilidad para operar una máquina de soldar en el caso de los procesos automáticos o semiautomáticos (SAW, GMAW).

11.3.1. Calificación de soldadores para tubería de producción en taller (ASME Sección 9)

Cada soldador, deberá calificarse con base en la utilización de un procedimiento de soldadura previamente calificado, y las probetas de prueba para el soldador deberán ser marcadas con un número codificado para su identificación.

Las variables esenciales para la calificación del soldador en los procesos SMAW, SAW, GMAW, están indicadas en forma específica en QW-416 de ASME Sección 9, sin embargo, para pronta referencia se pueden considerar las siguientes:

El diámetro del tubo, el número "P" del material base, el espesor del metal de depósito de la soldadura, la posición en que se deposita la soldadura (los límites se muestran en QW-461.9 de ASME Sección 9), Tabla 11.5.

Tabla 11.5 Desempeño calificado - limitaciones de posición y diámetro posición y tipo de soldadura calificada [Nota (1)]

	RANURA		FILETE
Posición	Placa y Tubo Por Encima De 61 cm. D.E.	Tubo Menor a 61 cm. D.E.	Placa y Tubo
Soldadura Placa-Ranura			
1 G	F	F [Nota (2)]	F
2G	F H	F, H [Nota (2)]	F, H
3 G	F V	F, V [Nota (2)]	F, H, V
4G	F O	F, O [Nota (2)]	F, H, O
3G Y 4G	F V O	F [Nota (2)]	Todos
2G 3G Y 4G	Todos	F, H [Nota (2)]	Todos
Placa-Filete			
1 F			F [Nota (2)]
2F			F,H [Nota (2)]
3 F			F, H, V [Nota (2)]
4F			F, H, O [Nota (2)]
3F Y 4F			Todos [Nota (2)]
Tubo-Ranura			
1G	F	F	F
2G	F, H	F,H	F, H
5G	F, V, O	F, V, O	Todos
6G	Todos	Todos	Todos
2G Y 5G	Todos	Todos	Todos
Tubo-Filete			
1F			F
2F			F, H
3FR			F, H
4F			F, H, O
5 F			Todos

Notas:

- (1) Posiciones de soldadura
 F = Plana
 H = Horizontal
 V = Vertical
 O = Sobre cabeza

- (2) Tubería de diámetro exterior mayor a 73 mm.

Ensayos para la calificación de soldadores para la fabricación de tubería.

La calificación de los soldadores puede realizarse mediante el empleo de las pruebas de dobléz o de un estudio radiográfico, como se describes a continuación:

a) Prueba de dobles:

Espesores en metal base hasta 19 mm.	Se requieren 2 probetas de doblez (1 carta y 1 raíz). Se califica 2 veces el espesor del depósito de soldadura.
Espesores en metal base mayores de 19 mm.	Se requieren 2 pruebas de doblez lateral. Se califican todos los espesores.

b) Estudio radiográfico:

Para realizar la calificación mediante esta técnica, se deberá efectuar este estudio en una longitud mínima de 304.8 mm. de la unión circunferencial de la tubería en campo.

11.3.2. Criterios de aceptación de las pruebas para calificación de soldadores en taller y campo

Prueba de doblez (lateral, cara o raíz): Se permiten defectos en la superficie convexa de la soldadura cuya dimensión no exceda 3.1 mm Para evaluar la probeta la soldadura y la zona afectada por el calor. Deberán estar dentro del área doblada. Si se presentan fracturas en los bordes de las probetas, que ocurran por defectos evidentes en la soldadura, tales como escoria a otros defectos internos la probeta se considera inaceptable.

Estudio Radiográfico:

- a) No se permiten fracturas, penetración y fusión incompleta.
 b) No se permiten inclusiones de escoria aisladas mayores a:

3 mm	para	$t < 9 \text{ mm}$
$1/3t$	para	$9 \text{ mm} < t < 57 \text{ mm}$
19 mm	para	$t > 57 \text{ mm}$

c) No se aceptan grupos de inclusiones de escoria en línea donde la suma de las longitudes sea mayor a t en $12t$, excepto si existe una separación mayor de $6L$ (L = Longitud máxima de la escoria).

- No se permiten indicaciones redondeadas cuya dimensión sea mayor al $20\%t$ ó 3.1 mm.
- Las señales menores de 0.7 mm no se consideran indicaciones redondeadas.
- Para espesores de pared mayores de 3 mm, se recomienda consultar las cartas de porosidad del Código ASME Sección 9.

La recalificación de un soldador será necesario sólo si se modifican variables esenciales del procedimiento con el que califica o si dejase de laborar por un período mayor de 6 meses.

11.4. EVALUACIÓN DE UNIONES DE PRODUCCIÓN EN TALLER Y EN CAMPO

Una vez definido y calificado el procedimiento de soldadura, nos auxiliará para realizar la evaluación (inspección) de las juntas de producción (en taller), con el fin de garantizar la calidad de las uniones, para tal efecto se realizan una serie de pruebas mecánicas que indican la aceptación o rechazo de acuerdo con los resultados.

En el caso concreto de los materiales considerados en la Tabla 11.1 se deberán realizar las pruebas que marcan los lineamientos de la parte QW151, 160 y 171 Código ASME Sección 9.

11.4.1. Ensayos para la evaluación de las uniones de producción en taller

Prueba de resistencia a la tracción: Durante la manufactura de la tubería, se deberá realizar una prueba de tracción en metal base por cada colada que se utilice; y otra prueba en soldadura por cada 100 tramos de tubos fabricados.

Prueba de doblez guiado: Durante la fabricación de tubería, se deberá realizar dos pruebas de doblez guiado (1 cara y 1 raíz), la frecuencia para la realización de dichas pruebas es una ocasión por cada 100 tramos de tubería.

Prueba de impacto (Charpy): Aunque en el caso de tubería de conducción de agua no es requisito este ensayo, su ejecución dependerá en algún caso extraordinario de diseño, y deberá estar considerado en la orden de compra, para poder exigir su realización al fabricante, indicando la frecuencia con la que deberá realizarse.

Examinación no destructiva: Para los procesos SMAW (Arco Eléctrico Manual Sumergido), SAW (Arco Eléctrico Sumergido) y GMAW (Arco Eléctrico Metálico con Protección de Gas), se recomienda una inspección radiográfica al 100%, o como alternativa, al menos 203.2 mm (8") de longitud de soldadura en los extremos de la tubería, si el resto es inspeccionada por el método de ultrasonido.

Es importante hacer notar que la inspección radiográfica en extremos de tubería y en cruces de soldadura no deberá de omitirse por ningún motivo, ya que éstos son sectores que son factibles de presentar defectos rechazables, lo anterior aplica para tuberías con costura helicoidal o longitudinal.

Inspección visual: Deberá presentar una buena apariencia superficial, donde todos los defectos de la pared del tubo deberán ser evaluados dimensionalmente con el fin de determinar si son aceptados o rechazados, ya sea parcial o totalmente; de acuerdo con los parámetros siguientes:

IDENTACIONES: Deberán ser menores al 12.5% del espesor de pared.

DIAMETRO: No deberá exceder más del 1% de lo especificado.

Prueba Hidrostática: Cada tramo de tubería deberá ser probada hidrostáticamente, a una presión que estará determinada en función del diámetro del tubo, su espesor de pared y la resistencia del material, la cual deberá calcularse de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P_{\min} = 2f_t t / d_e$$

donde:

- P_{\min} es la presión hidrostática mínima (MPa)
- t es el espesor de la tubería (mm)
- d_e es el diámetro exterior de la tubería (mm)
- f_t es el esfuerzo mínimo de tensión del material (MPa)

Esta prueba tiene por objetivo verificar que el material no presente deformaciones por cadencia del material, así como corroborar la ausencia de fugas a través de la soldadura.

11.4.2. Criterios de aceptación de uniones de producción en taller

En lo referente a las pruebas de tensión, ésta deberá cumplir con los siguientes requisitos:

- a) Obtener como mínimo una resistencia a la tensión igual a la del material base, si la ruptura es en soldadura.
- b) Si la muestra de prueba rompa en el metal base deberá de tener al menos el 95% del esfuerzo especificado para poder ser aceptado.

Prueba de doblez guiado: Se considera inaceptable cualquier defecto que exceda de 3.1 mm o la mitad del espesor, lo que sea menor, evaluando en soldadura y zona de fusión.

Las fracturas en metal base de hasta 6 mm no se consideran relevantes a menos que se detecta por inspección visual que proceden de defectos obvios de soldadura:

Prueba de sanidad: En el caso ale que esta prueba sea solicitada el área expuesta será cuando menos 19 mm y son inaceptables los poros > 1.5 mm ó 296 del área expuesta, inclusiones de escoria > 0.7 mm en profundidad ó 3.1 mm en longitud; debiendo existir 12.7 mm de metal sano entre discontinuidades adyacentes.

Prueba de radiografía: No se permiten roturas, penetración ó fusión incompleta, ni inclusiones de escoria aisladas mayores a:

3 mm	para	$t < 9$ mm
$1/3t$	para	$9 \text{ mm} < t < 57$ mm

19 mm para $t > 57$ mm

En lo concerniente a indicaciones redondeadas, la máxima dimensión permisible será de 3.1 mm ó 20% t, lo que sea menor, no excediéndose de doce indicaciones en 152.4 mm de soldadura; para materiales con espesor de pared > 3.1 mm se deberán usar el anexo I para evaluar la distribución y dimensiones aceptables.

Inspección visual: No se permiten hendiduras mayores a 6 mm de longitud y 0.7 mm de profundidad, o el 12.5 % del espesor de pared. Así mismo no deben existir más de don indicaciones en 304.8 mm de soldadura.

Prueba hidrostática: No deben observarse deformaciones del material base, fugas, goteos o sudoraciones durante la realización de dicha prueba, de observarse alguna fuga en el tubo éste deberá ser rechazado, debiéndose reparar, inspeccionar y probar nuevamente.

11.4.3. Ensayos para la evaluación de uniones de campo

Se debe realizar un estudio radiográfico, a fin de verificar la sanidad de las uniones soldadas y así garantizar la calidad de los trabajos de montaje de tubería.

Es importante hacer notar que se pueden manejar distintos grados de inspección si se toman en cuenta las consideraciones de la Tabla 11.6.

Se toma como base del 100 de radiografiado, el total estimado de metros lineales de soldadura que se requieren aplicar para el proyecto.

Estos criterios se deberán aplicar considerando que las indicaciones detectadas no corresponden a faltas de fusión, fisuras, fracturas a otros defectos críticos.

Tabla 11.6 Criterios de inspección radiográfica

AVANCE DE OBRA (%)	PORCENTAJE DE INSPECCION
0-10	100% Radiografiado
10-20	Menos de 5% de rechazo del 100% reducir radiografiado al 50% Más de 5% de rechazo del 100% Aumentar radiografiado al 70% Más de 5% de rechazo del 70% Aumentar radiografiado al 100%
20 EN ADELANTE	Menos de 5% de rechazo del 50% reducir radiografiado al 30% Más de 5% de rechazo del 50% aumentar radiografiado a] 60% Más de 5% de rechazo del 60% aumentar radiografiado al 80% Más de 5% de rechazo del 80% aumentar radiografiado al 100%

11.4.4. Criterios de aceptación de uniones de campo

Los criterios de calificación de soldaduras de campo son en su mayoría los establecidos por el Código API 1104, como se muestran en la Tabla 11.7

Tabla 11.7

TIPO DE DEFECTO	DIMENSIÓN MÁXIMA	SUMA MÁXIMA
	ACEPTABLE	ACEPTABLE EN 304 mm
		DE SOLDADURA
Roturas	No aceptable	No aceptable
Falta de fusión (F.F.)	No aceptable	No aceptable
Falta de penetración (F.F.)	25.4 mm de longitud	25.4 mm ó el 8% de la longitud de la soldadura
Falta de penetración por desalineamiento (F.F.D.L.)	50.8 mm de longitud	76 mm de longitud
inclusión de escoria (I.E.)	3 mm de ancho	12 mm no más de 4 y/o 8% de la longitud de la Soldadura
Línea de escoria (L.E.)	50.8 mm de longitud y 1.5 mm de ancho	50.8 mm ó 8% de la longitud de soldadura
Porosidad esférica (P)	3 mm ó 25% de t	densidad cartas de API 11.04
Porosidad en grupo	12 mm del diámetro del grupo. 1.5 mm de diámetro de cada poro	12 mm suma de diámetros del grupo de Poros
Poro túnel (P.T.)	12 mm con Separación de 50.8 mm si están adyacentes	25.4 mm ó 8% de la longitud de la soldadura
Quemada (Q)	No más de 25.4 mm. de 6 mm ó t.	
Socavado (S)		0.3 mm de prof. en cualquier longitud. 0.3 mm - 0.7 mm hasta 50.8 mm. de longitud.

Aclaración de discontinuidades: Es inaceptable la acumulación mayor a 50.8 mm en 304.8 mm de soldadura o el 8% de su longitud.

(Ver código API 1104 Sección 6 para caracterizar defectos).

12. INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO

12.1. GENERALIDADES

Con el propósito de mantener la integridad del sistema de líneas de transporte de agua, la dependencia encargada de su operación debe cumplir con lo siguiente:

- a) Tener un programa de inspección y mantenimiento periódico para detectar y reparar las posibles anomalías que se presenten en el sistema de líneas de conducción de agua. Este programa debe contemplar entre otros puntos, el recorrido y vigilancia del derecho de vía e instalaciones, elaboración de reportes de inspección y mantenimiento periódicos de todo el sistema, especialmente en la cercanía de áreas industriales, residenciales, y en las estaciones donde labore personal de operación, a fin de prevenir posibles daños a personal, terceras personas, tuberías o instalaciones ajenas.
- b) Establecer procedimientos de trabajo por escrito para el personal encargado de llevar a cabo las tareas de inspección y mantenimiento del sistema de tubería.
- c) Tener un plan de contingencia por escrito, para aplicarlo en caso de falla del sistema, accidentes, sismo e incendio, y familiarizar a los trabajadores con las acciones a tomar.

12.2. INSPECCIÓN

El objetivo principal de la inspección en los sistemas de tuberías de transporte de agua, es detectar posibles anomalías en los diversos componentes del sistema, tales como:

- Derecho de vía
- Espesor de tubería
- Pintura anticorrosiva
- Recubrimiento anticorrosivo
- Sistema de Protección Catódica
- Dispositivos de seguridad y control
- Cruces

El sistema de líneas de conducción de agua se inspeccionará siguiendo los procedimientos que se indican a continuación:

- Inspección visual del derecho de vía
- Medición de espesores en puntos discretos en la tubería
- Inspección de pintura anticorrosiva
- Inspección del recubrimiento anticorrosivo
- Inspección del Sistema de Protección Catódica
- Inspección de dispositivos de seguridad y control
- Inspección de cruces

12.2.1. Inspección visual del derecho de vía

El derecho de vía debe ser inspeccionado en forma visual, por lo menos cada semana, realizando un recorrido en vehículo, en zonas no accesibles a pie, a fin de detectar posibles daños a la tubería superficial, como pueden ser; abolladuras por golpes, muescas o rayones, pintura anticorrosiva en mal estado, vandalismo, estado de válvulas y fugas. En el caso de tubería enterrada detección de posibles fugas, deslave de suelo y construcción de estructuras ajenas. También debe prestarse especial atención a actividades tales como construcción de vías de ferrocarril, caminos, invasiones y excavaciones realizadas por terceras personas dentro del derecho de vía.

12.2.2. Medición de espesores en puntos discretos

Como consecuencia de posible corrosión interna, externa o erosión, las tuberías que conducen agua pueden sufrir disminución en su espesor de pared; para el caso de tubería superficial, se debe llevar a cabo la inspección de espesores, por lo menos cada año, y un registro estadístico de los mismos.

Se recomienda realizar medición de espesores en tuberías superficiales en los siguientes puntos

- a) Codos
- b) Aguas abajo en válvulas
- c) Aguas abajo en cualquier dispositivo que produzca turbulencia, tales como accesorios de refuerzo para derivaciones, bridas, tees, etc.
- d) En zonas bajas donde se pueda tener acumulación de sólidos
- e) En zonas de pendiente pronunciada

Una vez seleccionados los puntos de medición, los espesores se deberán medir siempre en los mismos puntos, con la finalidad de tener puntos de referencia y poder evaluar en forma aproximada la velocidad de corrosión.

Para el caso de tuberías enterradas, la medición de espesores se efectuará cuando se tenga evidencia de que la protección catódica no esta funcionando correctamente, y que el recubrimiento anticorrosivo, se encuentra en mal estado, para lo cual se realizarán excavaciones en los puntos de mayor susceptibilidad a la corrosión interna/externa, como pueden ser los que se indican a continuación:

- a) Zonas con potenciales tubo-suelo menores que el potencial de protección (-850 mV de acuerdo con la celda de cobre-sulfato de cobre).
- b) Zonas de suelo de baja resistividad menor de 5000 Ohms-cm
- c) En zonas bajas donde se pueda tener acumulación de sólidos

12.2.2.1. Medición de espesores con ultrasonido

El espesor de pared de las tuberías que conducen agua, se puede disminuir por varias razones, lo cual es detectado por medio de ultrasonido, es decir, mediante el empleo de un equipo de ultrasonido comercial, provisto con un transductor que genere ondas longitudinales o normales, las cuales penetran dentro de la pared del tubo hasta llegar a la pared interna del mismo, donde son reflejadas hacia el mismo transductor, registrándose en el equipo el tiempo total de viaje de las ondas de ultrasonido.

La velocidad del sonido en el acero es un valor conocido, y en función del tiempo total de viaje, se puede calcular el espesor de la tubería con la fórmula 12.1, que se muestra a continuación:

$$t_m = \frac{v}{2t} \quad (12.1)$$

donde:

- t_m es el espesor medido
- t es el tiempo total de viaje de las ondas de ultrasonido
- v es la velocidad del sonido en el acero

El cálculo lo realiza automáticamente el equipo de ultrasonido, proporcionando una lectura digital del espesor medido.

12.2.3. Inspección de la pintura anticorrosiva

Cuando menos cada seis meses la pintura anticorrosiva debe ser inspeccionada visualmente, con objeto de detectar posibles zonas con problemas de desprendimiento de película de pintura.

12.2.4. Inspección del recubrimiento anticorrosivo

La inspección del recubrimiento anticorrosivo de tuberías enterradas puede realizarse empleando equipo que mida el gradiente de voltaje alrededor de la tubería, este equipo detecta la variación en el gradiente de voltaje, cuando se tiene una zona dañada en el recubrimiento; la variación de la señal es proporcional a la magnitud de la zona desnuda.

Para aplicar esta técnica es necesario que la línea este protegida por medio de corriente impresa (ver Figura 12.1), ya que en el rectificador se instala un equipo que corta la corriente de salida con una frecuencia constante, generándose con esto una señal tipo rectangular de frecuencia y amplitud conocida, la cual es registrada por el equipo en las zonas donde el recubrimiento tiene zonas desnudas, estimándose de esta manera el área aproximada de la zona desnuda. La revisión del recubrimiento deberá, hacerse cuando menos cada seis meses.

12.2.4.1. Interfase entre suelo y aire

Cuando, una tubería enterrada sale a la superficie, la tubería puede sufrir corrosión externa en la parte de transición entre el tramo aéreo y enterrado (interfase suelo-aire).

Tanto, para tubería sin protección catódica, como para tuberías con protección catódica adecuada, que presenten evidencia de desprendimiento del recubrimiento anticorrosivo en la zona de interfase, es recomendable excavar, a fin de descubrir la zona corroída del tubo y proceder a realizar mediciones de espesores, para determinar el grado de corrosión, y aplicar nuevamente un recubrimiento anticorrosivo en esta zona.

12.2.5. Inspección del Sistema de Protección Catódica

Las líneas de conducción de agua enterradas, están generalmente protegidas por un recubrimiento anticorrosivo, suplementado con corriente impresa o inodos de sacrificio. Es importante que este sistema se inspeccione, cubriendo los puntos que a continuación se mencionan.

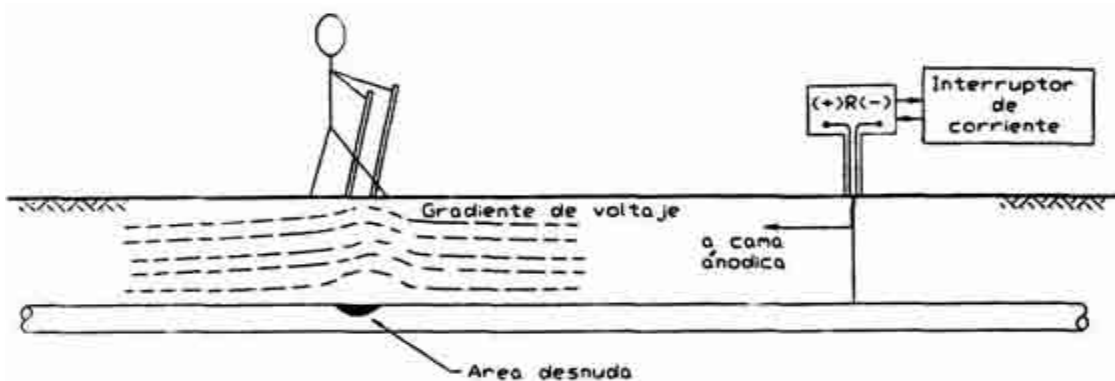


Figura 12.1 Arreglo para la inspección del recubrimiento anticorrosivo

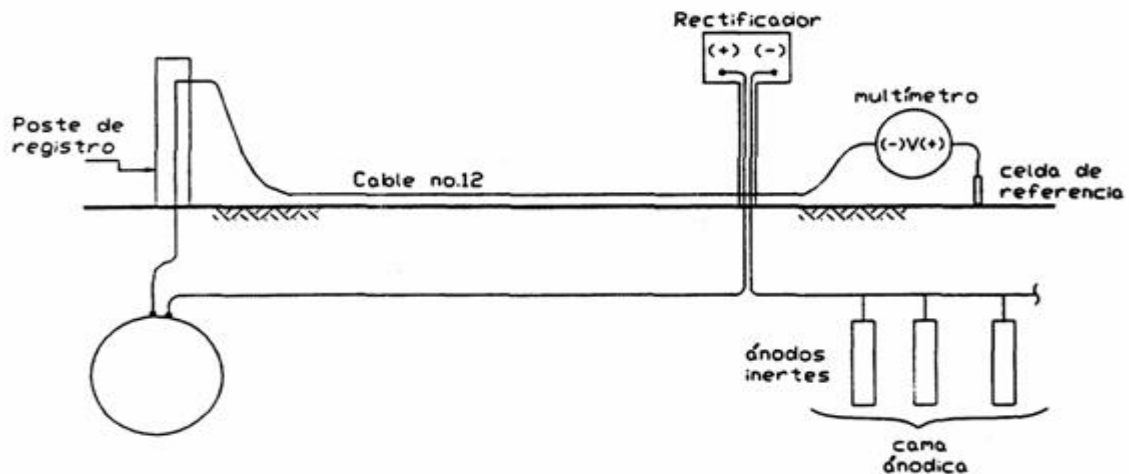


Figura 12.2 Arreglo para la inspección de capas anódicas

12.2.5.1. Inspección de rectificadores

Los rectificadores deben ser inspeccionados cada semana, registrándose el valor de la corriente directa, de salida (voltaje y amperaje), nivel de aceite (en caso de rectificadores, enfriados por aceite), eficiencia, estado de conexiones, fusibles, sistema a tierra, etc.

12.2.5.2. Inspección de las camas anódicas

Las camas anódicas deben ser inspeccionadas cada seis meses, mediante la medición de potenciales, con lo cual se puede detectar que ánodos de la cama anódica no están funcionando por posible rotura de cable.

El potencial se debe medir empleando un multímetro y celda de referencia de cobre/sulfato de cobre. Primero se conecta el cable de la terminal negativa del multímetro a la terminal del poste de registro y enseguida el cable de la terminal positiva del multímetro a la celda de referencia, la cual debe ser colocada exactamente encima del Ánodo a inspeccionar, ver Figura 12.2; en el caso de mal funcionamiento de un Ánodo, el potencial se encontrará muy por debajo del registrado para los demás ánodos.

12.2.5.3. Inspección de ánodos de sacrificio

Los ánodos de sacrificio se deben inspeccionar cada seis meses, mediante la medición de corriente de salida de los ánodos de sacrificio. Cabe mencionar que se puede determinar si un ánodo no está funcionando o si la corriente de salida está por debajo de su valor nominal (por posible desgaste excesivo).

El multímetro se conecta a las terminales de la resistencia calibrada en el poste de registro, como se observa en la Figura 12.3, midiéndose el voltaje entre las dos terminales del poste. La corriente de salida se calcula con la siguiente fórmula:

$$A = V/R \quad (12.2)$$

donde:

- A es la corriente (amperes)
- V es el voltaje medido (volts)
- R es la resistencia instalada en el poste de registro (ohms)

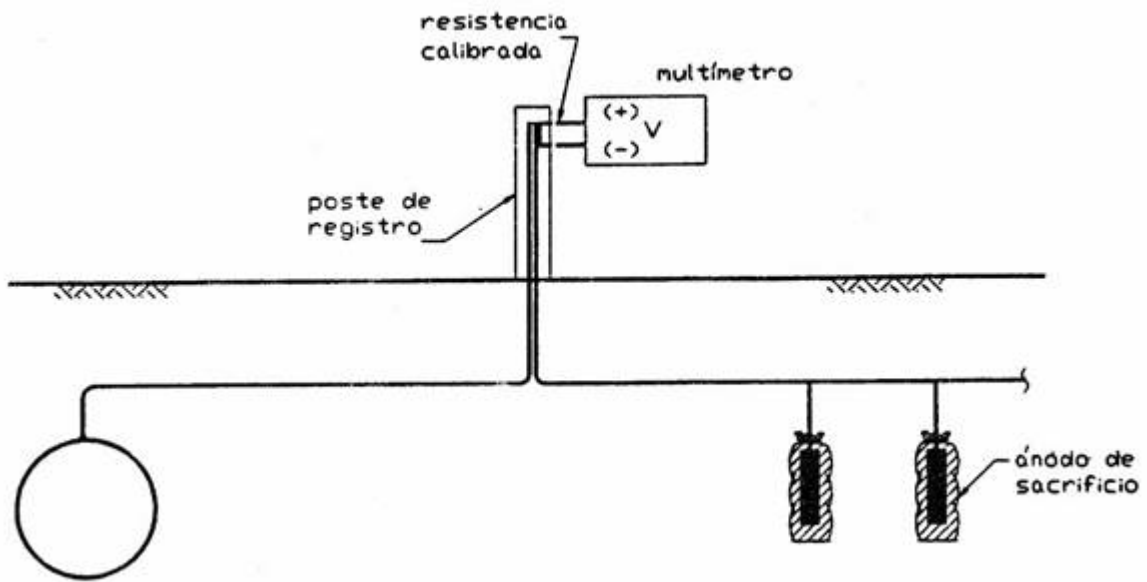


Figura 12.3 Arreglo para la medición de corriente de salida en una cama de ánodos de sacrificio

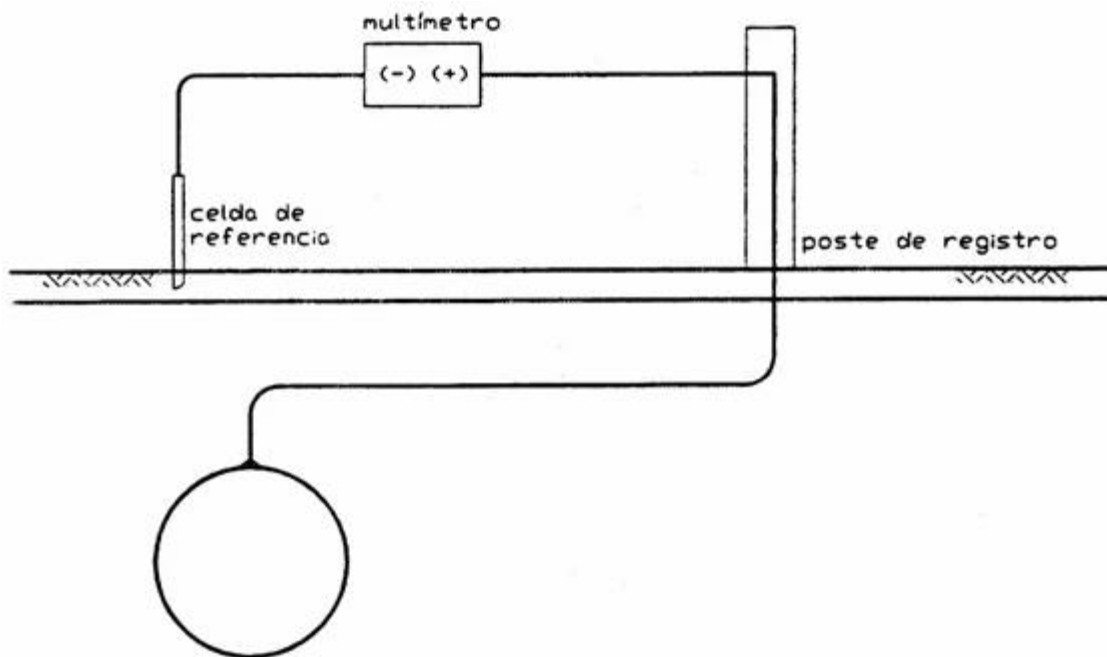


Figura 12.4 Medición de potencial tubo-suelo en postes de registro

12.2.5.4. Medición de potenciales tubo-suelo en puntos discretos

En las tuberías enterradas provistas con protección catódica, ya sea con corriente impresa o ánodos de sacrificio, se debe medir el potencial tubo-suelo cada seis meses. Estos potenciales se miden en los postes de registro instalados a lo largo de la tubería, los cuales se recomienda instalar cada 500 metros.

Los postes de registro están provistos con un cable que está unido directamente a la tubería, el cual se conecta a la terminal negativa de un multímetro, mientras que la terminal positiva del multímetro se conecta al cable de una celda de cobre/sulfato de cobre; por medio de este arreglo se mide el potencial que existe entre la tubería y el suelo, ver Figura 12.4.

Graficando los potenciales medidos en el eje de las ordenadas y el kilometraje de la tubería en el eje de las abscisas, se obtiene el perfil de potenciales tubo-suelo, el cual no deberá tener valores menores que -850 mV, en caso de que se presenten valores menores que el indicado anteriormente, se procederá a realizar mediciones de potenciales continuos tubo-suelo en esta zona.

12.2.5.5. Potenciales continuos tubo-suelo

Los potenciales continuos se miden empleando un cable de longitud suficiente (por ejemplo un carrete de cable del Numero 12 de 250 metros), conectado a la celda de cobre/sulfato de cobre, la cual se coloca sobre el eje de la tubería con una separación constante de aproximadamente de dos a cinco metros, midiéndose en cada punto el potencial tubo-suelo, al mismo tiempo, se mantiene conectado el carrete de cable a la terminal del poste de registro, ver Figura 12.5.

Estos valores de potenciales se grafican en el eje de las ordenadas, mientras, que el kilometraje se marca en el eje de las abscisas, obteniéndose una gráfica de potenciales continuos tubo-suelo.

12.2.6. Inspección de dispositivos de seguridad y control

Las válvulas de admisión y expulsión de aire, deberán inspeccionarse diariamente. Otros dispositivos de seguridad y control como son: válvulas de altitud, torres de oscilación, tanques unidireccionales, etc., deberán inspeccionarse por lo menos una vez al mes para determinar sí:

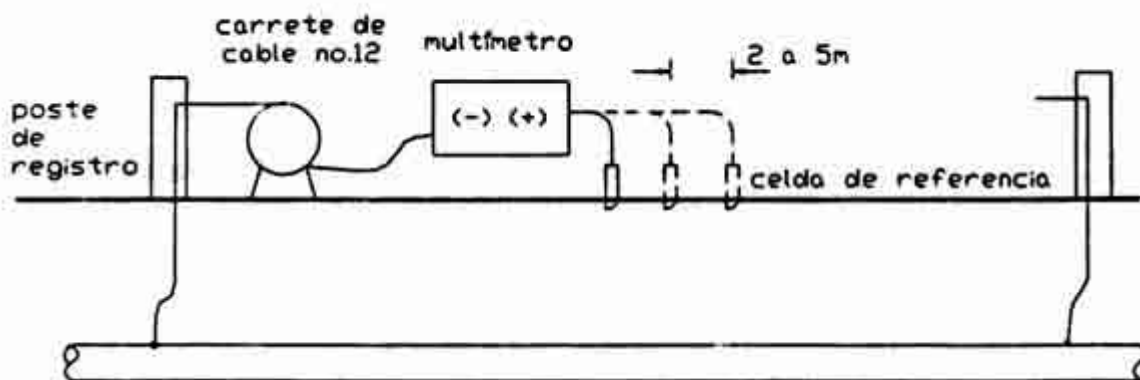


Figura 12.5 Arreglo para la medición de potenciales continuos tubo-suelo

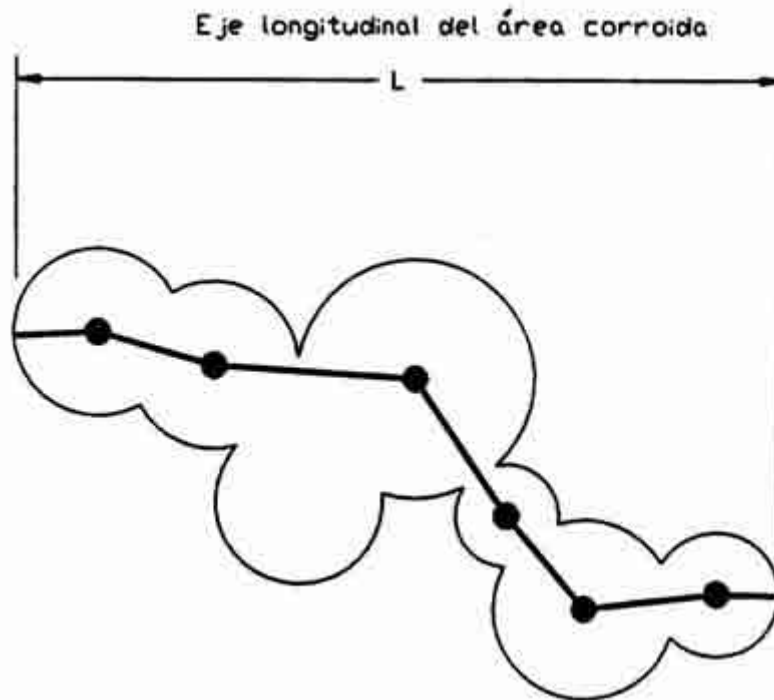


Figura 12.6 Parámetros en el análisis de la resistencia de zonas corroídas

- Están debidamente instalados y protegidos de materias extrañas o de otras condiciones que pudieran impedir su operación apropiada.
- Están calibrados para funcionar a la presión correcta.
- Están en buenas condiciones mecánicas, eléctricas y/o electrónicas.
- En el caso de los tanques unidireccionales, el nivel del agua es el adecuado.

12.2.7. Inspección de cruces

12.2.7.1. Cruces con caminos o ferrocarril

En los cruces con caminos, ferrocarriles y ríos, deberá inspeccionarse que la señalización se encuentre adecuadamente instalada, así como que las leyendas sean claramente visibles.

Los cruces con caminos o ferrocarril provistos con una camisa de refuerzo, deben ser inspeccionados cada seis meses, con el fin de detectar posibles fallas, como pueden ser la rotura de los separadores entre la camisa y la línea de conducción o rotura de sellos de los extremos.

Para detectar si una camisa está en contacto con la tubería de conducción, se deberá medir el potencial tubo-suelo, primero en la camisa y después en la tubería de conducción, cuando ambos potenciales sean iguales o se encuentren muy cercanos entre sí, se tiene que la camisa está en contacto con la tubería y se puede presentar corrosión en la línea de conducción.

12.2.7.2.Cruces con ríos

Los cruces bajo el agua serán inspeccionados periódicamente cada seis meses, para así determinar que la tubería permanezca enterrada, ya que en ocasiones, cuando el espesor de lastre no es el adecuado, la tubería tiende a flotar. Además se deberá de verificar que no exista erosión en el fondo del río en la zona del cruce, o acumulación de desechos que afecten la seguridad y la protección de los cruces, como resultado de inundaciones, tempestades o sospechas de daños mecánicos.

También se puede medir la profundidad de enterrado de tuberías, si se utilizan varillas que se entierran hasta encontrar el lomo superior de la tubería.

12.2.7.3.Cruces aéreos

En los cruces aéreos de tuberías, es necesario inspeccionar cuando menos cada seis meses los estados del recubrimiento anticorrosivo en las interfases y de la pintura anticorrosiva en el tramo aéreo, en caso de indicios de desprendimiento de película, se debería reparar inmediatamente.

12.2.7.4.Soportería

Los soportes de tubería superficial deben ser inspeccionados visualmente cada año, con objeto de detectar posibles anomalías como las siguientes: perfiles o placas en apoyos guías doblados, corrosión en medias cañas, falta de neopreno o placas de apoyo donde se requiera, hundimientos, etc.

12.3. MANTENIMIENTO

Entre los dispositivos que se deben mantener periódicamente, se encuentran:

12.3.1. **Derecho de vía**

Deben mantenerse en condiciones adecuadas para el tránsito de vehículos, los caminos de acceso al derecho de vía y a las instalaciones, así como las cunetas, diques y otras obras de drenaje para dar protección contra deslizamientos y erosión del derecho de vía.

12.3.2. **Dispositivos de seguridad y control**

Con el propósito de prevenir fugas, se debe mantener un apriete adecuado en los espárragos de las conexiones bridadas.

Así mismo se efectuará un mantenimiento periódico de válvulas, cambiando empaques de sus bridas, de espárragos, lubricación, etc.

12.3.3. Tuberías superficiales

Se debe mantener en buen estado la pintura anticorrosiva en las tuberías superficiales.

12.3.4. Cruces

Es necesario mantener aisladas, eléctricamente, las camisas de protección en los cruces con vías de comunicación.

12.3.5. Soportes

Las placas de los apoyos deben ser pintados regularmente cada seis meses.

12.4. REPARACIONES

12.4.1. Límites de imperfecciones

- a) Los carretes que contengan rayones con una profundidad mayor de 12.5% del espesor nominal de pared, deben ser reparados.
- b) Las abolladuras deben ser retiradas o reparadas cuando reúnan cualquiera de las condiciones siguientes:
 - 1. Las que afectan la curvatura de un tubo en la soldadura longitudinal o en cualquier soldadura circunferencial
 - 2. Las que contengan una muesca o rayon.
 - 3. Las que excedan una profundidad de 6% del diámetro nominal de tubería.
- c) Todas las quemaduras por arco deben ser reparadas.
- d) Todas las grietas deben ser retiradas o reparadas.
- e) Todas las soldaduras que tengan discontinuidades deberán ser reparadas y aceptadas de acuerdo con los límites de aceptación indicados en el capítulo 11 de este manual. Una soldadura sólo podrá ser reparada dos veces, y si vuelve a salir con discontinuidades, se eliminará cortando un carrete.
- f) Corrosión generalizada.

Si la corrosión generalizada ha reducido el espesor de la pared a un valor menor que el espesor mínimo requerido por presión interna (calculada conforme a lo establecido en el capítulo 6 de este manual), el tramo de tubería debe ser reemplazado.

- g) Corrosión localizada del tipo, picaduras.

El tubo debe ser reparado, reemplazado u operado a una presión reducida, si en el área corroída el espesor de pared se ha reducido a un valor menor que el espesor de diseño menos, la tolerancia de fabricación aplicable al tubo. Esto aplica si la longitud del área corroída es mayor que la permitida por la ecuación 12.3.

- h) Las áreas donde el esmerilado ha reducido el espesor de pared a un valor menor que el de diseño, menos la tolerancia de fabricación aplicable al tubo, pueden ser analizadas en la misma forma como se trató en la corrosión localizada del tipo de picaduras. Para determinar si las áreas necesitan ser reparadas, reemplazadas, u operadas a una presión reducida, se hará conforme al punto 12.4.2.

12.4.2. Procedimiento de estimación de la resistencia remanente de tuberías corroídas

El siguiente procedimiento de evaluación de áreas corroídas se aplica sólo cuando la profundidad de la picadura por corrosión es menor de 80% del espesor de pared del tubo, y la tubería está sujeta a esfuerzos provocados por presión interna, ya que no es aplicable para zonas corroídas en la soldadura longitudinal y en la zona afectada por el calor. Conviene señalar que es un procedimiento de evaluación que proporciona una indicación para poder decidir la prioridad de la reparación. El área corroída se debería limpiar, a fin de descubrir el metal sano, además debe tenerse precaución en la limpieza de áreas corroídas de tuberías presurizadas cuando el grado de corrosión sea significativo.

$$L = 1.12B(Dt_n)^{1/2} \quad (12.3)$$

Esta fórmula se utiliza para valores de B menores o iguales a 4.0, donde:

$$B = \sqrt{\left(\frac{c/t_n}{1.1c/t_n - 0.15}\right)^2} - 1 \quad (12.4)$$

L es la longitud máxima permisible del área corroída, como se muestra en la Figura 12.6 en mm.

B En caso de que B sea mayor a 4.0 se utiliza el valor de B=4.0. Se determina con la ecuación 12.4 mostrada o la Figura 12.7

D es el diámetro exterior nominal del tubo, en mm.

t_n es el espesor de pared nominal del tubo en mm.

c es la Profundidad máxima del área corroída en mm.

Cuando la longitud axial de la zona corroída es mayor que la longitud máxima permisible, se procede a reducir la presión de operación de acuerdo con lo que a continuación se presenta:

Para valores de "G", calculados con la fórmula 12.6, menores o igual a 4.0; se tiene que la tubería debe operar a una presión reducida, dada por la fórmula 12.5

$$Pd = 1.1Pi \left[\frac{1 - 0.67 \left(\frac{C}{t_n} \right)}{1 - \frac{0.67C}{t_n \sqrt{G+1}}} \right] \quad (12.5)$$

donde:

$$G = 0.893 \left(\frac{L}{\sqrt{Dt_n}} \right) \quad (12.6)$$

P_d es la presión de diseño interna reducida en MPa

P_i es la presión de diseño interna original basada en el espesor de pared nominal el tubo en MPa

L es la longitud de la zona corroída, como se muestra en la Figura 12.6, en mm.

t_n es el espesor nominal en mm.

C es la profundidad máxima del área corroída en mm.

D es el diámetro en mm

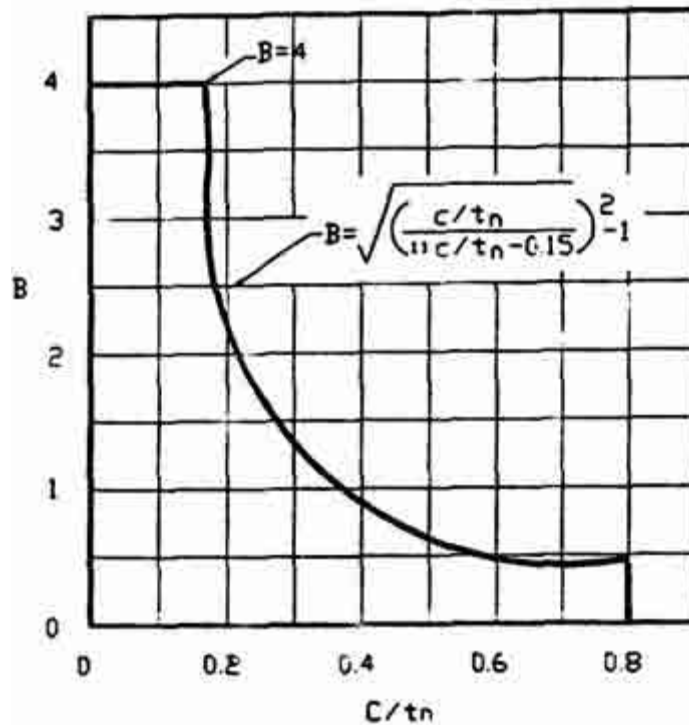


Figura 12.7 Curva para la determinación del valor "B"

Para, valores de C mayores de 4.0; la tubería debe operar a una presión reducida, dada por la fórmula 12.7.

$$P_d = 1.1P_i \left(1 - \frac{C}{t_n} \right) \quad (12.7)$$

Excepto que P_d no debe exceder a P_i

12.4.3. Reparaciones permisibles en tuberías

- a) Cuando sea factible suspender el servicio de la tubería, se realizará la reparación de ésta, cortando un tramo que contiene la imperfección, y reemplazando el mismo con un tramo de tubo de espesor de pared y grado igual que el original de una longitud no menor que la mitad del diámetro del tubo.
- b) Si no es posible suspender de operación la tubería, las reparaciones pueden realizarse mediante la instalación de una envolvente soldada o a base de medias cañas (manufacturadas en fábrica), unidas por medio de espárragos (ver Figura 12.8).

Para reparaciones de abolladuras, debe usarse un material de relleno endurecible, como resinas epóxicas, para llenar el vacío entre la envolvente y el tubo y restaurar el contorno original del mismo.

- c) Si no es posible suspender de operación la tubería, pueden ser reparadas mediante la instalación de una envolvente completa, las fugas menores y pequeñas áreas corroídas, excepto grietas.

12.4.4. Métodos de reparación

- a) Las envolventes soldadas para reparar fugas, deben tener una presión de diseño no menor que la correspondiente a la tubería que se va a reparar, la que será soldada en su totalidad, tanto circunferencial como longitudinalmente. El largo de la envolvente circunferencial completamente soldada, no debe ser menor que 100 mm (4 pulg); si la envolvente es más gruesa que el tubo que se va a reparar, los extremos circunferenciales deben ser biselados hasta el espesor del tubo aproximadamente 45 grados.

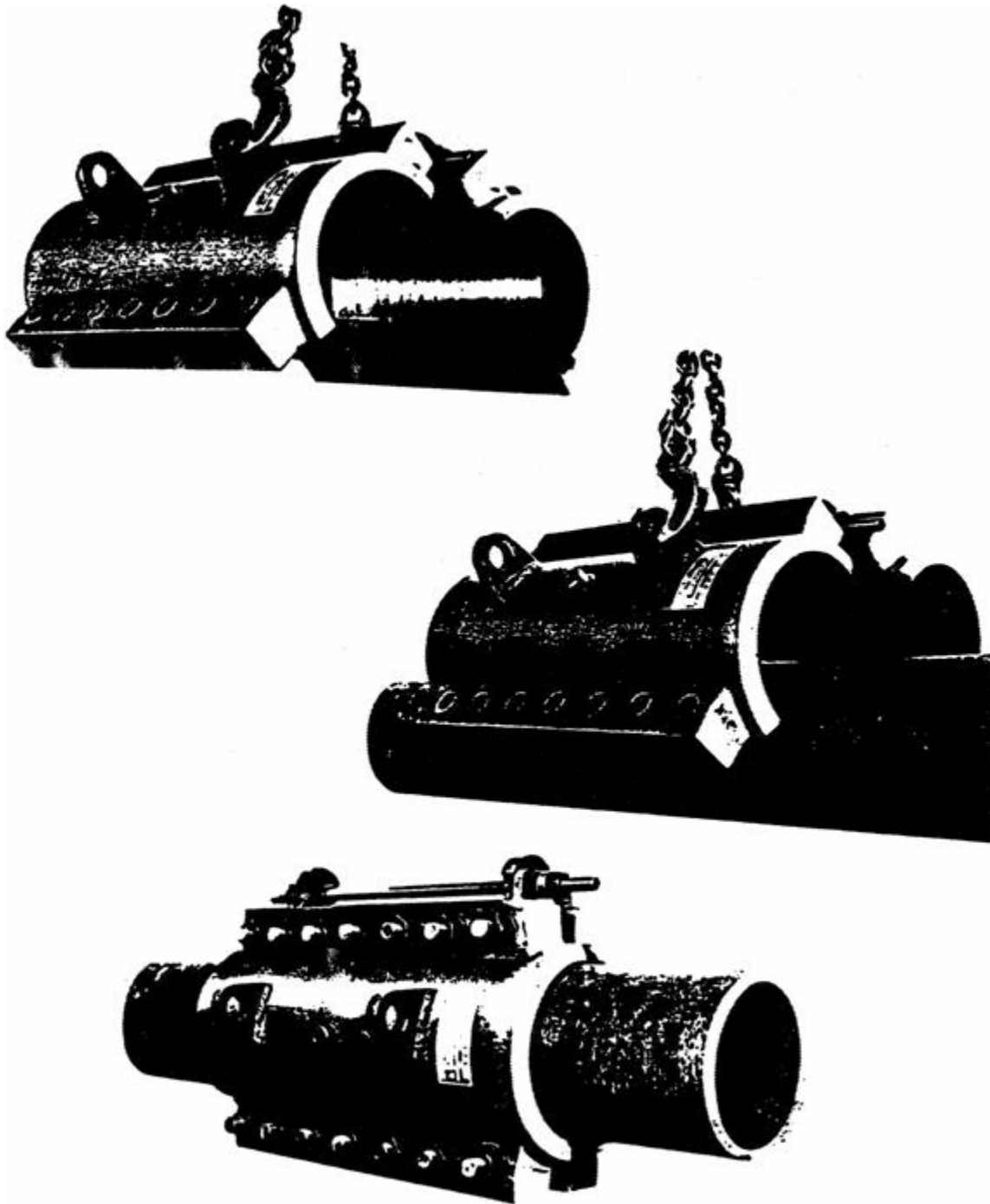


Figura 12.8 Abrazadera para reparación

12.5. PLAN DE CONTINGENCIAS

Como mínimo, se deberán tomar en cuenta los siguientes puntos, con el propósito de solucionar problemas generados por situaciones de emergencias:

- a) Clasificación de los eventos que pudieran presentarse, de tal forma que se identifiquen aquellos que requieren atención inmediata.
- b) Establecer y mantener una comunicación adecuada con las dependencias y autoridades involucradas como son: policía, bomberos, ejército, etc.
- c) Disponer de un mecanismo efectivo y rápido que permita actuar en las diferentes situaciones de emergencia como son: fugas de agua, fuego, explosión, desastres naturales. etc.
- d) Disponer de personal, equipo, herramientas y materiales necesarios en una situación de emergencia.
- e) Acciones directamente orientadas a proteger a la población y a las propiedades, como son: reducción de presión y paro de la línea en cualquier tramo y restauración segura de cualquier servicio cortado.

Asimismo se deben establecer procedimientos para analizar accidentes y fallas, con el propósito de determinar el origen del problema y minimizar su recurrencia

PARTE DOS

**"GUIA DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE TUBERÍA DE ACERO PARA LINEAS DE
CONDUCCIÓN DE AGUA"**

1. INTRODUCCIÓN

Con el propósito de ilustrar la aplicación del "Manual de Análisis y Diseño de Tubería de Acero para Líneas de Conducción de Agua", la presente guía expone, de los capítulos dos al ocho, el desarrollo de un ejemplo de una línea terrestre, cubriendo los aspectos principales que intervienen en el análisis y diseño. Asimismo, en el capítulo nueve se presenta un ejemplo de una tubería submarina. El capítulo diez contiene diagramas de flujo que sirven de guía en el desarrollo de las distintas etapas de un proyecto. Conviene aclarar que la intención de los ejemplos es mostrar la aplicación de los procedimientos descritos en el manual; pero de ninguna manera pretenden abarcar todas las situaciones que se tienen en el desarrollo real.

Para la selección del ejemplo, se eligió un acueducto de 80 Km de longitud, ubicado en el estado de Jalisco, que va de la ciudad de Chapala a la ciudad de Guadalajara. Debido a la configuración topográfica del área, se tienen cuatro kilómetros de tubería superficial y el resto de tubería enterrada, así como el cruce con una barranca con río en el fondo, una carretera y una vía de ferrocarril. El diámetro del acueducto es de 1.22 m, y el gasto que maneja es de 2 m³/s, además se utilizará tubería de acero al carbón API-5L Gr B. Para el análisis y diseño se tomo como base el trazo mostrado en la Figura 1.1.

Cabe mencionar que en el capítulo dos se determina el espesor de la tubería. Primeramente, se calcula una sobrepresión debida al fenómeno transitorio (golpe de ariete) en un tramo de 3 Km, ya que se espera un cierre de válvula en ese tramo, y se revisa el espesor por colapso para el valor de presión negativa. Enseguida se identifican diferentes tramos de carga estática para el cálculo del espesor por presión interna y se revisa por manejo.

Una vez definido el espesor requerido por presión interna, se procede a revisar los esfuerzos a los que está sometida la tubería bajo los diferentes tipos de carga que se presentarán, para lo cual se clasifican la parte enterrada y la superficial.

El capítulo tres se refiere a la tubería enterrada. En éste se calcula la carga muerta relativa al peso del relleno y se revisa la tubería por pandeo y deflexión vertical. Asimismo, se presenta una revisión de esfuerzos producidos por sismo.

En el capítulo cuatro se desarrolla el tema de tubería superficial, primero se calculan las fuerzas en la tubería debidas al sismo y viento, para después revisar los esfuerzos ocasionados por peso propio, sismo, viento y expansión térmica. También se hace una revisión de esfuerzos en la zona del apoyo, para lo cual se muestran los casos de una tubería sin anillo rigidizante y semillena, y se desarrolla el cálculo de la fuerza que se produce por el gradiente de temperatura de las juntas de expansión y el diseño del refuerzo requerido en conexiones con ramales.

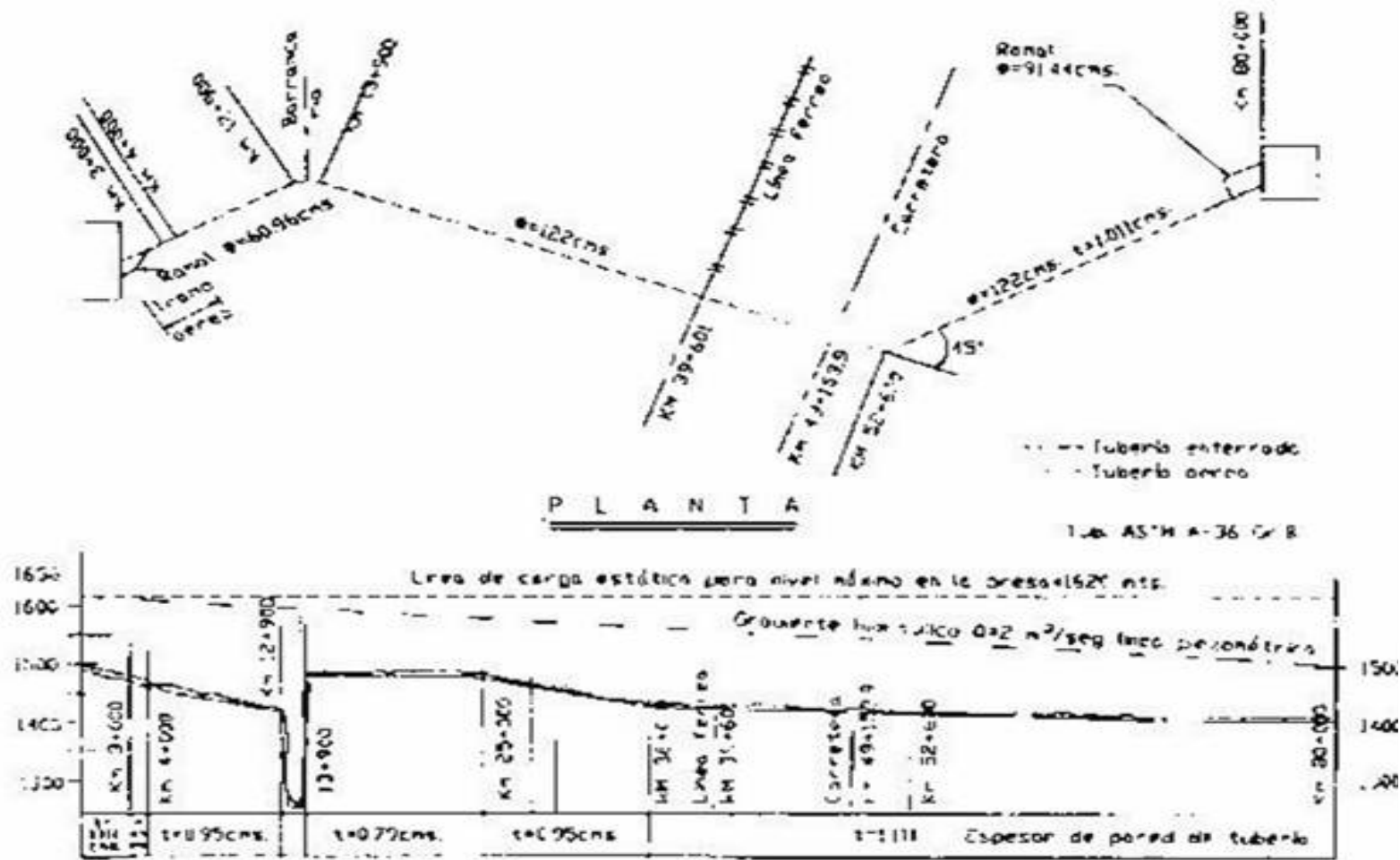


Figura 1.1 Acueducto lago de Chapala - Guadalajara, Jalisco

Enseguida, la guía se orienta a las obras especiales que se encuentran en la mayoría de los proyectos.

Dentro del capítulo cinco, se dedica una sección al cruce con una carretera, en la cual se calculan las cargas producidas por el tránsito de vehículos en la superficie de maquinaria y equipo, así como los esfuerzos en la tubería provocados por dichas cargas. La siguiente sección contempla el cruce con una vía de ferrocarril y finalmente, se tiene una sección para cubrir el cruce con una barranca con río en el fondo, en la cual se calcula la socavación en el río, el lastre de concreto necesario para la estabilidad hidrodinámica y las fuerzas en los atraques de concreto para el cruce con la barranca. Además se muestra un plano típico de señalización para su uso en los cruces de la tubería.

En el capítulo seis se detallan los métodos de prevención de la corrosión, limpieza de la superficie a recubrir, selección de recubrimientos para tuberías superficiales y enterradas, prueba dieléctrica, diseño del sistema de protección catódica, otros elementos del sistema de corriente impresa y procedimientos de cálculo para un sistema de ánodos de sacrificio.

El capítulo siete hace referencia a las uniones soldadas, y tiene como objetivo mostrar los requisitos mínimos necesarios para la elaboración y calificación de un procedimiento de soldadura. El capítulo ocho describe los procedimientos de inspección necesarios para detectar anomalías en los componentes del sistema de tuberías de conducción de agua. Los procedimientos de inspección que se recomiendan son: inspección visual del derecho de vía, medición de espesores en puntos discretos de la tubería, inspección de pintura y recubrimiento anticorrosivo, inspección del sistema de protección catódica e inspección de cruces.

Para ejemplificar un proyecto del diseño de una tubería submarina, en el capítulo nueve se desarrollan los principales aspectos que deben cubrirse para este tipo de Líneas, tanto en la aproximación a la costa como mar adentro.

Es importante mencionar que todas las expresiones, Tablas y Figuras indicadas en esta guía, corresponden al "Manual de Análisis y Diseño de Tubería de Acero para Líneas de Conducción de Agua", a menos que se indique otra fuente.

2. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE TUBERÍA

2.1. GENERALIDADES

En este capítulo se diseña el espesor del acueducto mostrado en la Figura 1.1. La tubería es de acero al carbón API-5L Gr B de 1.22 m de diámetro interior y 80 Km de longitud, con gasto de 2 m³/5. En los primeros 3 Km se puede presentar el fenómeno transitorio (golpe de ariete). La velocidad es de 1.8 más, a una temperatura de 288.15 °K (15 °C). La válvula de cierre tarda en cerrar 2.5 s. Debido a que en el Km 3+000 se localiza la válvula, el cálculo de la sobrepresión se hará para una longitud de 3,000 m. La densidad del agua es de 1,000.3 N s²/m⁴; durante el recorrido se presentan diferentes presiones de operación. Las presiones máximas son las siguientes: del Km 0+000 al 4+000 y del 13+900 al 25+000, 1.57 MPa, del Km 4+000 al 12+900 y del 25+000 al 36+000, 1.86 MPa, del Km 36+000 al 80+000, 2.21 MPa; por último, en el tramo del cruce con la barranca y río, Km 12+900 al 13+900, se tienen presiones de 2.43, 3.11 y 3.82 MPa (ver Dibujo Numero 5.1 "CRUCE DEL RIO" en el capítulo 5 de esta guía).

2.2. CÁLCULO DE SOBREPRESION (P) POR EL FENOMENO TRANSITORIO

Para el cálculo de la sobrepresión por el fenómeno transitorio en los primeros tres kilómetros, se utiliza el siguiente método aproximado:

De las expresiones 5.1 y 5.2:

$$P = \rho av \quad (5.1)$$

$$a = \frac{1.439}{\sqrt{1 + \frac{1}{100} \left(\frac{d_i}{t} \right)}} \quad (5.2)$$

Datos:

d_i	= 1.22 m
t	= 11.11 mm = 0.01111 m
ρ	= 1,000.3 N s ² /m ⁴
v	= 1.8 m/s
L	= 3000 m

Cálculo de la celeridad:

$$a = \frac{1.439}{\sqrt{1 + \frac{1}{100} \left(\frac{1.22}{0.01111} \right)}} = 993.50 \text{ m/s} \quad (5.3)$$

Cálculo de la sobrepresión:

$$P = (1,000.3)(993.50)(1.8) = 1,788,836.49 \text{ Pa} = 1.79 \text{ MPa}$$

Cálculo del tiempo que tarda la onda de presión en viajar toda la longitud de la tubería y volver a la válvula:

$$T = \frac{2L}{a} = \frac{2(3000)}{993.50} = 6.03 \text{ s}$$

Dado que el tiempo T que tarda la válvula en cerrar es 2.5 s < 6.03 s, se considerará como un cierre instantáneo de válvula, por lo que las expresiones anteriores son correctas.

2.3. CÁLCULO DE ESPESORES

Para efecto del cálculo de espesores, la línea se dividirá en cinco secciones, manejándose diferentes presiones de operación (en ningún caso, se considera un sobre-espesor por corrosión ya que para este efecto, las tuberías son protegidas).

- a) Tramo 0+000 al 3+000 (tramo con tubería superficial y sobrepresión de golpe de ariete)

Datos:

$$d_i = 1,220 \text{ mm}$$

$$P_1 = 1.57 \text{ MPa}$$

$$P_2 = 1.79 \text{ MPa}$$

$$S = 0.75 f_y = 0.75 \times 241 = 180.75 \text{ MPa (por tratarse del fenómeno transitorio)}$$

$$t = \frac{P d_i}{2S} \quad (6.2)$$

$$t = \frac{(1.57 + 1.79)1,220}{2(180.75)} = 11.34 \text{ mm}$$

Espesor comercial = 11.91 mm (15/32")

Onda negativa

$$P = 1.57 - 1.79 = -0.22 \text{ MPa}$$

Revisión de espesor por presión mínima - colapso

$$P_c = 347112(t/d)^3 \quad (6.6)$$

Datos:

$$\begin{aligned}t &= 11.91 \text{ mm} \\d_e &= 1,220 + 2(11.91) = 1,243.82 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$P_c = 347112(11.91/1,243.82)^3 = 0.34 \text{ MPa} > 0.22 \text{ MPa}$$

Por lo que el espesor pasa por colapso

b) Tramo 3+000 al 4+000 y del 13+900 al 25+000 presión máxima de 1.57 MPa

Datos:

$$\begin{aligned}S &= 0.5 f_y = 0.5 \times 241 = 120.50 \text{ MPa (por tratarse de presión interna)} \\P &= 1.57 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$t = \frac{1.57 \times 1.220}{2(120.50)} = 7.94 \text{ mm}$$

Espesor comercial = 8.74 mm (11/32")

c) Tramo 4+000 al 12+900 y del 25+000 al 36+000 presión máxima de 1.86 MPa.

$$\begin{aligned}S &= 0.5 f_y = 0.5 \times 241 = 120.50 \text{ MPa (por tratarse de presión interna)} \\P &= 1.86 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$t = \frac{1.86 \times 1.220}{2(120.50)} = 9.42 \text{ mm}$$

Espesor comercial = 9.53 mm (3/8")

d) Tramo 36+000 al 80+000

Datos:

$$\begin{aligned}S &= 0.5 f_y = 0.5 \times 241 = 120.50 \text{ MPa (por tratarse de presión interna)} \\P &= 2.21 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$t = \frac{2.21 \times 1.220}{2(120.50)} = 11.18 \text{ mm}$$

Espesor comercial = 11.91 mm (15/32")

e) Tramo de la barranca y cruce del río (ver Dibujo Numero 5.3 que aparece en el capítulo 5 de esta guía)

1. Del Km 12+900 al 13+050 y del 13+379.6 al 13+900 presión máxima de 2.43 MPa.

Datos:

$$\begin{aligned} S &= 0.5 f_y = 0.5 \times 241 = 120.50 \text{ MPa (por tratarse de presión interna)} \\ P &= 2.43 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$t = \frac{2.43 \times 1.220}{2(120.50)} = 12.30 \text{ mm}$$

Espesor comercial = 12.70 mm (1/2")

2. Del Km 13+050 al 13+180 y del 13+315 al 13+397.92 presión máxima de 3.11 MPa.

Datos:

$$\begin{aligned} S &= 0.5 f_y = 0.5 \times 241 = 120.50 \text{ MPa (por tratarse de presión interna)} \\ P &= 3.11 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$t = \frac{3.11 \times 1.220}{2(120.50)} = 15.74 \text{ mm}$$

Espesor comercial = 15.88 mm (5/8")

3. del Km. 13+180 al 13+315 presión máxima de 3.82 MPa.

Datos:

$$\begin{aligned} S &= 0.5 f_y = 0.5 \times 241 = 120.50 \text{ MPa (por tratarse de presión interna)} \\ P &= 3.82 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$t = \frac{3.82 \times 1.220}{2(120.50)} = 19.34 \text{ mm}$$

Espesor comercial = 20.62 mm (13/16")

2.4. REVISIÓN DE ESPESOR MÍNIMO POR MANEJO

Se revisa que en todos los tramos, el espesor cumpla con el espesor mínimo por manejo:

$$t_m = \frac{d_n}{288} \quad (6.3)$$

$$t_m = \frac{1.220}{288} = 4.24 \text{ mm} < 11.91 \text{ mm}$$

En todos los tramos el espesor requerido por presión interna es mayor que el mínimo por manejo.

3. TUBERÍA ENTERRADA

3.1. GENERALIDADES

En este capítulo se revisa el espesor de tubería del tramo enterrado del acueducto de la Figura 1.1, Km. 4+000 al 80+000, bajo la acción de carga del suelo, enseguida se determina la deflexión vertical, y el pandeo y se compara con los valores permisibles. Por último se revisan los esfuerzos por la acción de sismo y su combinación con las cargas de operación contra los permisibles.

3.2. CARGA MUERTA DEBIDA AL PESO DEL RELLENO

Para la determinación de la carga muerta debida al peso del relleno, se consideran los siguientes datos: tubería de 1,220 mm de diámetro interior y 11.11 mm de espesor, enterrada en zanja. La altura del relleno a partir del lomo superior de la tubería es de 1.50 m en campo travesía. El ancho de la zanja es de 2.00 m. El relleno es de arcilla con un masa volumétrica de 15,916.19 N/m³ y módulo de elasticidad del suelo de 8.83 MPa.

Cálculo de la carga considerando tubería en zanja:

$$W_c = C_d \gamma d_e B_d \quad (5.5)$$

$$\frac{h_r}{B_d} = \frac{1.50}{2.00} = 0.75$$

de la Figura 5.5, $C_d = 0.7$

$$W_c = (0.7)(15,916.19)(1.242)(2) = 27,675.07 \text{ N/m}$$

Datos:

$$\begin{aligned} \gamma &= 15,916.19 \text{ N/m}^3 \text{ (peso específico del relleno)} \\ d_e &= 1.22 + (2)(0.0111) = 1.242 \text{ m (diámetro exterior de la tubería)} \\ B_d &= 2.00 \text{ m (ancho de la trinchera)} \\ h_r &= 1.50 \text{ m (altura del relleno)} \end{aligned}$$

3.3. REVISIÓN POR PANDEO Y DEFLEXION VERTICAL

- a) Determinación de la deflexión (ver sección 6.3.1 del manual) en la pared del tubo causada por la carga del suelo:

$$\Delta_c = \frac{D_1 K W_c r^3}{EI + 0.061 E' r^3} \quad (6.7)$$

Datos:

- $D_1 = 1.25$ (factor de retardo)
- $K = 0.1$ (constante de apoyo)
- $W_c = 27,675.07 \text{ N/m} = 27.68 \text{ N/mm}$ (carga por unidad de longitud del tubo)
- $r = 1,220/2 = 610 \text{ mm}$ (radio)
- $E = 205,940 \text{ MPa}$ (modulo de elasticidad)
- $I = t^3/12 = 11.111/12 = 114.3 \text{ mm}^4/\text{mm}$ (momento de inercia de la pared del tubo por unidad de longitud)
- $E' = 8.83 \text{ MPa}$ (módulo de relación del suelo, Tablas 6.2 y 6.3)

b) Pandeo, debido a cargas externas:

$$P_v + \gamma_w h_w + R_w \left(\frac{W_c}{d_e} \right) + \left(\frac{W_L}{d_e} \right) \leq q_a \quad (6.8)$$

$$\Delta_c = \frac{1.25s(0.1)(27.68)(610^3)}{(205.940)(114.3) + (0.061)(8.83)(610^3)} = 5.39 \text{ mm}$$

Datos:

- $P_v = 0$, (para este caso se considera, una presión de vacío es cero ya que la presión interna es positiva y mayor que la atmosférica)
- $\gamma_w h_w = 0$ (para este caso en particular se considera la inexistencia del nivel de aguas freáticas)
- $W_L = 0$ (carga viva sobre la tubería)
- $R_w = 1$ (factor de flotación)

$$R_w \frac{W_c}{d_e} = (1) \frac{27,675.07}{1.242} = 22,282.67 \text{ Pa} = 0.022 \text{ MPa} \text{ sólo por carga del relleno}$$

c) Criterios límites de aceptación (ver sección 6.3.3 del manual)

$$\begin{aligned} \text{Deflexión permisible} &= 5 \% d_e \\ &= 0.05 \times 1,242 = 62.1 \text{ mm} > 5.39 \text{ mm} \end{aligned}$$

No se tienen problemas por deflexión vertical.

Carga de pandeo permisible = q_a

$$q_a = \frac{1}{F \cdot S} \left(\frac{32 R_w B' E' E I}{d_e^3} \right)^{1/2} \quad (6.9)$$

$$B' = \frac{1}{1 + (4e^{-0.2133h})} \quad (6.10)$$

Datos:

$$\begin{aligned}
 h_r &= 1.5 \text{ m (altura del nivel del terreno al lomo de la tubería)} \\
 d_e &= 1.242 \text{ m (diámetro)} \\
 R_w &= 1 \text{ (factor de flotación)} \\
 h_r/d_e &= 1.5/1.242 = 1.21 < 2 \Rightarrow F \cdot S = 3
 \end{aligned}$$

$$B' = \frac{1}{1 + (4e^{-0.2133(1.5)})} = 0.2561$$

$$q_a = \frac{1}{3} \left(\frac{32(1)(0.2561)(8.83)(205,940)(114.3)}{1,220^3} \right)^{1/2} = 0.21 \text{ MPa}$$

$$q_a = 0.31 \text{ MPa}$$

$$0.022 \text{ MPa} < 0.31 \text{ MPa}$$

Por lo que no se presentan problemas por pandeo.

3.4. REVISIÓN DE ESFUERZOS POR SISMO

Los datos para la revisión de esfuerzos por sismo son los siguientes: tubería de acero al carbón API-5L-Cr B de 1,220 mm de diámetro y 11.11 mm de espesor enterrada del Km 4+000 al 80+000, en este tramo se tiene una presión promedio de 2.21 MPa. En el estado de Jalisco, el suelo está constituido por arcilla blanda con peso volumétrico de 15,916.19 N/m³ y profundidad de enterrado de 1.5 m por encima del lomo de la tubería. La velocidad de propagación sísmica de corte se supondrá de 150 m/s., ya que para su determinación deberá realizarse un estudio de prospección sísmica en campo.

$$\sigma_{amax} = \pm \frac{EV_{max}}{2V_s} \quad (5.33)$$

$$V_s = \frac{V'_s}{0.7} \quad (5.29)$$

$$\sigma_{fmax} = \pm \frac{Ed_e A_{max}}{2V_s^2} \quad (5.34)$$

$$\varepsilon' = \left(\frac{V_{max}}{V_s} \right) + \left(\frac{A_{max}}{V_s^2} \right) \left(\frac{d_e}{2} \right) \quad (5.30)$$

Datos:

$$\sigma_{am\acute{a}x} = \text{esfuerzo axial m\acute{a}ximo (MPa)}$$

$\sigma_{f\text{máx}}$ = esfuerzo de flexión máximo(MPa)
 V_s = velocidad aparente de propagación del sismo en dirección horizontal (mm/s)
 V'_s = 150,000 mm/s (velocidad de propagación de las ondas de corte)
 ε' = deformación unitaria en dirección axial
 E = 205,940 MPa
 $V_{\text{máx}}$ = 148 mm/s (velocidad máxima del terreno de la Tabla 5.10 de acuerdo a la zona sísmica B y tipo de suelo III)
 d_e = 1,220 + 2(11.11) = 1,242 mm
 a_0 = 0.10 (aceleración máxima del terreno, de la Tabla 5.4 se obtiene para la zona sísmica B y tipo de suelo III)
 g = 9,806.65 mm/s² (aceleración de la gravedad)
 F_g = 1.5 (Factor de grupo para tuberías, por pertenecer al grupo "A")
 $A'_{\text{máx}}$ = $F_g a_0 g$ = (1.5) (0.10) (9,806.65) = 1,472 mm/s²

a) Cálculo de la velocidad aparente de propagación de las ondas de corte

$$V_s = \frac{150.000}{0.7} = 214.286 \text{ mm/s}$$

b) Cálculo de la deformación en dirección axial

$$\varepsilon' = \frac{V_{\text{max}}}{V_s} + \left(\frac{A_{\text{max}}}{V_s^2} \right) \left(\frac{d_e}{2} \right) \quad (5.30)$$

$$\varepsilon' = \frac{148}{214.286} + \left(\frac{1.471}{214.286^2} \right) \left(\frac{1.242}{2} \right) \quad (5.30)$$

$$\varepsilon' = 0.000711 < 0.006 \text{ (deformación máxima permisible)}$$

$$\varepsilon' = < 0.006$$

c) Cálculo de los esfuerzos máximos de flexión y axial

Como las ondas sísmicas son de corte se tiene que:

$$\sigma_{\text{amax}} = \pm \frac{EV_{\text{max}}}{2V_s} = \frac{(205.940)(148)}{2 \times (214.286)} = \pm 71.12 \text{ MPa} \quad (5.33)$$

$$\sigma_{\text{fmax}} = \pm \frac{Ed_e A'_{\text{max}}}{2V_s^2} = \frac{(205.940)(1.242)(1.471)}{2(214.286)^2} = \pm 4.10 \text{ MPa} \quad (5.34)$$

d) Cálculo de esfuerzo longitudinal debido a la presión interna

$$S_L = \mu \frac{Pd_e}{2t} \quad (6.14)$$

Datos:

- d_e = 1,242 mm (diámetro exterior)
- μ = 0.3 (relación de Poisson del acero)
- P = 2.21 MPa (presión máxima de operación)
- t = 11.11 mm (espesor de la tubería)

$$S_L = 0.3 \frac{(2.21)(1.242)}{2(11.11)} = 37.06 \text{ MPa}$$

e) Suma de esfuerzo actuante con carga de sismo

$$S_T = \sigma_{amax} + \sigma_{fmax} + S_L$$

$$S_T = 71.12 + 4.10 + 37.06 = 112.28 \text{ MPa}$$

Esfuerzo permisible (sección 6.4.3)

$$S_p = 80\%f_y = (0.80)(241) = 192.80 \text{ MPa} > 112.28 \text{ MPa}$$

4. TUBERÍA SUPERFICIAL

4.1. GENERALIDADES

En este capítulo se calculan los esfuerzos máximos actuantes en la tubería, bajo la acción de cargas ocasionadas por la operación del sistema, como son masa propia y presión. Después se suman las cargas ocasionales de viento y sismo y se comparan con los esfuerzos permisibles. Se diferencian dos zonas de esfuerzos máximos al centro del claro entre apoyos, y en el apoyo mismo. Se evalúa la fuerza de expansión debida a la variación de temperatura para instalar juntas de expansión para absorber las deformaciones térmicas. Por último, se obtiene el refuerzo requerido en conexiones con ramales.

4.2. FUERZA POR SISMO EN TUBERÍA SUPERFICIAL

En el tramo superficial (del Km. 0 + 000 & 3 + 000, Figura 1.1), la tubería de 1,220 mm de diámetro y 11.11 mm de espesor se apoya en silletas separadas a cada 18.0m. La tubería se localiza cerca de la ciudad de Guadalajara, el tipo de terreno es una arcilla blanda.

La fuerza sísmica por unidad de longitud que actúa en un tramo de tubería entre dos apoyos:

$$F = am \quad (5.39)$$

donde:

a es la aceleración sísmica
m es la masa por unidad de longitud de tubería

$$m = \frac{W}{g} \quad (5.40)$$

Datos:

W = 337.35 + 1,167.46 = 1,504.81 kg/m (masa del tubo más masa del agua
la masa se obtienen de la Tabla 5.9)

g = 9.80665 m/s² (aceleración de la gravedad)

$$m = \frac{1,504.81}{9.80665} = 153.45 \text{ kgs}^2/\text{m}^2$$

Conocido el tipo de suelo y la zona sísmica, el valor de la aceleración sísmica se obtiene de la Tabla 5.4. En la Figura 5.6 se observa que la ciudad de Guadalajara se encuentra entre la zona B y C, por lo que se supondrá la zona B. El tipo de suelo para una arcilla blanda, corresponde al tipo III.

De la Tabla 5.4 se obtienen los siguientes datos:

- a_0 = 0.10 (coeficiente de aceleración del terreno)
- C = 0.36 (coeficiente sísmico)
- T_a = 0.6 s (período característico inicial)
- T_b = 2.9 s (período característico final)
- r = 1 (exponente del espectro de diseño)

$$T = \frac{2}{\pi} \left[\frac{mL^4}{EI} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.44)$$

Datos:

- T = periodo natural de la tubería.
- L = 18.0 m (longitud del tramo de tubería por analizar)
- E = 2.10×10^{10} kg/m² (módulo de elasticidad del acero)
- I = 0.00812557 m⁴ (momento de inercia de la sección transversal)

$$T = \frac{2}{\pi} \left[\frac{(153.45)(18)^4}{(2.10 \times 10^{10})(0.00812557)} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.196 \text{ s}$$

dado que $T < T_a$ ($0.196 < 0.6$), la aceleración sísmica se obtiene:

$$a = a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a} \quad (5.41)$$

$$a = 0.10 + (0.36 - 0.10) \frac{0.196}{0.6} = 0.185 \text{ m/s}^2$$

De acuerdo al tipo de estructura (A para líneas de conducción de agua potable), el valor de la aceleración sísmica debe multiplicarse por 1.5.

$$a = 1.5(0.185) = 0.278 \text{ m/s}^2$$

La fuerza se obtiene:

$$F = am = (0.278)(153.45) = 42.66 \text{ kg/m} = 418.35 \text{ N/m}$$

4.3. FUERZA POR VIENTO EN TUBERÍA SUPERFICIAL

En el tramo superficial, la fuerza producida por el viento sobre una tubería se obtiene:

$$F = PC_s d_e \quad (5.45)$$

Datos:

- P = presión de viento
 C_s = 0.6 (factor de forma)
 d_e = $(1.22 + (0.0111)(2)) = 1.24$ m (diámetro exterior)

La presión se obtiene:

$$P = 0.004 V_D^2 \quad (5.46)$$

donde:

- V_D = velocidad de diseño.

$$V_D = F_T F_\alpha V_R \quad (5.47)$$

Datos:

- V_R = 160 Km/h (velocidad regional de la Figura 5.7)
 F_T = 1.0 (factor de topografía de la Tabla 5.5 considerando que el terreno)

donde se localiza la tubería, se encuentra prácticamente plano.

- F_α = factor de exposición

$$F_\alpha = F_C F_{rz} \quad (5.48)$$

Datos:

- F_C = 1.0 (factor de construcción de la Tabla 5.6 considerando que se trata de un elemento cuya mayor dimensión es menor de 20.0 m)
 F_{rz} = factor de altura

$$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{10}{\delta} \right]^\alpha \quad (5.49)$$

Datos:

- δ = 245 (coeficiente de la rugosidad del terreno)
 α = 0.099 (coeficiente del tamaño de la construcción (valores obtenidos de las Tablas 5.7 y 5.8), considerando terreno abierto, prácticamente plano (categoría 1 y clase de estructura A)).

$$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{10}{245} \right]^{0.099} = 1.14$$

$$F_\alpha = (1.0)(1.14) = 1.14$$

$$V_D = (1.0)(1.14)(160) = 182.4 \text{ Km/h}$$

$$P = 0.004(182.4)^2 = 133.08 \text{ Kg/m}^2 = 1,305.10 \text{ Pa}$$

$$F = (133.08)(0.6)(1.24) = 99.01 \text{ Kg/m} = 970.96 \text{ N/m}$$

4.4. REVISIÓN DE ESFUERZOS

La revisión de esfuerzos corresponde a una tubería de acero API-5L-Gr 8 de 1,220 mm de diámetro interior y 11.11 mm de espesor que transporta agua a una temperatura de 15 °K promedio, siendo el gradiente de 33 °K, la presión en la tubería de 1.57 MPa, la carga por sismo de 418.35 N/m, la carga por viento de 970.96 N/m y la separación entre apoyos de 18 m.

4.4.1. Determinación de esfuerzos

Se obtienen por separado los esfuerzos en la tubería, bajo las diferentes condiciones de carga, para después efectuar las combinaciones y compararlos con los esfuerzos permisibles.

a) Esfuerzo debido a la masa propia y agua:

$$S_b = \frac{WL^2}{8S} \quad (6.11)$$

Datos:

- W = 11,444.36 N/m (masa del contenido agua de la tubería, de la Tabla 5.9)
- W_P = 3,308.76 N/m (masa del tubo, de la Tabla 5.9)
- S = 13,094 cm³ = 13,094,000.00 mm³ (módulo de sección, de la Tabla 5.9)
- W = 14,753.12 N/m = 14.75 N/mm (masa del tubo más masa del agua)
- L = 18,000 mm (separación centro a centro de apoyos)

$$S_b = \frac{14.75 \times 18.000^2}{(8)(13,094.000)} = 45.62 \text{ MPa}$$

b) Esfuerzo longitudinal por temperatura.

$$S_{LT} = E\alpha(T_2 - T_1) \quad (6.13)$$

Datos:

- (T₂ - T₁) = 33 °K (temperatura mínima de operación menos temperatura de instalación)
- α = 1.17 x 10⁻⁵ (coeficiente de expansión térmico unitario, de 6.4.1.2)
- E = 205,940 MPa (módulo de elasticidad del acero)

$$S_{LT} = (205.940)(1.17 \times 10^{-5})(33) = 79.53 \text{ MPa}$$

c) Esfuerzo longitudinal por presión.

$$S_L = \mu \frac{P_i d_e}{2t} \quad (6.14)$$

Datos:

$$\begin{aligned} \mu &= 0.3 \text{ (coeficiente de Poisson, de 6.4.1.3)} \\ P_i &= 1.57 \text{ MPa} \\ d_e &= 1,220 \text{ mm (diámetro de la tubería)} \\ t &= 11.11 \text{ mm (espesor)} \end{aligned}$$

$$S_L = 0.3 \frac{(1.57)(1220)}{(2)(11.11)} = 25.89 \text{ MPa}$$

d) Esfuerzos por sismo.

$$S_{bs} = \frac{WL^2}{8S} \quad (6.15)$$

Datos:

$$\begin{aligned} W &= 418.35 \text{ N/m} = 0.418 \text{ N/mm (fuerza por sismo)} \\ L &= 18,000 \text{ mm (separación centro a centro de apoyos)} \\ S &= 13'094,000 \text{ mm}^3 \text{ (módulo de sección, de la Tabla 5.9)} \end{aligned}$$

$$S_{bs} = \frac{(0.418)(18.000)^2}{(8)(13,094.000)} = 1.29 \text{ MPa}$$

e) Esfuerzos por viento

$$S_{bv} = \frac{W_v L^2}{8S} \quad (6.16)$$

Dato:

$$W_v = 970.96 \text{ N/m} = 0.97 \text{ N/mm (fuerza por viento)}$$

$$S_{bv} = \frac{(0.97)(18.000)^2}{(8)(13,094.000)} = 3.0 \text{ MPa}$$

4.4.2. **Combinación de esfuerzos (ver sección 6.4.2 del manual).**

4.4.2.1. Masa propia + Presión = a) + c)

$$= 45.62 + 25.89 = 71.51 \text{ MPa}$$

4.4.2.2. Masa propia + Presión + Cargas ocasionales a) + c) +d) ó e)

$$= 45.62 + 25.89 + 3.00 = 74.51 \text{ MPa}$$

4.4.2.3. Masa propia + Presión + Temperatura + Cargas ocasionales = a) + b) +c) + d) ó e)

$$= 45.62 + 79.53 + 25.89 + 3.00 = 154.04 \text{ MPa}$$

4.4.3. **Comparación con esfuerzos permisibles para tubo API-L-Gr B (ver sección 6.4.3 del manual).**

Caso 4.4.2.1 $S_p = 62.5\% (f_y) = 0.625 (241) = 150.63 \text{ MPa} > 71.51 \text{ MPa}$

Caso 4.4.2.2 $S_p = 80\% (f_y) = 0.8 (241) = 192.80 \text{ MPa} > 74.51 \text{ MPa}$

Caso 4.4.2.3 $S_p = 100\% (f_y) = 241 \text{ MPa} > 154.02 \text{ MPa}$

De la comparación anterior se concluye que los esfuerzos se encuentran abajo de los permisibles para las diferentes combinaciones, por lo tanto no será necesario restar los esfuerzos por presión y temperatura, los cuales no se presentan porque la tubería no está restringida. Entre cada dos atraques, se colocar una junta de expansión.

4.5. REVISIÓN DE ESFUERZOS EN LA ZONA DEL APOYO

En la tubería superficial se distinguen dos secciones de diferente espesor: La primera de 3 Km de longitud y 11.11 mm de espesor de pared y la segunda de un Km de longitud y 7.94 mm de espesor de pared. En ambas secciones se revisan los esfuerzos en la tubería en la zona del apoyo, sin considerar anillo rigidizante; en caso de que el esfuerzo actuante sea mayor que el permisible será necesario la utilización de anillos rigidizantes. Adicionalmente, se revisa la tubería con anillo rigidizante en la condición parcialmente llena, ya que esta condición es más crítica que cuando la tubería se encuentra totalmente llena.

4.5.1. **Revisión de esfuerzos en tuberías en apoyos sin anillo rigidizante**

Se tiene el tramo de tubería del Km 0+000 al 3+000 de acero API-5L-Gr B de 1,220 mm de diámetro interior y espesor 11.11 mm y del 3+000 al 4+000 de 7.94 mm de espesor, se apoya cada 18 y 17 m, respectivamente, con una presión de operación de 1.57 MPa. Se determinará si los esfuerzos en la tubería en la sección del apoyo

son admisibles y, en caso contrario, se determinará el espesor de tubería requerida. El ángulo de apoyo es de $\beta=2\pi/3$ rad ($\beta=120^\circ$).

$$\text{Esfuerzo tota} = S_t = S_b + S_L \quad (6.19)$$

$$\text{Donde: } S_b = S_f + \mu S_p \quad (6.20)$$

S_f = Esfuerzo de flexión en el apoyo como una viga continua.

$$S_f = \frac{W_T L^2}{12S} \quad (6.21)$$

$\mu S_p = 0$ debido a que la tubería no está restringida en los apoyos
 S_L = Esfuerzo local.

$$S_A = \left[\frac{KF}{t^2} \right] \ln \left(\frac{r}{t} \right) \quad (6.23)$$

Tramo 0+000 al 3+000:

Datos:

- t = 11.11 mm (espesor)
- d = 1,220 mm (diámetro)
- S = 13,094.000 mm³ (módulo de sección, de la Tabla 5.9)
- r = 1,220/2 = 610 mm (radio)
- L = 18 m = 18,000 mm (separación centro a centro de apoyos)
- W_w = 11,444 N/m = 11.44 N/mm (masa del agua)
- W_p = 3,305 N/M = 3.31 N/mm (masa del tubo)
- W_T = W_w + W_p = 14,749 N/m = 14.75 N/mm (masa total)
- F = W_TL = (14.75)(18,000) = 265,500 N (reacción total en el apoyo)
- β = $2\pi/3$ rad (120 ° Angulo de apoyo)
- K = 0.02 - 0.007 ($\beta - \pi/2$) = 0.0163 (factor de transferencia)

$$S_A = 0.0163 \frac{(265.500)}{(11.11)^2} \ln \frac{(610)}{11.11} = 140.44 \text{ MPa}$$

$$S_f = \frac{(14.75)(18.000)^2}{(12)(13,094.000)} = 30.41 \text{ MPa}$$

$$S_b = 30.41 + (0.3 \times 0.00) = 30.41 \text{ MPa}$$

$$S_t = S_b + S_A = 30.41 + 140.44 = 170.85 \text{ MPa}$$

Esfuerzos permisibles (secc. 6.4.3) = 62.5% f_y

$$S_p = (0.625)(241) = 150.63 \text{ MPa} < S_t = 170.85 \text{ MPa}$$

Puesto que el esfuerzo actuante es mayor que el admisible, se reduce el espaciamiento entre apoyos a 16 m, obteniéndose los siguientes esfuerzos:

Datos:

$$\begin{aligned} L &= 16 \text{ m} = 16,000 \text{ mm} \\ F &= 14.75 (16,000) = 236,000 \text{ N} \end{aligned}$$

$$S_A = 0.0163 \frac{(236,000)}{(11.11)^2} \ln \frac{(610)}{11.11} = 124.84 \text{ MPa}$$

$$S_b = S_f = \frac{(14.75)(16,000)^2}{(12)(13,094,000)} = 24.03 \text{ MPa}$$

$$S_t = S_b + S_A = 24.03 + 124.84 = 148.87 \text{ MPa}$$

Esfuerzo permisible = 150.63 MPa

$$150.63 \text{ MPa} > 148.87 \text{ MPa}$$

En el tramo del Km 0+000 al 3+000, el espaciamiento entre apoyos será de 16 m. El valor de las fuerzas por sismo, viento y esfuerzo de las secciones 4.2, 4.3 y 4.4 se calcularon para un espaciamiento entre apoyos de 18 m, no serán recalculados ya que la condición de 18 m es más crítica que la de 16 m.

El tramo de la tubería del Km 3+000 al 4+000 tiene un espesor de 7.94 mm, que por ser menor de 11.11 mm, el esfuerzo actuante será mayor que el permisible, por lo tanto, se propone revisar los esfuerzos en los apoyos utilizando anillos de refuerzo y un espaciamiento de 17 m.

4.5.2. Revisión de esfuerzos en la tubería en la zona de apoyo, utilizando anillo rigidizante

Se revisará el tramo de tubería del Km 3+000 al 4+000, de acero API-5L-Gr B, con diámetro interior de 1,220 mm y un espesor de 7.94 mm, se apoya a cada 17 m y opera a 1.57 MPa, el área del anillo de refuerzo es de 1,978 mm² de forma T con peralte 10 mm, formado con placas de 9.5 mm de espesor con valor de c' de 104 mm, R de 638 mm, "y" de 72 mm, la excentricidad del apoyo al anillo a = 0.04R, la masa de la pared del tubo, incluyendo la del anillo, es igual a 611.35 Pa y la masa volúmica del agua es de 9,806.65 N/m³.

$$\text{Esfuerzo máximo} = S_r = \left[\frac{d_e}{2 \times 10^6 t} \right] (W + qh) \quad (6.24)$$

Datos:

- S_r = Esfuerzo máximo radial combinado en la pared del tubo (MPa)
- d = 1,220 mm (diámetro)
- W = 611.35 Pa (masa de la pared de la tubería por unidad de área)
- h = 1.57 MPa = 160 m.c.a.
- t = 7.94 mm (espesor)
- q = 9,806.65 N/m³ = 9.81 x 10⁻⁵ N/mm (masa específica del agua)
- L = 17 m (separación centro a centro de apoyos)

$$S_r = \frac{1.220(611.35 + 160 \times 9,806.65)}{2 \times 10^6 (7.94)} = 120.59 \text{ MPa}$$

Esfuerzo longitudinal máximo.

$$S_{LM} = \left(\frac{L^2}{6t} \right) \left(\frac{2W}{d} + \frac{q}{1.960} \right) \quad (6.25)$$

$$S_{LM} = \left(\frac{17^2}{6 \times 7.94} \right) \left(\frac{2(611.35)}{1.220} + \frac{9,806.65}{1.960} \right) = 36.43 \text{ MPa}$$

Esfuerzo flexionante debido a. presión interna.

$$S_{bo} = \frac{1.82(A_r - C't)}{A_r + 156t\sqrt{r_m t}} \left(\frac{P_i r_m}{t} \right) \quad (6.26)$$

Datos:

- A_r = 1,978 mm² (área transversal del anillo)
- C' = 117.7 mm (ancho de contacto del anillo rectangular)
- r_m = (1,220 - 7.94)/2 = 606 mm (radio medio)
- P_i = 1.57 MPa (presión interior)

$$S_{bo} = \frac{1.82(1978 - (117.7)(7.94))}{1978 + 1.56(7.94)\sqrt{606(7.94)}} \left(\frac{1.57(606)}{7.94} \right) = 80.21 \text{ MPa}$$

El esfuerzo longitudinal total:

$$S_T = S_{LM} + S_{bo} \quad (6.27)$$

$$S_T = 36.43 + 80.21 = 116.64 \text{ MPa}$$

Esfuerzo permisible (ver sección 6.4.3) = 62.5% fy

$$S_p = 0.625(241) = 150.63 \text{ MPa} > 116.64 \text{ MPa}$$

Por lo que el esfuerzo actuante es menor que el permisible

b) Revisión de esfuerzos en el anillo.

$$M = 0.01 Q \quad (6.28)$$

De la Tabla 5.9 obtenemos masa del agua más masa del tubo = 13.81 N/mm:

$$Q = 17.000(13.81) = 234.770 \text{ N (fuerza total de la tubería transmitida al anillo)}$$

$$R = (1.220/2) + (100 - 72) = 638 \text{ mm (al centro del anillo)}$$

$$M = [0.01(234.770)(638)] = 1,497,832.60 \text{ N - mm}$$

Datos:

I = para sección "T" de altura 100 mm, base de 117.7 mm y espesor 9.5 mm, corresponde "I" de 2,119.000 mm⁴ "y" de 72 mm.

$$I = 2,119,000 \text{ mm}^4$$

y = 72 mm (distancia del eje neutro, a la fibra extrema)

$$S_1 = \frac{(1,497,832.60)(72)}{2,119.000} = 50.89 \text{ MPa (esfuerzo máximo flexionante)} \quad (6.29)$$

El esfuerzo máximo debido a la, fuerza cortante S₂ (de la expresión 6.30)

$$S_2 = \frac{Q}{4A_r} \quad (6.30)$$

$$S_2 = \frac{234.770}{4(1978)} = 29.67 \text{ MPa}$$

El esfuerzo debido a la fuerza radial S₃ (expresión 6.31)

$$S_3 = \left(\frac{Pr_m}{A_r} \right) \left[\left(C' + 1.56\sqrt{r_m t} \right) \frac{A_r - C't}{A_r + 1.56t\sqrt{r_m t}} \right] \quad (6.31)$$

$$S_3 = \frac{1.57(606)}{1978} \left[\left(1117.7 + 1.56\sqrt{(606)(7.94)} \right) \frac{(1978 - (1117.7)(7.94))}{1978 + 1.56(7.94)\sqrt{(606)(7.94)}} \right] = S_3 = 39.96 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos sumados para obtener el esfuerzo total:

$$S_T = S_1 + S_2 + S_3 = 50.89 + 29.67 + 39.96 = 120.52 \text{ MPa} \quad (6.32)$$

Esfuerzos permisibles (ver sección 6.4.3) = 62.50% fy

$$S_p = (0.625)(241) = 150.63 \text{ MPa} > 120.2 \text{ MPa}$$

4.5.3. Revisión de esfuerzos en tubería parcialmente llena

En el caso de tuberías de conducción de agua, siempre se tratará de evitar que la tubería contenga aire, por lo que este desarrollo se incluye para aquellos casos que por alguna razón especial la tubería no está completamente llena, como pueden ser los emisores para aguas negras.

Considerando el mismo tramo de la sección con anillo rigidizante, tenemos tubería de acero API-5L-Cr.B con diámetro interior de 1,220 mm, espesor 7.94 mm, apoyada a cada 17 m, área del anillo rigidizante de 1,978 mm, en forma de "T", formada con placa de espesor de 9.5 mm, y peralte de 100 mm, con momento de inercia 2,119,000 mm⁴ y valor de C' de 117.7 mm, R de 638 mm, "y" de 72 mm, masa de la pared del tubo de 611.35 N/m², masa volúmica del agua de 9,806.65 N/m³.

Considerando la tubería medio llena, el esfuerzo circunferencial es mínimo, pero el longitudinal es máximo.

a) Esfuerzos en la pared del tubo.

1. Cálculo del valor K_L

$$K_L = \left(\frac{L}{12r} \right) \sqrt{\frac{t}{r}} \quad (6.33)$$

$$n_L = \frac{1}{\sqrt{K_L}} \quad (6.34)$$

Datos:

$$\begin{aligned} L &= 17.000 \text{ mm} \\ R &= (1.220)/2 = 610 \text{ mm} \\ t &= 7.94 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$K_L = \left(\frac{17.000}{(12)(610)} \right) \sqrt{\frac{7.94}{610}} = 0.265$$

$$n_L = \frac{1}{\sqrt{K_L}} = \frac{1}{\sqrt{0.265}} = 1.943$$

2. Cálculo del esfuerzo longitudinal en la tubería:

$$S_{LM} = \frac{L^2}{6t} \left(\frac{2W}{d} + \frac{q}{1960} \right) n_L \quad (6.25 \text{ afectada por } n_L)$$

Datos:

$$\begin{aligned} L &= 17 \text{ m} \\ T &= 7.94 \text{ mm} \\ W &= 611.35 \text{ Pa} \\ d &= 1,220 \text{ mm} \\ q &= 9,806.65 \text{ N/m}^3 \end{aligned}$$

$$S_{LM} = \left(\frac{17^2}{6(7.94)} \right) \left(\frac{2(611.35)}{1.220} + \frac{9,806.65}{1,960} \right) (1.943) = S_{LM} = 70.79 \text{ MPa}$$

3. Cálculo de esfuerzo radial flexionante.

$$n_r = \frac{0.31}{\sqrt{K_L}} = \frac{0.31}{\sqrt{0.265}} = 0.60 \quad (6.35)$$

$$S_{bo} = \left(\frac{1.82(A_r - C't)}{A_r + 1.56t\sqrt{rt}} \right) S_r \quad (6.26)$$

Datos:

$$\begin{aligned} q &= 9,806.65 \text{ N/m}^3 \\ h &= 0.50 (220) = 610 \text{ mm} = 0.61 \text{ m.c.a.} \\ r &= (1,220)/2 = 610 \text{ mm} \\ t &= 7.94 \text{ mm} \\ A_r &= 1978 \text{ mm}^2 \\ C' &= 117.7 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$S_r = \left(\frac{d}{2 \times 10^6 t} \right) (W + qh) n_r \quad (6.24)$$

$$S_r = \left(\frac{1.220}{2 \times 10^6 (7.94)} \right) (611.35 + 9,806.65(0.61))(0.60) = S_r = 0.30 \text{ MPa}$$

$$S_{bo} = \left(\frac{1.82(1978 - 117.7(7.94))}{1978 + 1.56(7.94)\sqrt{610(7.94)}} \right) (0.30) = 0.20 \text{ MPa}$$

$$S_T = S_{LM} + S_{bo} = 70.79 + 0.20 = 70.99 \text{ MPa}$$

b) Revisión del esfuerzo en el anillo.

De acuerdo a la sección 6.5.6 el momento en el anillo se incrementa 3.88 veces.

$$M = (3.88)(0.01QR) \quad (6.28)$$

Para tubería medio llena, el porcentaje de la masa del agua es del 50% por lo que la fuerza total del agua y tubo es de:

$$Q = 17(2,357.52 + 0.50(11,444.36)) = 137,354.90 \text{ N (fuerza total de la tubería transmitida al anillo)}$$

$$M = 3.88(0.01 \times 137,354.90 \times 638) = 3,404,593.93 \text{ N} - \text{mm}$$

Datos:

I = para sección "T" de altura 100 mm, base de 104 mm y espesor 9.5 mm, corresponde "I" de 2,119.000 mm⁴ "y" de 72 mm.

I = 2,119.000 mm⁴

y = 72 mm⁴ distancia del eje neutro a la fibra extrema)

El esfuerzo flexionante máximo S_1 .

$$S_1 = \frac{(3,404,593.93)(72)}{2,119.000} = 115.68 \text{ MPa} \quad (6.29)$$

El esfuerzo máximo debido a la fuerza cortante S_2

$$S_2 = \frac{Q}{4A_r} \quad (6.30)$$

$$S_2 = \frac{137,354.90}{4(1978)} = 17.36 \text{ MPa}$$

El esfuerzo debido a la fuerza radial S_3 (expresión 6.31)

$$S_3 = \left(\frac{Pr_m}{A_r} \right) \left[\left(C' + 1.56\sqrt{r_m t} \right) \frac{A_r - C't}{A_r + 1.56t\sqrt{r_m t}} \right] \quad (6.31)$$

Datos:

$$\begin{aligned} h &= 0.5 d = (0.50) (1,220) = 610 \text{ mm} \\ p &= (9.80665 \times 10^{-6}) (610) = 0.00598 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$S_3 = \frac{0.00598(610)}{1978} \left[\left(117.7 + 1.56\sqrt{(610)(7.94)} \right) \frac{(1978 - (117.7)(7.94))}{1978 + 1.56(7.94)\sqrt{(610)(7.94)}} \right] = S_3 = 0.15 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos se suman para obtener el esfuerzo total:

$$S_T = S_1 + S_2 + S_3 = 115.68 + 17.36 + 0.15 = 133.19 \text{ MPa} \quad (6.32)$$

Esfuerzos permisibles (ver sección 6.4.3) = 80% fy

$$S_p = (0.80)(241) = 192.80 \text{ MPa} > 133.19 \text{ MPa}$$

Por lo que la tubería se encuentra dentro de los esfuerzos permisibles.

4.6. JUNTAS DE EXPANSIÓN

En los 4,000 m de tubería superficial, se seleccionarán aquellos tramos rectos donde se requieran juntas de expansión para absorber los desplazamientos producidos por el gradiente de temperatura de 33 °K.

La fuerza producida por el gradiente de temperaturas es:

$$F = AE\alpha_0\Delta_T \quad (5.38)$$

Datos:

$$\begin{aligned} A &= \text{área de la sección transversal} = 42,940 \text{ mm}^2 \\ E &= \text{módulo de elasticidad del acero} = 205,940 \text{ N/mm}^2 \\ \alpha_0 &= \text{coeficiente lineal de expansión química para el acero} = 11.7 \times 10^{-6} \\ \Delta_T &= \text{gradiente de temperatura} = 33 \text{ °K} \end{aligned}$$

$$F = (42.940)(205,940)(11.7 \times 10^{-6})(33) = 3,414,306.86 \text{ N}$$

Considerando apoyos a cada 16 m, se tiene que la fuerza vertical sobre cada apoyo es:

$$W = \text{masa del agua y tubo} = 11,444.36 + 3,308.76 = 14,757.14 \text{ N/m}$$

Considerando apoyos a cada 16 m y un coeficiente de fricción entre el acero y el neopreno de 0.4, se tiene:

$$F_H = 16 \times 14,757.14 = 236,114.24 \text{ N (fuerza horizontal en el apoyo)}$$

$$F_{\text{fric}} = 0.40 \times 236,114.24 = 94,445.70 \text{ N (fuerza de fricción en el apoyo)}$$

Dado que un tramo de 200 m tiene 12 apoyos, la fuerza total de fricción es:

$$F_{\text{fric}} = 12 \times 94,445.70 = 1,133,348.35 \text{ N}$$

Restando a la fuerza producida por el gradiente de temperatura la fuerza de fricción:

$$F - F_{\text{fric}} = 3,414,306.86 - 1,133,348.35 = 2,280,958.51 \text{ N}$$

y el desplazamiento longitudinal:

$$\Delta = \frac{FL}{AE} = \frac{(2,280,958.51)(200.000)}{(42.940)(205.940)} = 51.59 \text{ mm}$$

Si se utilizan juntas de expansión para absorber 52 mm, se propone una junta de preferencia a la mitad, para el tramo de 200 m.

4.7. RAMALES

Se tiene a la salida de la obra de captación un ramal conectado al cabezal, así como otro a la entrega. En esta sección se calcula el refuerzo requerido en los ramales.

La tubería es de acero API-5L Gr.B de 1.220 mm de diámetro interior y espesor de 11.11 mm, tiene dos ramales conectados, uno a 0.785 rad (45°) de 609.6 mm de diámetro exterior y otro a, $\pi/2$ rad (90°) de 914.4 mm de diámetro exterior, con espesores de 6.35 y 9.5 mm, respectivamente. La presión de operación es de 1.47 MPa.

1. Ramal de 609.6 mm a 0.785 rad (45°) (ver Figura 4.1).

a) Determinación del tipo de refuerzo.

$$VPD = \frac{Pd_e^2}{D_e \text{sen}^2 \Delta} \quad (6.42)$$

Datos:

$$\begin{aligned} P &= 1.47 \text{ MPa} \\ d_e &= 609.6 \text{ mm} \\ D_e &= 1,220 + 2(11.11) = 1,242.2 \text{ mm} \\ \Delta &= 0.785 \text{ rad (45°)} \end{aligned}$$

b) Determinación del factor de amplificación del refuerzo.

$$M = 0.0014VPD = 0.0014 \times 880.22 = 1.23 \quad (\text{de la Tabla 6.5})$$

c) Diseño de la solapa.

1. Determinación del espesor requerido.

$$\text{Cabezal} \quad T_r = \frac{PD_e}{2F_s} \quad (6.47)$$

$$f_s = 121 \text{ MPa} \quad (\text{de la Tabla 6.1})$$

$$T_r = \frac{1.47(1,242.2)}{2(121)} = 7.54 \text{ mm}$$

Ramal de (609.6 mm)

$$t_r = \frac{Pd_e}{2f_s} \quad (6.48)$$

$$t_r = \frac{1.47(609.6)}{2(121)} = 3.70 \text{ mm}$$

Cálculo de la sección removida del cabezal.

$$A_3 = (MT_r(d_e - 2t_y))/(\text{sen}\Delta) \quad (6.44)$$

$$A_3 = [1.23(7.54)(609.6 - 2(6.35))]/(\text{sen } 0.785)$$

$$A_3 = 7,832 \text{ mm}^2$$

Determinación del área de exceso en el espesor del cabezal A_2

$$A_2 = (d_e - 2t_y)(T_y - T_r)/\text{sen}\Delta \quad (6.45)$$

$$A_2 = ((609.6 - 2(6.35))(11.11 - 7.54))/(\text{sen } 0.785)$$

$$A_2 = 3,015 \text{ mm}^2$$

Determinación del área de exceso en el espesor del ramal (A_1)

$$A_1 = (5t_y(t_y - t_r)) / (\text{sen}\Delta) \quad (6.46)$$

$$A_1 = (5(6.35)(6.35 - 3.70)) / (\text{sen } 0.785)$$

$$A_1 = 119 \text{ mm}^2$$

Determinación del área requerida.

$$A_4 = A_3 - A_2 - A_1 = 2wT \quad (6.43)$$

$$A_4 = 7,832 - 3,025 - 119$$

$$2wT = 4,698 \text{ mm}^2$$

Determinación de las dimensiones del refuerzo.

$$w = (0.33d_e) / (\text{sen}\Delta) \text{ (mínima dimensión de } w)$$

$$w = (0.33(609.6)) / (\text{sen } 0.785)$$

$$w = 285 \text{ mm} \approx 300 \text{ mm}$$

$$T = \frac{A_4}{2w}$$

$$T = \frac{4698}{2(300)} = 7.83 \text{ mm} \left(\frac{5''}{16} \right)$$

$$W = (2w + d_e) / (\text{sen}\Delta)$$

$$W = (2(300) + 609.6) / (\text{sen } 0.785) = 1,711.4 \text{ mm}$$

Para el ramal de 609.6 mm de diámetro se requiere refuerzo de solapa de diámetro exterior 1,711.4 mm, espesor 7.94 mm y ancho W de 300 mm.

2. Ramal de 914.4 mm. a $\pi/2$ rad (90°) (ver Figura 4.2).
a) Determinación del tipo de refuerzo.

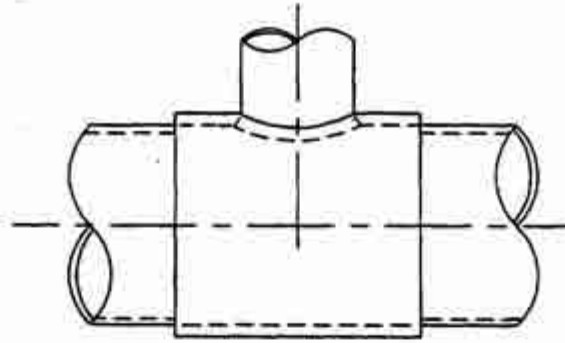
$$VPD = \frac{Pd_e^2}{D_e \text{sen}^2 \Delta} \quad (6.42)$$

$$d_e = 914.4 \text{ mm.}$$

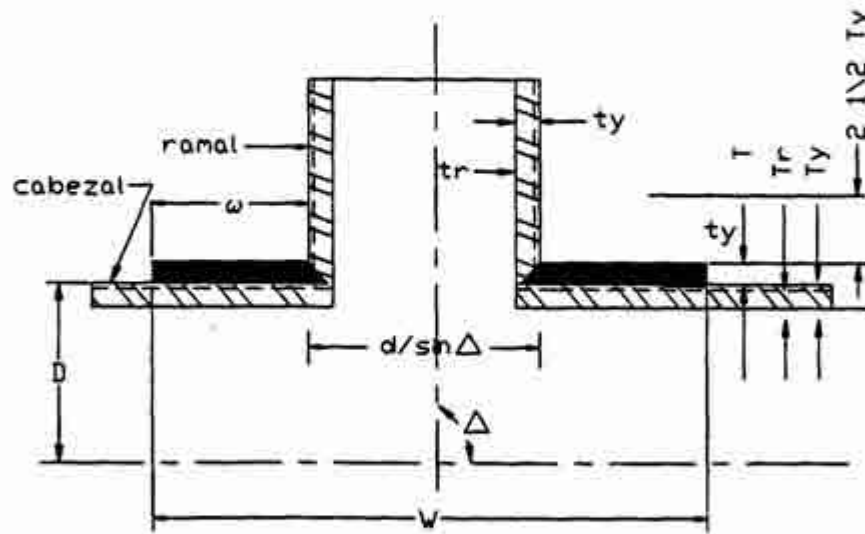
$$VPD = \frac{1.47(914.4)^2}{1,242.2(\text{sen}^2 1.57)}$$

$$VPD = 989.60 \text{ N/mm} < 1050 \text{ N/mm}$$

$$\text{Relación } \frac{d_e}{D_e} = \frac{914.4}{1242.2} = 0.74 > 0.7$$



B.- envolvente.



Nota: La figura no muestra la localización de la soldadura necesaria.

- D = 122 cm
- Ty = 1.111 cm
- Tr = 0.736 cm
- d = 91.44 cm
- ty = 0.95 cm
- tr = 0.542 cm
- $\Delta = 90^\circ$
- v = 161 cm
- w = 35 cm
- T = 0.95 cm

Figura 4.2 Detalle de refuerzo en ramal de $\varnothing = 91.44$ cm. a 90°

Dado que el VPD se encuentra entre 700 y 1,050 N/mm, y que d_e/D_e es mayor de 0.7, de la Tabla 6.5 se concluye que el tipo de refuerzo a utilizar es la envolvente.

b) Determinación del factor de ampliación del refuerzo (Tabla 6.5)

$$M = 0.0014 \text{ VPD} = 0.0014(989.60) = 1.385$$

c) Diseño de la envolvente.

Determinación del espesor requerido (ramal)

$$t_r = \frac{Pd_e}{2f_s} = \frac{1.47(914.4)}{2(121)} = 5.55 \text{ mm}$$

Cálculo de la sección removida del cabezal (A_3)

$$A_3 = (MT_r(d_e - 2t_y))/(\text{sen}\Delta) \quad (6.44)$$

$$A_3 = [1.385(7.54)(914.4 - 2(9.5))]/(\text{sen } 1.57)$$

$$A_3 = 9,351 \text{ mm}^2$$

Determinación del área de exceso en el espesor del cabezal A_2

$$A_2 = (d_e - 2t_y)(T_y - T_r)/(\text{sen}\Delta) \quad (6.45)$$

$$A_2 = ((914.4 - 2(9.50))(11.11 - 7.54))/(\text{sen } 1.57)$$

$$A_2 = 3,197 \text{ mm}^2$$

Determinación del área de exceso en el espesor del ramal (A_1)

$$A_1 = (5t_y(t_y - t_r))/(\text{sen}\Delta) \quad (6.46)$$

$$A_1 = (5(9.50)(9.50 - 5.55))/(\text{sen } 1.57)$$

$$A_1 = 188 \text{ mm}^2$$

Determinación del área requerida.

$$A_4 = A_3 - A_2 - A_1 = 2wT \quad (6.43)$$

$$A_4 = 9,351 - 3,197 - 188 = 5,966 \text{ mm}^2$$

$$2wT = 5,966 \text{ mm}^2$$

Determinación de las dimensiones del refuerzo (envolvente).

$$w = (0.33d_e) / (\text{sen}\Delta) \text{ (mínima dimensión de } w)$$

$$w = (0.33(914.4)) / (\text{sen } 1.57)$$

$$w = 302 \text{ mm} \approx 350 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor mínimo } T = \frac{A_4}{2w} = \frac{5,966}{2(350)} = 8.50 \text{ mm} \approx 9.5 \text{ mm} \left(\frac{3''}{8} \right)$$

$$A_4 = 2wT = 5,966 \text{ mm}^2$$

$$W = (2w + d_e) / \text{sen}\Delta = (2(350) + 914.4) / (\text{sen } 1.57) = 1,614 \text{ mm}$$

Para el ramal de 914.4 mm de diámetro a $\pi/2$ rad (90°), se requiere refuerzo de envolvente de un ancho de 1614 mm y espesor de placa de 9.5 mm.

5. OBRAS ESPECIALES

5.1. GENERALIDADES

En el presente capítulo se analizan las situaciones particulares en el acueducto del ejemplo, como son cruces con caminos, vías de ferrocarril y barranca con río en el fondo. En las secciones de cruces con caminos y ferrocarril es, práctica común utilizar una camisa de acero protectora, por lo tanto se analizarán la deflexión y pandeo en la pared de la camisa. En los cruces con barranca se emplean atraques de concreto para contener los empujes provocados por la pendiente y cambio de dirección, por lo que se calcula el valor del empuje en el primer atraque así como en el fondo del cauce la socavación probable y el lastre requerido en la tubería para su estabilidad hidrodinámica. Por último, se ilustra en un plano la señalización recomendada y los sitios convenientes a instalarse para dar protección y mantenimiento al acueducto.

5.2. CRUCE CON CARRETERA

En el Kilómetro 49 + 153.9 (ver Dibujo Numero 5.1) se tiene un cruce con carretera. En esta sección se calcula la carga transmitida al ducto, debida al peso del relleno, enseguida la carga viva transmitida por el rodamiento del vehículo HS-20, y por rodamiento de maquinaria y equipo. Por último, se revisa la deflexión vertical y pandeo, por la combinación más crítica del peso del suelo con la carga viva sobre la pared de la camisa protectora del acueducto.

5.2.1. Carga muerta provocada por el peso de relleno

Se revisa la carga muerta provocada por el peso del relleno sobre una camisa protectora para una tubería de 1.392 m de diámetro exterior y 11.11 mm de espesor, enterrada en zanja. La altura del relleno a partir del lomo superior de la tubería es de 2.00 m en el cruce en caminos. El ancho de la zanja es de 2.00 m. El relleno es de arcilla con una masa volúmica de 15,916 N/m³

Cálculo de la carga en cruce con camino:

$$W_c = C_d \rho_{re} d_e B_d \quad (5.5)$$

Datos:

$$\begin{aligned} \rho_{re} &= 15,916 \text{ N/m}^3 \text{ (masa volúmica del relleno)} \\ d_e &= 1.392 \text{ m (diámetro exterior de la tubería)} \\ B_d &= 2.25 \text{ m (ancho de la trinchera)} \\ h_r &= 2.00 \text{ m (altura del relleno)} \end{aligned}$$

$$B_d = \frac{4}{3} d_e + 0.40 = \frac{4}{3} (1,392) + 0.40 = 2.26 \text{ m} \quad (10.1)$$

$$\frac{h_r}{B_d} = \frac{2.00}{2.26} = 0.88$$

de la Figura 5.5, $C_d = 0.8$

$$W_c = (0.80)(15.916)(1.392)(2.26) = 40,056.40 \text{ N/m}$$

5.2.2. Carga viva por tránsito de vehículos en la superficie

Para el cruce con carretera en el Kilómetro 49 + 153.9, se calculará la carga sobre una camisa de acero de 1.392 m de diámetro exterior y 11.11 mm de espesor. La altura del relleno es de 2.00 m. La carga es la producida por un vehículo HS-20.

De acuerdo a los valores propuestos por la AASHTO, de la Tabla 5.3 e interpolando para una altura de 2.00 m, se obtiene una carga de:

$$P_H = 8.887 P_a$$

y una carga por unidad de longitud de:

$$W_L = (8.887)(1.392) = 12,370.70 \text{ N/m}$$

el valor anterior se aplica tanto para caminos de terracería como para pavimentos.

5.2.3. Carga viva por maquinaria y equipo

La carga viva por maquinaria y equipo pesado se tomará en cuenta sólo cuando el camino esté en construcción y se espere que sobre él circule equipo pesado. Se desarrolla aquí este caso a manera de ejemplo.

En el cruce con la carretera en el Kilómetro 49 + 153.9, se evaluará la carga sobre una tubería transmitida por el paso de un cargador EUCLID, el cual tiene una carga puntual de 188.288 N por un par de llantas en un área de 1.10 por 0.61 m. El diámetro de la camisa protectora es de 1.392 m y su espesor de 11.11 mm. La profundidad de enterrado es de 2.00 m.

El valor de la carga sobre la tubería está dado por:

$$P_H = C_T(4)P_s \quad (5.12)$$

Dato:

$$P_s = 188.288 / (1.10 \times 0.61) = 280.608 \text{ Pa}$$

El coeficiente de influencia para áreas rectangulares se obtiene de la Tabla 5.2, con los siguientes datos, y dividiendo el área en cuatro áreas iguales:

$$m = \frac{A}{h_r} = \frac{0.55}{2.00} = 0.275$$

$$n = \frac{B}{h_r} = \frac{0.305}{2.00} = 0.153$$

Por lo que: $C_T = 0.026$.

$$P_H = (0.026)(4)(280.608) = 29.183 \text{ Pa}$$

La carga por unidad de longitud se obtiene:

$$W_L = P_H d_e = (29.183)(1.392) = 40,623 \text{ N/m} \quad (5.13)$$

5.2.4. Determinación de la deflexión vertical y pandeo

Se revisará la deflexión vertical y pandeo debido al peso del relleno más la carga transmitida por los vehículos H-20.

a) Deflexión n vertical en la camisa al cruzar el camino:

$$W_c = 40.056 + 12,70.70 = 52,426.70 \text{ N/m} = 52.427 \text{ N/mm}$$

$$r = 1.392/2 = 0.696 \text{ m} = 696 \text{ mm}$$

$$\Delta_c = \frac{D_1 K W_c r^3}{EI + 0.061 E' r^3} \quad (6.7)$$

$$\Delta_c = \frac{(1.25)(0.1)(52.427)(696)^3}{(205.940)(114.3) + (0.061)(8.83)(696)^3} = 10.7 \text{ mm}$$

b) Pandeo

$$P_v + \gamma_w h_w + R_w \frac{W_c}{d_e} + \frac{W_L}{d_e} \leq q_a \quad (6.8)$$

Como no hay nivel de aguas freáticas $\gamma_w h_w = 0$ y $R_w = 1$

La presión interna de la tubería es mayor que la atmosférica y no se presenta vacío $P_v = 0$

$$R_w \frac{W_c}{d_e} + \frac{W_L}{d_e} = \left((1) \frac{40.056}{1.392} \right) + \left(\frac{12,370.70}{1.392} \right) = 37,662.86 \text{ Pa} = 0.038 \text{ MPa}$$

para el cruce del camino

c) Criterios límites de aceptación (ver sección 6.3.3 del manual)

Deflexión permisible = 5 % d = 0.05x1.392 = 69.6 mm > 10.7 mm (camisa)

Carga de pandeo permisible = q_a

$$q_a = \frac{1}{F \cdot S} \left(\frac{32R_w B' E' EI}{d_e^3} \right)^{1/2} \quad (6.9)$$

$$B' = \frac{1}{1 + (4e^{-0.2133h})} \quad (6.10)$$

Datos:

$h_r = 2.0$ m (altura del nivel del terreno al lomo de la tubería)

$R_w = 1$ (factor de flotación)

$h_r/d_e = 2.0/1.390 = 1.44 < 2 \Rightarrow F \cdot S = 3$

$$B' = \frac{1}{1 + (4e^{-0.2133(2.0)})} = 0.2769$$

$$q_a = \frac{1}{3} \left(\frac{32(1)(0.2769)(8.83)(205.940)(114.3)}{1.392^3} \right)^{1/2} = 0.28 \text{ MPa}$$

$$0.037 \text{ MPa} < q_a = 0.28 \text{ MPa}$$

$$q_a = 0.28 \text{ MPa}$$

Por lo que no se presentan problemas por pandeo.

5.3. CRUCE CON FERROCARRIL

5.3.1. Carga viva por tránsito de ferrocarriles en la superficie

Para el cruce con la vía de ferrocarril en el Kilómetro, 39 + 601, se calculará la carga sobre una camisa de acero de 1.392 m de diámetro, exterior y 11.11 mm de espesor. La altura del relleno es de 2.00 m. La carga es la producida por una locomotora COOPER" E-80.

De acuerdo a los valores propuestos por la AASHTO, interpolando los valores de la Tabla 5.3, se obtiene una carga de 94,487 Pa, por lo que:

$$W_L = P_H d_e \quad (5.11)$$

$$P_H = 94.487 \text{ Pa}$$

Tabla (5.3)

$$W_L = (94.487) (1.392) = 131.526 \text{ N/m}$$

5.3.2. Determinación de la deflexión vertical y pandeo

La tubería al cruzar la vía de ferrocarril utiliza una camisa de acero, API-51-Gr B de diámetro interior 1.392 cm y espesor 11.11 mm y a una profundidad por encima de la camisa de 2.0 m. A esto corresponde una carga del suelo de 39.874 N/m (ver ejemplo 5.2.1) y una carga viva del ferrocarril de 131.517 N/m, el módulo de reacción del suelo es de 8.83 MPa.

a) Determinación de la deflexión (ver sección 6.3.1 del manual)

$$\Delta_c = \frac{D_1 K W_c r^3}{EI + 0.061 E' r^3} \quad (6.7)$$

Datos:

$$\begin{aligned} D_1 &= 1.25 \text{ (factor de retardo)} \\ K &= 0.1 \text{ (constante de apoyo)} \\ E' &= 8.83 \text{ MPa} \\ d_e &= 1.392 \text{ m} = 1.392 \text{ mm} \\ W_c &= 40.056 + 131.526 = 171.582 \text{ N/m} = 171.6 \text{ N/mm} \\ r &= 1.392/2 = 696 \text{ mm} \\ I &= t^3/12 = 11.11^3/12 = 114.3 \text{ mm}^4/\text{mm} \\ E &= 205.940 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\Delta_c = \frac{(1.25)(0.1)(171.6)(696)^3}{(205.940)(114.3) + (0.061)(8.83)(696)^3} = 35.25 \text{ mm}$$

$d_c = 3.52 \text{ cm}$ en la camisa al cruzar el FF.CC

b) Pandeo

$$P_v + \gamma_w h_w + R_w \frac{W_c}{d_e} + \frac{W_L}{d_e} \leq q_a \quad (6.8)$$

Datos:

$$\begin{aligned} P_v &= 0 \text{ (presión interna del tubo mayor que la atmosférica)} \\ \gamma_w h_w &= 0 \text{ (no hay nivel de aguas freáticas a esa profundidad)} \\ R_w &= 1 \\ W_c &= 40,056 \text{ N/m} \\ W_L &= 12,370.70 \text{ N/m} \\ d_e &= 1.392 \text{ m} \end{aligned}$$

$$R_w \frac{W_c}{d_e} + \frac{W_L}{d_e} = \left((1) \frac{40.056}{1.392} \right) + \left(\frac{131.526}{1.392} \right) = 123.263 \text{ Pa} = 0.12 \text{ MPa}$$

para el cruce del fcc

c) Criterios límites de aceptación (ver sección 6.3.3 del manual)

Deflexión permisible = 5 % d = 0.05x1.392 = 69.6 mm > 35.2 mm (camisa)

Carga de pandeo permisible q_a

$$q_a = \frac{1}{F \cdot S} \left(\frac{32 R_w B' E' E I}{d_e^3} \right)^{1/2} \quad (6.9)$$

$$B' = \frac{1}{1 + (4e^{-0.2133h})} \quad (6.10)$$

$$\begin{aligned} R_w &= 1.0 \\ H &= 2.0 \end{aligned}$$

$$B' = \frac{1}{1 + (4e^{-0.2133(2.0)})} = 0.2769$$

$$\frac{h_r}{d_e} = \frac{2.00}{1.392} = 1.44 < 2 \Rightarrow F \cdot S = 3$$

$$q_a = \frac{1}{3} \left(\frac{32(1)(0.2769)(8.83)(205.940)(114.3)}{1.392^3} \right)^{1/2} = 0.28 \text{ MPa}$$

$$0.12 \text{ MPa} < q_a = 0.28 \text{ MPa}$$

$$2.573 \text{ kg/m}^2 < 28.760 \text{ kg/m}^2$$

5.3.3. Cruce con perforación horizontal

Cuando por alguna razón no se pueda cruzar una autopista o una vía de ferrocarril con el procedimiento de zanja a cielo abierto, se puede utilizar un procedimiento conocido como perforación horizontal, en el cual no se afecta la circulación vehicular o del ferrocarril. El procedimiento consiste, en términos generales, en habilitar una zona de trabajo a ambos lados de la vía, en la cual se colocará una perforadora horizontal, al cual perforará el terreno con una barrena de 20 o 30 mm mayor al diámetro del tubo protector, dependiendo del tipo de terreno. La misma perforadora empujará el tubo paralelamente o en etapas de 200 a 300 mm hasta llegar al otro extremo. El material producto de la perforación se retira por el interior del tubo. Una vez instalada la camisa protectora, la tubería conductora (en la cual previamente se colocaron los aisladores de neopreno) se deslizará en el interior. El procedimiento permite darle al tubo tanto la pendiente como el ángulo de cruzamiento de proyecto. En cruces donde se requiere varios tramos de tubería, se procede a colocar tramo

por tamo, suspendiendo la perforación para soldar los tramos y continuar con la perforación. Dado que la camisa protectora se coloca de una manera suave, el tubo no requiere de ninguna revisión especial.

Al emplear este procedimiento es necesario conocer las características del suelo, ya que dependiendo del terreno se seleccionará la barrena a utilizar. En un suelo blando, generalmente se ocupará una punta triangular, ya que dicha forma permite que el material salga sin atorarse. En suelos rocosos se podrán usar una barrena de dientes con puntas de tuxteno o diamante. Otro tipo que se debe de considerar es la barrena circular con punta helicoidal.

5.3.4. Cruce con el método de hincado

Otro método para cruzar una autopista o vía de ferrocarril, cuando se quiere evitar abrir la zanja a cielo abierto, es el método de hincado, en el cual la tubería de encamisado se hinca mediante el empleo de gatos hidráulicos. En este método se requiere determinar la fuerza requerida para el hincado, el esfuerzo crítico de "arrugamiento" y el esfuerzo por hincado. A continuación se ejemplifica este procedimiento para el caso de suelos arenosos y para el caso de suelos arcillosos.

HINCADO EN SUELOS ARENOSOS

a) Determinación de la fuerza de hincado

$$Ff_r = K_o W \tan U$$

$$W = (W_c + W_L) / D_e$$

Datos:

Ff_r = Fuerza de fricción, N/m^2

K_o = 0.6, coeficiente de empuje de tierras (varía de 0.4 para arenas más sueltas a 0.6 para arenas más compactas)

U = $20^\circ = 2/3 \phi$

ϕ = 30° , ángulo de fricción interna del suelo

W = Carga total sobre la tubería, N/m^2

W_c = 40.056 N/m (carga debida al peso del relleno, de 5.2.1)

W_L = 131.526 N/m (carga viva debida al ferrocarril, de 5.3.1)

d_e = 1.392 m (diámetro exterior de la camisa)

$$W = (40.056 + 131.526) / 1.392 = 123.263 \text{ Pa}$$

$$Ff_r = (0.6)(123.263)(\tan 20^\circ) = 26.918 \text{ Pa}$$

Considerando una longitud de camisa de 12 m, la fuerza de hincado será:

$$F_h = L d_e \pi F_f$$

Datos:

- F_h = Fuerza de hincado, N
- L = 12 m, longitud de la camisa
- D_e = 1.392 m, diámetro exterior de la camisa
- F_f = 26.918 Pa, fuerza de fricción

$$F_h = (12)(1.392)(\pi)(26.918) = 1,412.580 \text{ N}$$

b) Esfuerzo crítico de arrugamiento

De la teoría de pandeo de recipientes cilíndricos de acero, se obtiene la siguiente expresión:

$$f_c = 0.26 \left(\frac{0.6Et}{r} \right)$$

Datos:

- f_c = Esfuerzo crítico de arrugamiento, MPa
- E = 205.940 MPa, (modulo de elasticidad del acero)
- T = 11.11 mm, (espesor de pared de la camisa)
- R = 696 mm, (radio de la tubería)

$$f_c = 0.26 \left(\frac{0.6(205.940)(11.11)}{696} \right) = 512.83 \text{ MPa}$$

c) Esfuerzo por hincado

$$f_h = \frac{F_h}{d_e \pi t}$$

Datos:

- f_h = Esfuerzo por hincado, MPa
- d_e = 1.392 mm, (diámetro exterior de la camisa)
- t = 11.11 mm, (espesor de pared de la camisa)
- F_h = 1,412.580 N, (fuerza de hincado)

$$f_h = \frac{1,412.580}{(1.392)(\pi)(11.11)} = 29.07 \text{ MPa}$$

Dado que el esfuerzo por hincado es mucho mayor que el esfuerzo crítico por arrugamiento, $f_h \ll f_c$, se concluye que la camisa no tiene ningún problema por hincado.

HINCADO EN SUELOS ARCILLOSOS

a) Determinación de la fuerza de hincado

$$F_h = L d_e \pi C$$

Datos:

- F_h = Esfuerzo por hincado, N
- L = 12 m, (longitud de hincado)
- d_e = 1.392 m, (diámetro exterior de la camisa)
- C = 44.130 Pa (se propone)

$$F_h = (12)(1.392)(\pi)(44.130) = 2,315.817 \text{ N}$$

b) Esfuerzo critico de arrugamiento

$$f_c = 0.26 \left(\frac{0.6Et}{r} \right)$$

$$f_c = 0.26 \left(\frac{0.6(205.940)(11.11)}{696} \right) = 512.83 \text{ MPa}$$

c) Esfuerzo por hincado

$$f_h = \frac{F_h}{d_e \pi t}$$

$$f_h = \frac{2,315.817}{(1.392)(\pi)(11.11)} = 47.70 \text{ MPa}$$

$$f_h = 47.70 \text{ MPa} < f_c = 512.83 \text{ MPa}$$

Dado que el esfuerzo por hincado es mucho menor que el esfuerzo crítico por arrugamiento, $f_h \ll f_c$, se concluye que la camisa no tiene ningún problema por hincado.

5.4. CRUCE CON BARRANCA Y RÍO

5.4.1. Determinación de las fuerzas que actúan en un atraque ocasionadas por el cambio de dirección de la tubería.

Se tiene en el tramo del Kilómetro 12 + 900 al 13 + 050 una tubería de acero API-5L Gr B de 1.220 mm de diámetro interior y 12.7 mm de espesor, lleva una pendiente $s = 0.05$ y al cruzar la barranca cambia a 0.47, la columna de agua es de 2.36 MPa y la masa volúmica del agua es de $9,806.65 \text{ N/m}^3$.

Fuerza por presión debida al cambio de dirección.

La magnitud de la fuerza está dada por la siguiente expresión (Ver Figura 5.1):

$$F_r = (2AP_i) \operatorname{sen}\left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (5.4)$$

Donde:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(1.22)^2}{4} = 1.169 \text{ m}^2 = 1,169.000 \text{ mm}^2$$

Datos:

$$P_i = 2.36 \text{ MPa}$$

$$\Delta = \operatorname{Ang} \tan 0.47 - \operatorname{Ang} \tan 0.05 = 0.44 - 0.05 = 0.39 \text{ rad}$$

$$F_r = (2)(1,169.000)(2.36) \operatorname{sen}\left(\frac{0.39}{2}\right) = 1,069.142 \text{ N}$$

La posición del ángulo con la horizontal es:

$$\alpha = \frac{\theta}{2} = 0.05$$

$$\alpha = \frac{0.05 + 1.57 + 1.13}{2} - 0.05 = 1.33 \text{ rad}$$

Por lo que el atraque debe diseñarse, para resistir una fuerza de 1,069.142 N, la cual guarda un ángulo de 1.33 rad con respecto a la horizontal.

Por lo que el atraque debe diseñarse para resistir una fuerza de 703.882 N. que guarda un ángulo de 1.048 rad con la horizontal.

5.4.2. Socavación en el cauce del río (km 13+050 al 13+397)

El problema consiste en calcular la erosión máxima que se puede presentar en el río al pasar la avenida, la cual corresponderá a una frecuencia de retorno. El gasto máximo de diseño se determina a partir de los datos de un boletín hidrológico, mediante la aplicación de algún método empírico o estadístico.

El material del fondo del cauce es granular y está distribuido en forma homogénea. La determinación de la erosión se hará para un gasto de 1,500 m³/s, el cual corresponde a una frecuencia de 100 años. La sección transversal antes de ocurrir la avenida se muestra en la Figura 5.2. Cuando ésta se presente, la superficie del agua alcanzará la elevación 105. Del análisis de las muestras tomadas a distintas profundidades según se indica en la Figura 5.2, resultó el valor del diámetro medio $d_m = 0.36$ mm. El ancho de la superficie es de 152 m. El área hidráulica de la sección es de 654.16 m².

El coeficiente de distribución del gasto se obtiene:

$$\alpha = \frac{Q_d}{H_m^{5/3} B_e} \quad (7.2)$$

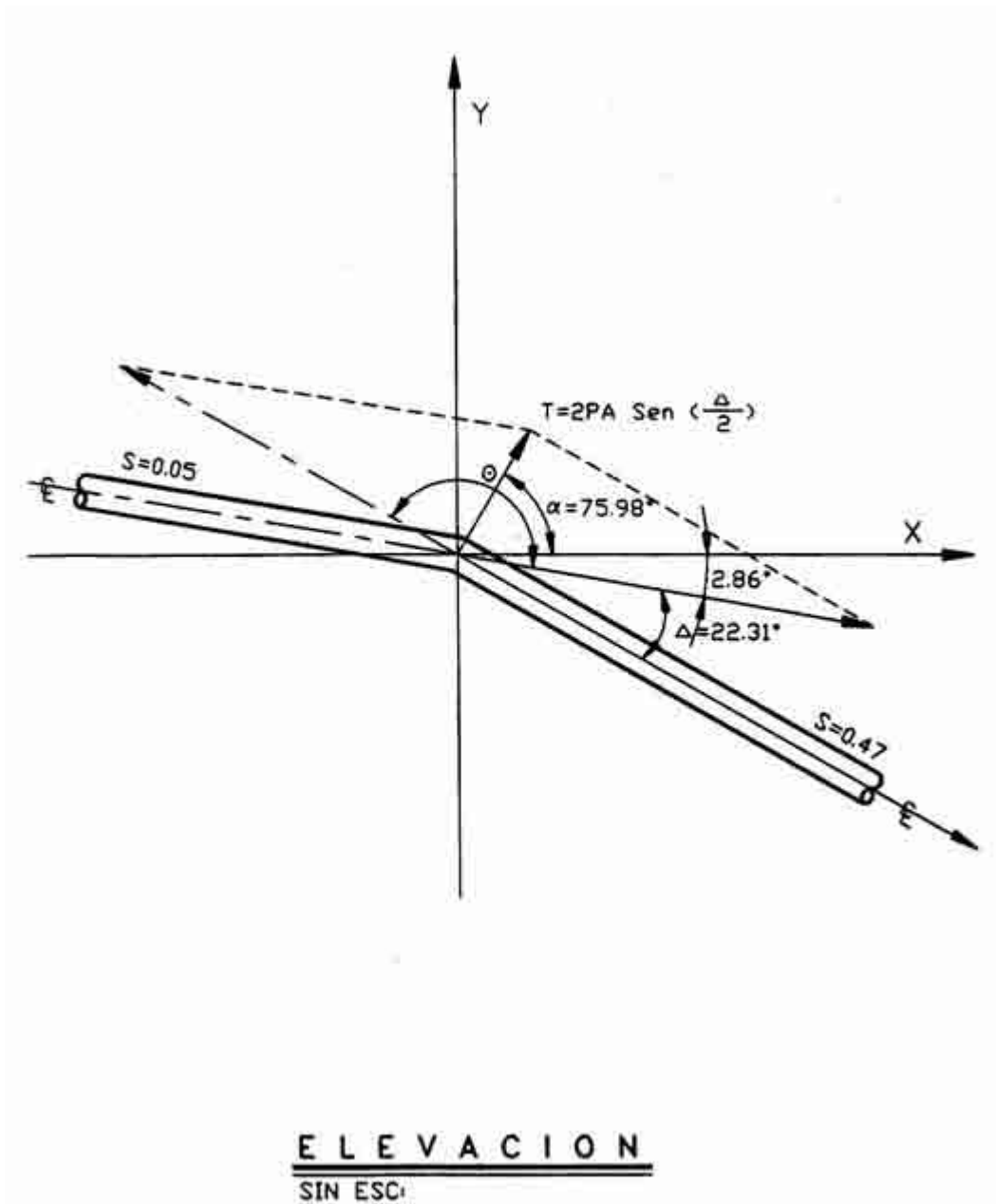


Figura 5.1 Fuerza por presión debida, al cambio de dirección

Datos:

- $Q_d = 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ (gasto de diseño)
- $B_e = 152 \text{ m}$ (ancho de la superficie)
- $H_m = \text{tirante medio de la sección}$
= área hidráulica / ancho de superficie

$$H_m = \frac{654.16}{152} = 4.30 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{1.500}{(430)^{\frac{5}{3}}(152)} = 0.868 \text{ m}$$

La variación de la profundidad de la erosión para suelos homogéneos y no cohesivos.

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_o^{\frac{5}{3}}}{0.68 \beta d_m^{0.28}} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

Datos:

- H_o = tirante antes de la socavación
- β = 1.00, (coeficiente de paso de la Tabla 7.1)
- x = 0.414, (por interpolación de la Tabla 7.2)

$$1/(1+x) = 0.707$$

$$H_s = (1.70)^{0.71} \times (H_o)^{1.18}$$

$$H_s = 1.457 H_o^{1.18}$$

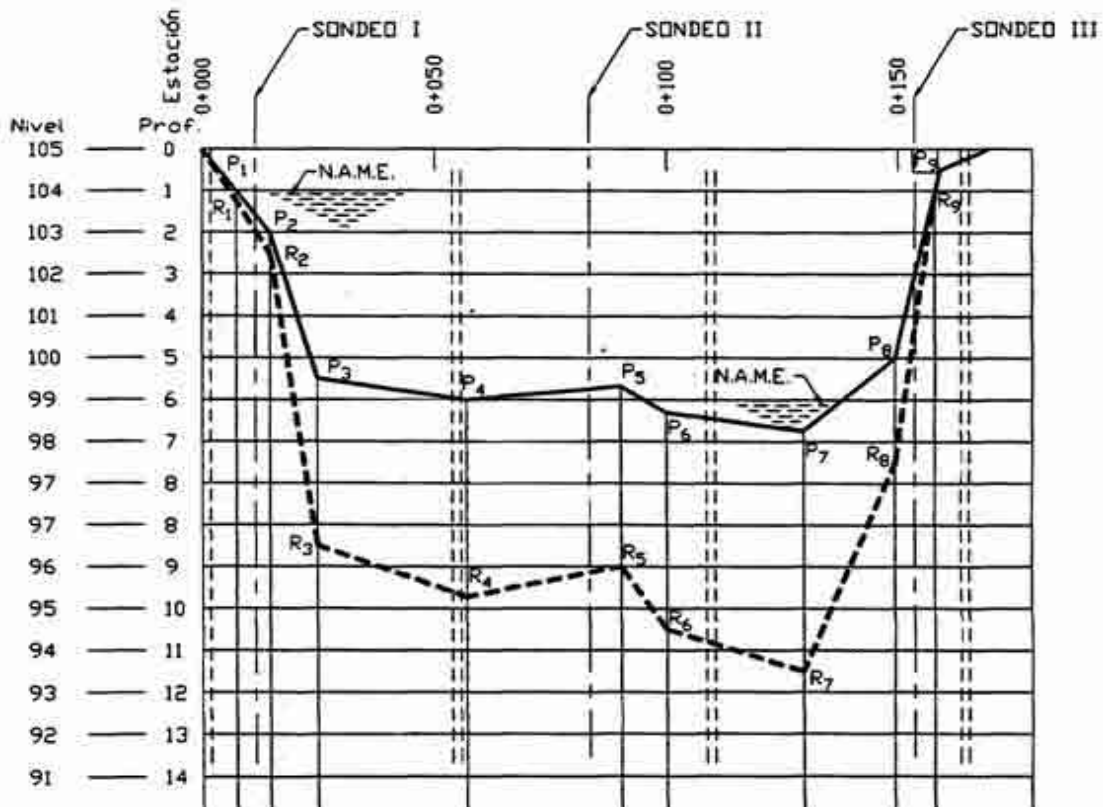


Figura 5.2 Sección transversal del río

Para diferentes profundidades H_o iniciales del fondo, se obtienen sus correspondientes profundidades H_s de socavación, que al unirlos definirán el nuevo perfil teórico del fondo producido por la socavación.

H_o	$H_o^{1.18}$	H_s
2	2.266	3.30
3	3.656	5.33
4	5.134	7.48
5	6.680	9.73
6	8.284	12.07
7	9.936	14.48

5.4.3. Lastre de concreto en el cruce con el río

Se tiene la tubería de 1.22 m de diámetro interior y 1.905 cm de espesor, la cual cruzará el río de manera enterrada. Se requiere saber el espesor y la densidad del lastre de concreto para que la tubería permanezca estable por flotación. El espesor del recubrimiento anticorrosivo es de 3.96 mm y su densidad es de $1,842.5 \text{ kg/m}^3$ ($18,068.70 \text{ N/m}^3$).

La fuerza de flotación se obtiene de la siguiente expresión:

$$F_B = 0.079(D_e + 2t_r + 2t_c)^2 \quad (7.4)$$

Datos:

- D_e = 125.8 cm (diámetro exterior de la tubería)
- t_r = 0.396 cm (espesor de recubrimiento anticorrosivo)
- t_c = inicialmente cero = espesor de lastre de concreto

$$F_B = 0.079(125.8 + 2(0.396))^2 = 1.266 \text{ kg/m} (12.415 \text{ N/m})$$

El peso sumergido de la tubería se obtiene considerando que la tubería está vacía, ya que es la condición más crítica, por lo que:

$$W_T = \text{masa tubo} + \text{masa recubrimiento} + \text{masa del concreto}$$

$$W_T = 582.18 + 28.93 = 611.11 \text{ kg/m} (5.993 \text{ N/m})$$

Dado que el peso sumergido es menor que la fuerza de flotación, se propone un lastre de concreto de 7.62 cm, por lo que la nueva fuerza de flotación será:

$$F_B = 0.079(125.8 + 2(0.396) + 2(7.62))^2 = 1,589.19 \text{ kg/m} (15.585 \text{ N/m})$$

y el nuevo peso sumergido considerando una densidad de concreto de 2.200 kg/m^3 (21.575 N/m^3).

$$W_T = 582.18 + 28.93 + 707 = 1,318.11 \text{ kg/m (12,926.24 N/m)}$$

Debido a que el peso sumergido sigue siendo menor que la fuerza de flotación, ahora se propone un espesor de lastre de concreto de 12.7 cm.

$$F_B = 0.079(125.8 + 2(0.396) + 2(12.7))^2 = 1.825 \text{ kg/m (17.897 N/m)}$$

$$W_T = 582.18 + 28.93 + 960 = 1,571.11 \text{ kg/m (15.407 N/m)}$$

Proponiendo un espesor de lastre de concreto de 16.51 cm.

$$F_B = 0.079(125.8 + 2(0.396) + 2(16.51))^2 = 2,012.60 \text{ kg/m (19.737 N/m)}$$

$$W_T = 582.18 + 28.93 + 1,633.37 = 2,244.48 \text{ kg/m (22.011 N/m)}$$

El factor de seguridad se obtiene:

$$F_s = \frac{W_T}{F_B} = \frac{2,244.48}{2,012.60} = 1.12$$

El factor de seguridad F_s es ligeramente mayor del 1.1 recomendado, por lo que se acepta el lastre de concreto de 16.51 cm de espesor y $2,200 \text{ kg/m}^3$ ($21,575 \text{ N/m}^3$) de densidad para garantizar la estabilidad de la tubería por flotación.

5.5. SEÑALIZACIÓN

Con el propósito de prevenir accidentes, cada proyecto de líneas de conducción de agua deberá incluir un plano de señalización, en el cual como mínimo se indicarán los señalamientos de tipo restrictivo, aplicables a cualquier tipo de cruces con obras especiales como son: carreteras, vías de ferrocarril, canales, arroyos, etc. El Dibujo Numero 5.3 muestra las características que deben cumplirse para el señalamiento de la línea en este tipo de cruces.

6. CORROSIÓN

Se desarrollará el diseño de la protección catódica para la línea de conducción de 1,220 mm de diámetro indicada en la introducción.

Los datos generales de la tubería son los siguientes:

Diámetro	d = 1,220 mm (48 pulg)
Longitud total	L = 80 Km
Longitud enterrada	L = 76 Km

Recubrimiento anticorrosivo empleado; esmalte de alquitrán de hulla aplicado en caliente, con un espesor de 2.38 mm (3/32 pulg), probado eléctricamente en el 100% de su área a un voltaje de 12,000 Volt C.D.

La tubería es soldada, por lo tanto, es eléctricamente continua, en la zona enterrada la tubería se protegerá catódicamente, mientras que a la parte aérea se aplicará una pintura anticorrosiva.

El desarrollo de la tubería se muestra esquemáticamente en la Figura 6.1.

Durante la construcción se instalaron a lo largo de la tubería postes para señalamiento y registro de potenciales de protección catódica. Estos postes están instalados uno a cada kilómetro (sus características se pueden ver en las Figuras 6.2, 6.3 y 6.4).

Solución:

Se tomaron potenciales naturales tubo - suelo en los postes de registro, obteniéndose los siguientes valores:

Km	(P/S)n
0+000	-0.400
4+000	-0.420
21+000	-0.420
32+000	-0.440
48+000	-0.450
53+000	-0.420
62+000	-0.420
75+000	-0.410
80+000	-0.410

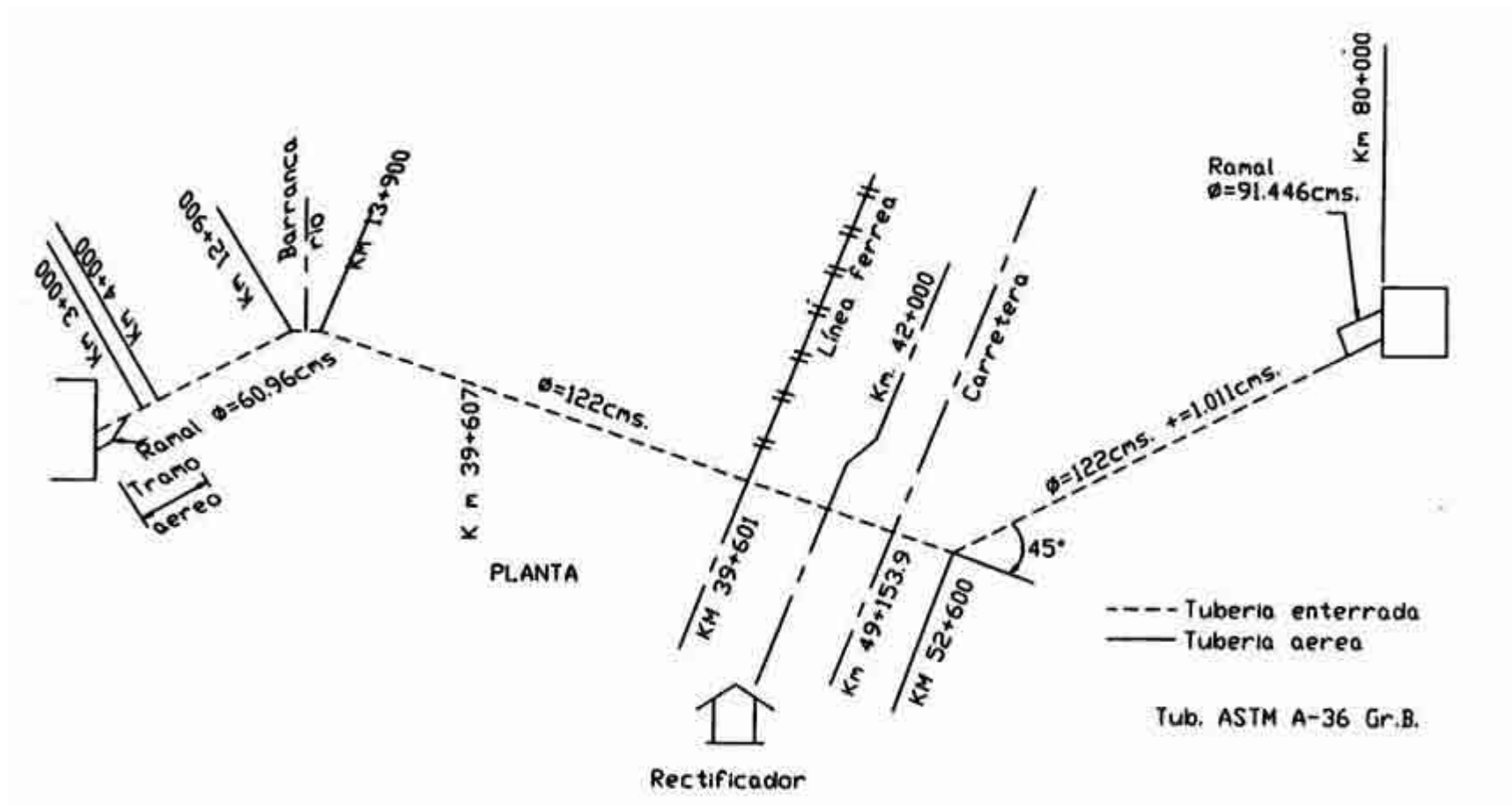


Figura 6.1 Esquema protección catódica Acueducto Lago de Chapala - Guadalajara, Jalisco

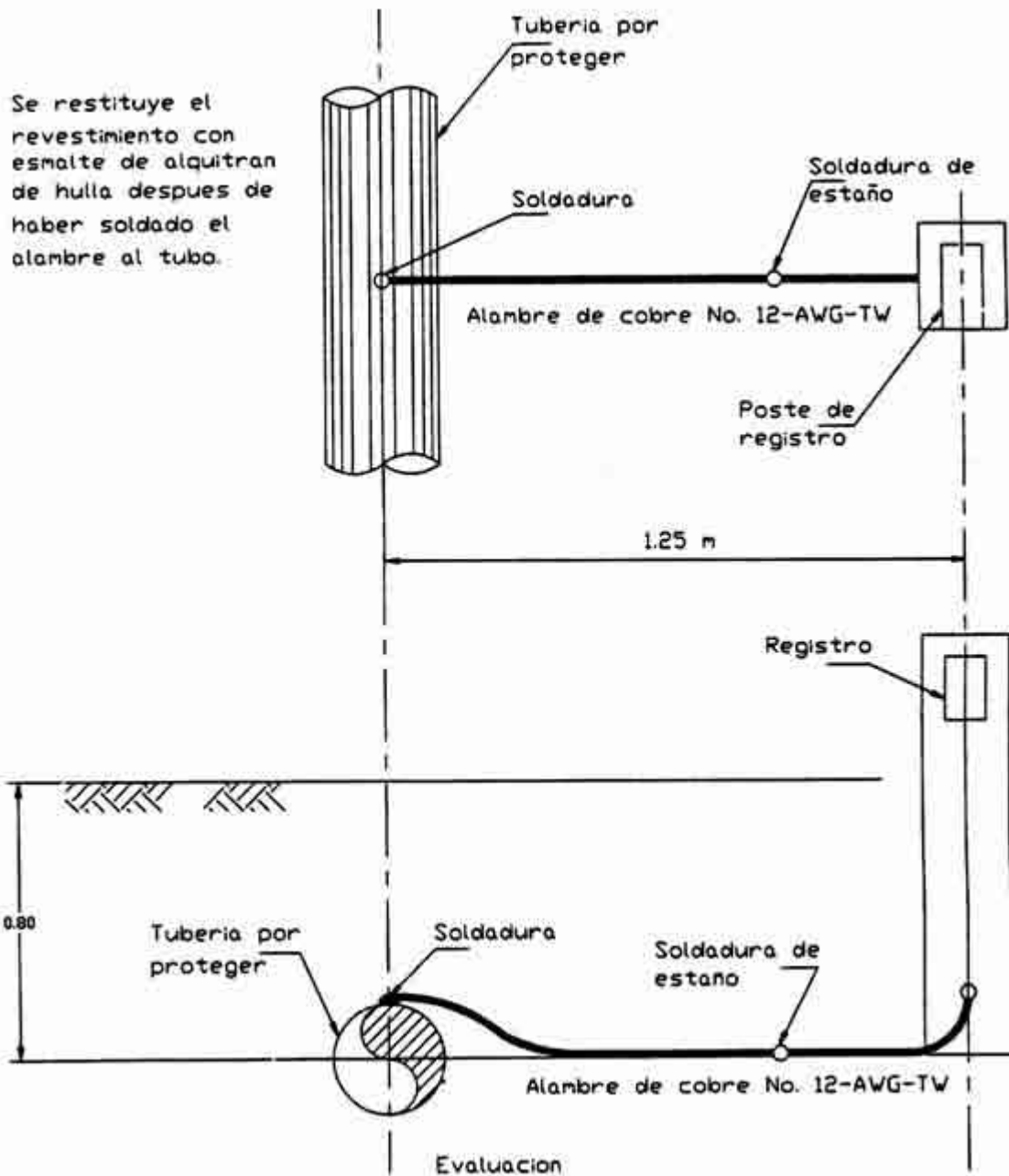


Figura 6.2 Esquema de poste de registro de potenciales tubo-suelo

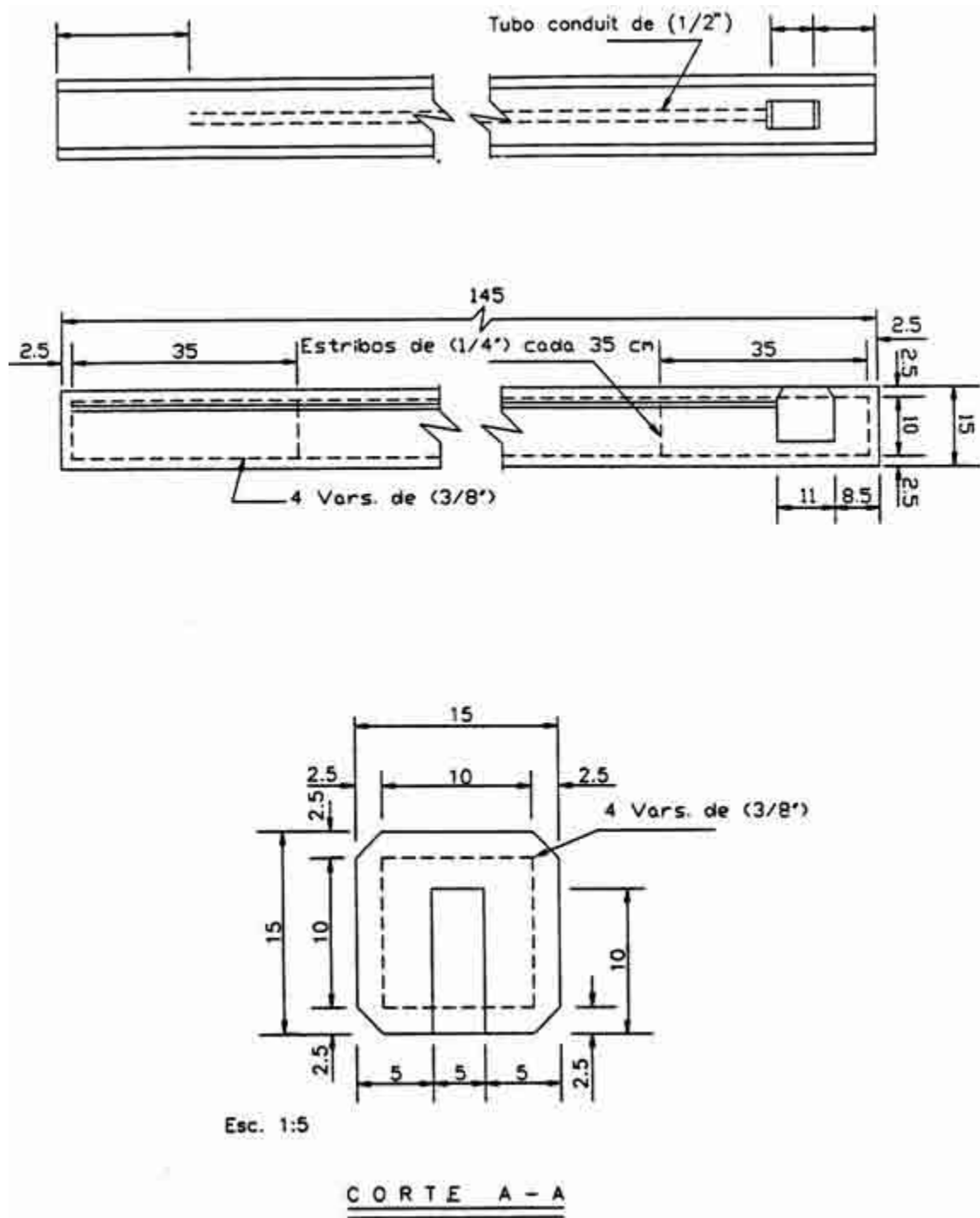


Figura 6.3 Dimensiones generales de poste de registro de potenciales tubo - suelo

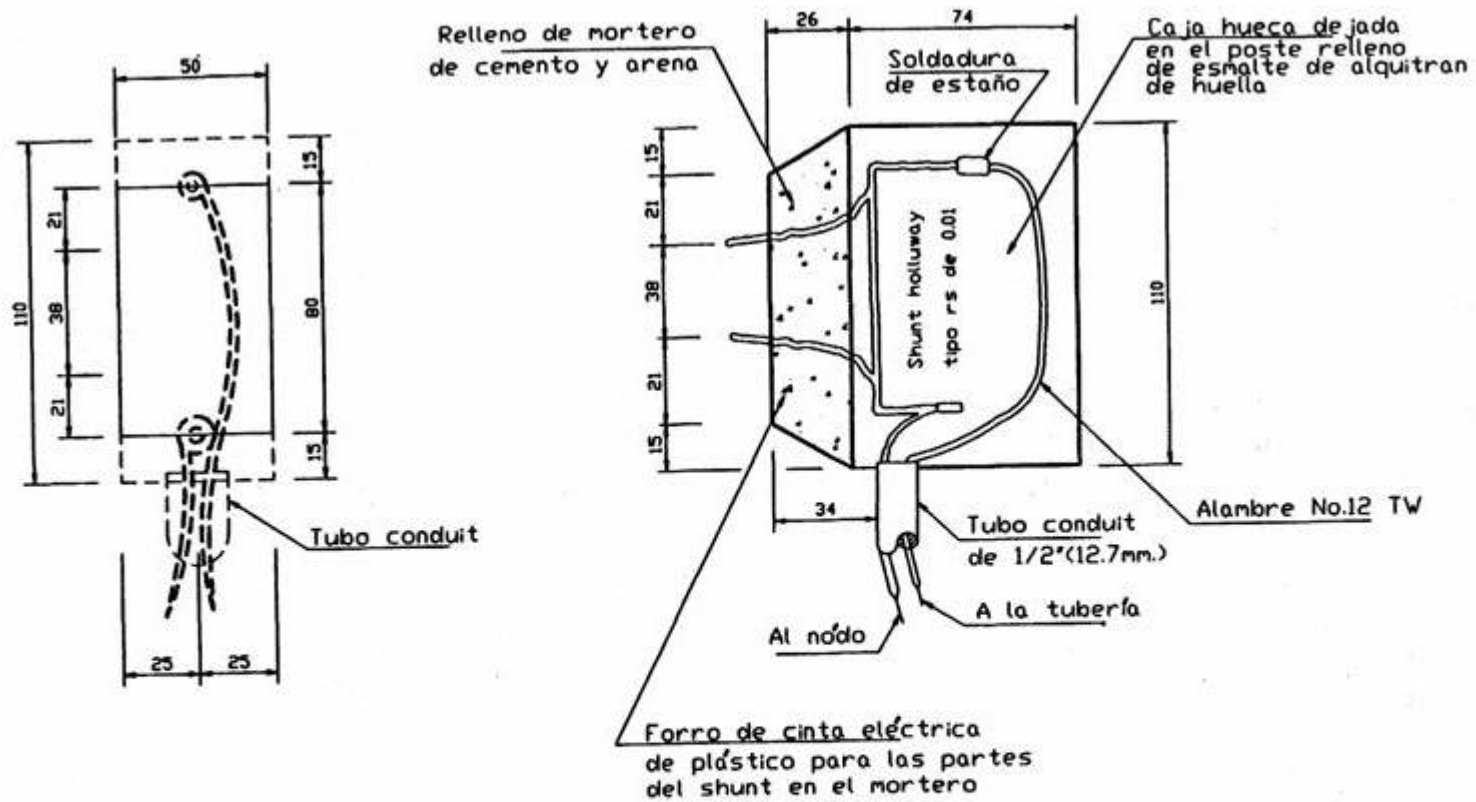


Fig.6.4 Dispositivo de conexión y medición en poste de registro

Acotaciones en mm.

Nota:
se debe verificar la resistencia del shunt antes de su instalación este elemento solo se instala cuando se utiliza camas anódicas de sacrificio

Figura 6.4 Dispositivo de conexión y medición en poste de registro

Se aplicó corriente de protección catódica de prueba en el Km 40+000

Se utilizó un circuito igual al mostrado en la Figura 6.5.

Se obtuvieron los siguientes datos:

HORA	Km	S	I	OBSERVACIONES
8:30	40+000	-0.45		Potencial natural
8:45	40+000	-0.61	10.0	Punto de drenaje
8:55	40+000	-0.85	22.3	
9:00	40+000	-1.17	28.0	
9:15	40+000	-1.82	32.0	
9:25	40+000	-2.00	35.5	P/S máximo admisible en el P.D
9:50:	38+000	-2.10		Potencial de la fuente en P.D.
10:30	30+000	-1.70		62.5 V
11:05	5+000	-0.85		
10:30	4+000	-0.57		X1 = 3 5 Km (Distancia al PD)
12:30	45+000	-2.20		
12:55	50+000	-1.55		
13:45	55+000	-1.12		
14:30	80+000	-0.85		
15:30	40+000	-2.00		X2 = 40 Km. P/S = -0.850 Volt mínimo de protección. Potencial de la fuente = 60.5 Volt fin de prueba.

Conclusiones:

La eficiencia, de la corriente de protección mejorará cuando se instalen los sistemas definitivos de protección catódica, por dos razones:

Se está considerando que la corriente aplicada ha servido exclusivamente para proteger la tubería entre los dos puntos con P/S mínimo de protección de -0.850 Volt.

La operación permanente de sistemas de protección catódica definitivo, produce efectos de polarización catódica por hidrógeno que reducen considerablemente los consumos de corriente.

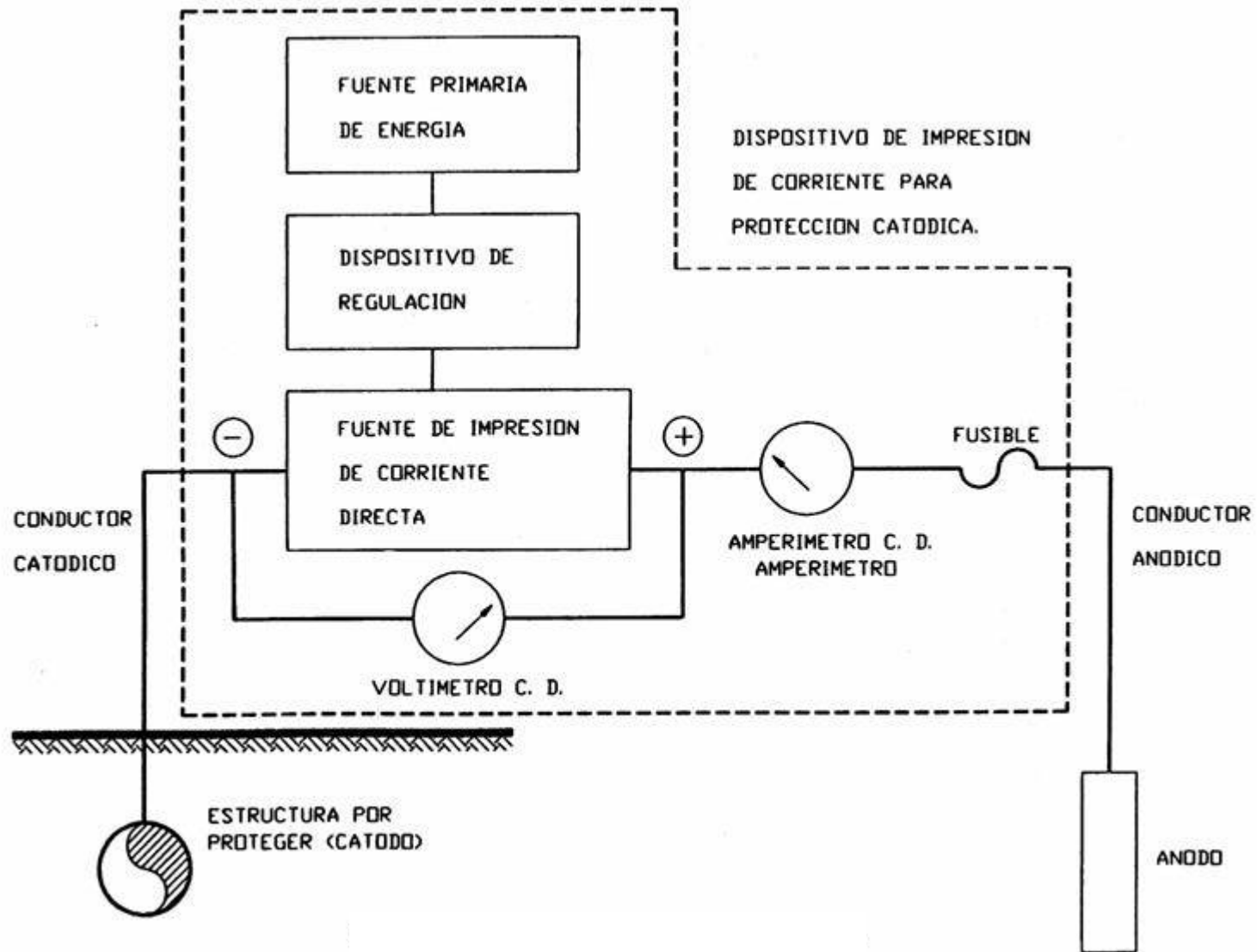


Figura 6.5 Esquema general para la prueba de requerimiento de corriente

Con base en las pruebas realizadas, se puede establecer para efectos de diseño y en forma conservadora lo siguiente:

- a) Se requiere sólo una cama anódica para proteger toda la tubería enterrada.
- b) Puesto que durante la prueba se cubrieron 75 km de tubería con 35.5 Ampere (del km 5+000 al 80+000), la demanda unitaria es igual a:

$$I/L = 35.5/75 = 0.47333 \text{ A/km}$$

y la demanda total será

$$I_T = 0.47333 \times 80 = 37.86 \text{ A}$$

Determinado el punto de drenaje y con los resultados de las pruebas de requerimiento de corriente, se deben calcular las características del rectificador, las cuales son:

- a) Intensidad de corriente a proporcionar (I_p) en Ampere
- b) Tensión de operación en Volt

La corriente I_p es un dato que es obtenido de los resultados de las pruebas de requerimiento de corriente.

La tensión de operación corresponde a la suma de caídas de tensión en todos y cada uno de los elementos que integran el circuito

$$V = R(t)I + 3$$

V = Tensión que se busca, en Volts.

I = Intensidad de corriente obtenida, en amperes.

$R(t)$ = $R(c) + R(e) + R(g)$

$R(c)$ = Resistencia de los cables conductores del circuito, se calcula conociendo el calibre y la longitud de los mismos, en Ohm, ver Tabla 6.4.

$R(e)$ = Resistencia de la estructura metálica por proteger. Su valor puede obtenerse directamente en el campo y es igual al cambio de potencial obtenido en la estructura con la corriente de prueba dividido entre esta última.

$R(g)$ = Resistencia en ohms del dispositivo de tierra o cama anódica.

3 = Factor que involucra el potencial del ánodo de grafito y la celda de referencia.

7. UNIONES SOLDADAS

7.1. GENERALIDADES

La presente guía tiene como objeto mostrar cuales son los requisitos mínimos necesarios, para la elaboración y calificación de un procedimiento de soldadura, mostrando a manera de ejemplo los pasos a seguir:

7.2. SOLDADURA EN TALLER

Para conocer los factores esenciales durante la elaboración de un procedimiento de soldadura, se deberán tomar en cuenta las variables indicadas en 11.1.1 mismos que se aplicarán estrictamente durante la fabricación del tubo, del cual se tomará al azar una muestra para manufacturar las probetas que serán sometidas a las pruebas de calificación.

Por ejemplo:

Proceso de soldadura:	Arco eléctrico sumergido (SAW).
Material:	Acero al carbono A-36 Gr.B.
Diámetro y espesor de pared:	1,220 mm diámetro y 19 mm espesor.
Diseño de la junta:	A tope con bisel cuadrado.
Material de aporte:	FGAZEM15K.
No. F:	6
Diámetro de los electrodos:	3.9 mm - 3.1 mm.
Mca.:	Lincoln 761

Posición de la ranura del tubo: 1G.

Características Eléctricas	Voltaje (V)		Amperaje (A)	
	C.A.	C.D.	C.A.	C.D.
Interior	30	28	450	550
Exterior	30	28	450	600

Polaridad: CD. invertida

Limpieza: Carda

No. pasos: Simple

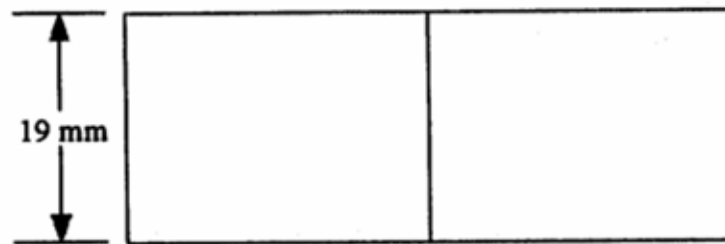
Electrodos: Múltiple (dos)

Velocidad de placa: 1,020 mm/min.

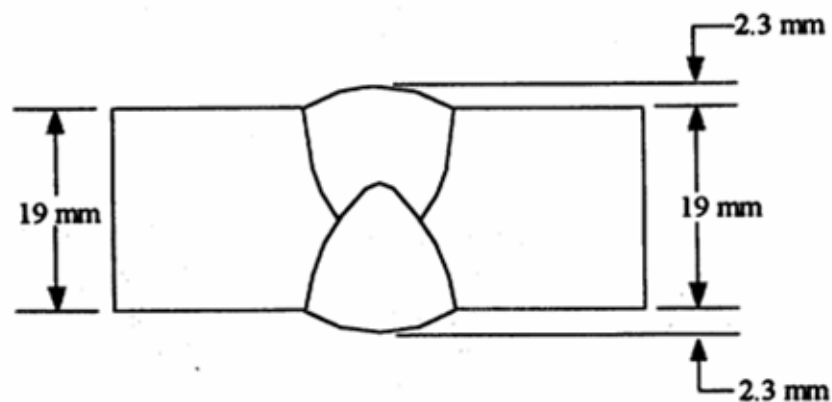
Pre calentamiento y/o relevado de esfuerzos: No aplicable.

Dibujos y ordenamientos de las uniones:

CROQUIS DE LA JUNTA



JUNTA A TOPE CON BISEL CUADRADO.



7.2.1. Ensayos destructivos

Una vez realizada la toma de la muestra, se deberán maquinar las probetas que serán sometidas a prueba, tal como se indica en la Tabla 11.4 (del capítulo 11 "Soldadura de Uniones")

2 probetas de tensión 4 probetas de doblez (2 cara y 2 raíz)

Las probetas deberán tener las dimensiones que se indican en las Figuras 11.10 - 11.14 (del capítulo 11 "Soldadura de Uniones").

Para este caso en específico los resultados mínimo necesarios para la aceptación según 11.3.2 (Criterios de aceptación del capítulo 11 "Soldadura de Uniones").

Prueba de tensión.

RT mínimo 400 MPa (4,077.9 Kg/cm²) (Ruptura en soldadura)
380 MPa (3,874.0 Kg/cm²) (Ruptura en metal base)

Prueba de doblez:

Cara (2) Libre de defectos internos y Raíz (2) grietas < 3.1 mm en la superficie convexa.

En caso contrario, es responsabilidad exclusiva del fabricante el corregir este o cambiar definitivamente a otro procedimiento, hasta obtener resultados satisfactorios, que sean atestiguados por un inspector. Es importante hacer mención que las variables del procedimiento y los resultados de las pruebas de calificación deberán ser documentadas mediante el empleo de un formato de registro de calificación de procedimiento de soldadura (RCP), que deben ser proporcionados al supervisor.

7.2.2. Calificación de personal

Para realizar la calificación del personal, se deberán considerar las variables indicadas en 11.4.1 (Calificación de Soldadores del capítulo 11 “Soldadura de Uniones”), el cual nos indica que dicha operación podrá llevarse a cabo a través de pruebas destructivas o por radiografía.

Pruebas destructivas: 2 ensayos de doblez. 1 cara y 1 raíz calificados de acuerdo a los criterios indicados en 11.4.2, (Criterios de aceptación del capítulo 11 “Soldadura de Uniones”).

Estudio radiográfico: se deberán radiografiar por lo menos 304.8 mm de soldadura y ser evaluados conforme a los criterios indicados en 11.4.2 (Criterios de aceptación del capítulo 11 “Soldadura de Uniones”).

Una vez que el personal fue aceptado, se le deberá asignar una clave de identificación personal. Es importante hacer notar que la metodología de calificación del personal es la misma para taller y campo.

7.2.3. Inspección

Una vez que se cuenta con la aprobación y registro de la calificación del procedimiento de soldadura y operador, se deberá recibir por parte del fabricante los procedimientos escritos de la inspección no destructiva que usará durante la fabricación de la tubería, para garantizar la calidad de las uniones soldadas conforme 11.5.2 (Criterios de aceptación del capítulo 11 “Soldadura de Uniones”).

7.2.4. Supervisión

Una vez que han establecido los procedimientos relacionados con soldadura e inspección no destructiva, es conveniente supervisar periódicamente, que dichos procedimientos están siendo aplicados correctamente durante la fabricación de la tubería y de ser necesario el supervisor tendrá el derecho de solicitar muestras adicionales como monitoreo de la calidad conforme 11.5.1 (Ensayos para la evaluación del capítulo 11 “Soldadura de Uniones”).

7.3. SOLDADURA EN CAMPO

Al igual que en los procesos de fabricación de tubería en taller, es necesario elaborar y calificar un procedimiento de soldadura para el montaje de tubería en campo, siguiendo la misma metodología en 7.2 (Soldadura en taller).

Por ejemplo:

Proceso de soldadura: Arco eléctrico manual (SMAW)

Material: Acero al carbono A-36 Cr.B-

Diámetro y espesor de pared: 1,220 mm diámetro y 7.9 mm espesor.

Diseño de la junta: En "v" sencillo a tope y 1.05 rad (60°).

Material de aporte: E-6010.

No. F:3

Diámetro de los electrodos: 3.1 mm Fondo 3.9 mm Relleno.

Mca.-----AGA

Posición de la ranura del tubo: 5G

Características eléctricas:	Voltaje (V)	Amperaje (A)
3.1 mm	30	110
3.9 mm	35	200

Polaridad: CD directa

Limpieza: Carda y esmeril

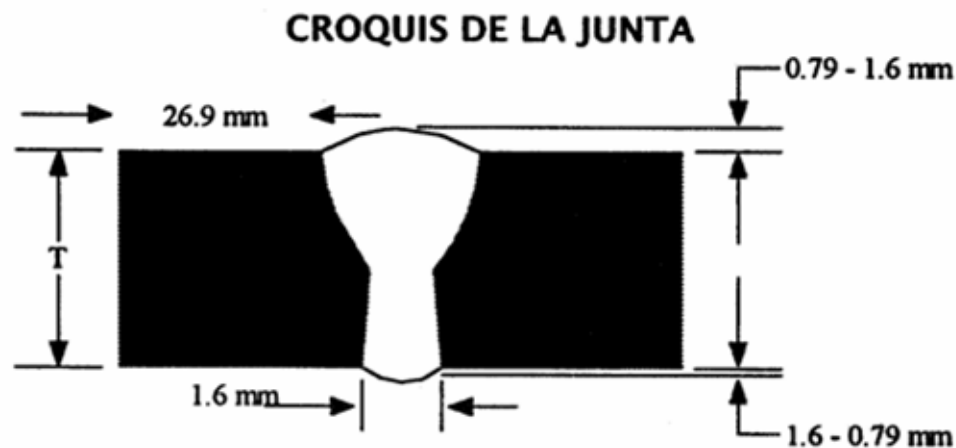
No. pasos: Múltiple.

Lapso de tiempo entre pasos: Continuo.

Electrodos: Múltiple

Pre calentamiento y relevado de esfuerzos: No aplicable.

Dibujos y ordenamientos de las uniones.



JUNTA A TOPE BISEL EN "V" SENCILLO

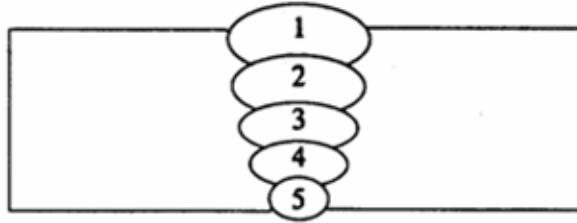


Tabla Secuencia de cordones

No. de Cordón	Diam. de Electrodo (mm)	Voltaje (V) VOLTIO	Amperaje (A) AMPERIO	Velocidad mm/min
1 Vista	3.9, E7018	35	200	203.2-254
2 Relleno	3.9, E7018	35	200	203.2-254
3 Relleno	3.9, E7018	35	200	203.2-254
4 Paso caliente	3.1, E6010	30	110	101.6-152.4
5 Fondeo	3.1, E6010	30	110	101.6-152.4

7.3.1. Ensayos destructivos

Los mecanismos de prueba y criterios de aceptación para la calificación del procedimiento de soldadura, son iguales a los indicados en 7.2.1 (Ensayos destructivos).

Estas pruebas deberán realizarse las veces necesarias, hasta obtener resultados satisfactorios conforme a los requerimientos de 11.3.2 (Criterios de aceptación del capítulo 11 "Soldadura de Uniones"), y aprobar la calificación del procedimiento de soldadura.

7.3.2. Calificación de personal

Los procedimientos de prueba y criterios de aceptación para la calificación del personal, son iguales a los indicados en 7.2.2 (Calificación de personal) como se muestra a continuación.

Ensayos de doblez: Se requieren 2 pruebas (raíz y 1 cara), donde no se deberán observar grietas mayores de 3.1 mm, como se indica en 11.4.2 (Criterios de aceptación del capítulo 11 "Soldadura de Uniones").

Estudio radiográfico: Se deberá realizar un estudio radiográfico de al menos 304.8 mm de longitud de soldadura y ser calificados, según los criterios indicados en 11.4.2 (Criterios de Aceptación del capítulo 11 "Soldadura de Uniones").

7.3.3. Inspección

Una vez que se cuenta con los registros aceptados de la calificación de procedimientos de soldadura y de soldadores, la compañía encargada del montaje, deberá presentar, al inspector, los procedimientos escritos que serán empleados para la inspección no destructiva (radiografía) de las uniones soldadas; mismos que deberán ser evaluadas mediante la toma de radiografías de una junta soldada en el espesor más delgado y deberán cumplir con la calidad especificada en API-1104, con lo que se garantiza la calidad radiográfica proporcionada por el contratista. El personal encargado de la inspección radiográfica deberá también estar certificado.

Una vez que se tenga la certeza que los resultados son confiables, se deberá considerar una inspección al 100% de las uniones o aplicar los criterios de inspección descritos en la Tabla 6 (del capítulo 11 "Soldadura de Uniones"). Es importante hacer notar que el empleo de esta tabla se realizará si los defectos que sean motivo de rechazo no son grietas o faltas de fusión. De lo contrario, invariablemente se deberá realizar una inspección radiográfica en la totalidad de uniones soldadas.

Por ejemplo:

El 10% inicial de la obra se deberá radiografiar el 100%.

Si dentro de este 100% hay un porcentaje de defectos normales que sea mayor del 5% es necesario continuar con el 100%.

Si hay defectos normales en una cantidad menor al 5% se debe de reducir la inspección al 50%.

Cuando se tenga un avance de la obra de un 20% volver a efectuar el análisis para determinar si se continua disminuyendo o se aumenta el porcentaje de radiografiado aplicando un criterio como el indicado anteriormente.

Para cualquier caso se tienen dos extremos; uno el 100% y el otro no menor que el 30%.

En la evaluación de defectos se deben aplicar los criterios de aceptación indicados en la Tabla 7 (del capítulo 11 "Soldadura de Uniones"), y éstos deberán ser reparados y reinspeccionados a satisfacción del supervisor.

Para efectos de reparación es indispensable que el contratista tenga un procedimiento calificado de reparación de soldadura, considerando las variables descritas anteriormente.

Es importante hacer notar que el supervisor podrá solicitar las pruebas de inspección adicionales que considere necesarias para garantizar la calidad de las soldaduras, si se detectan defectos críticos como son grietas o faltas de fusión.

8. INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO

8.1. GENERALIDADES

Este capítulo muestra principalmente los procedimientos de inspección, necesarios para detectar anomalías en los componentes del sistema de tuberías de conducción de agua.

- Los procedimientos de inspección que se incluyen en este capítulo son:
- Inspección visual del derecho de Vía.
- Medición de los espesores en puntos discretos de la tubería.
- Inspección de pintura y recubrimiento anticorrosivo.
- Inspección del sistema de protección catódica.
- Inspección de cruces

8.2. INSPECCIÓN VISUAL DEL DERECHO DE VÍA

La inspección visual del derecho de Vía consistirá principalmente en reportar cualquier anomalía por escrito, referente a posibles abolladuras de la tubería, rayones, pintura desprendida, soportes en mal estado, etc., observaciones que deberán ser reportadas en el formato anexo.

8.3. MEDICIÓN DE ESPESORES EN PUNTOS DISCRETOS DE LA TUBERÍA

8.3.1. Campo de aplicación

Este procedimiento cubre los trabajos necesarios para realizar mediciones de espesores en puntos discretos, en tramos rectos y codos de tuberías, empleando para ello la técnica de ultrasonido, además no cubre la inspección con ultrasonido de soldaduras ni su zona afectada por el calor (HAZ). Cabe mencionar que este procedimiento es aplicable tanto a tuberías superficiales como enterradas.

8.3.2. Definiciones

Transductor:

Componente encargado de emitir ondas de ultrasonido dentro de la tubería que está siendo inspeccionada, dichas ondas son reflejadas por la pared interna de la tubería y captadas nuevamente por el transductor para ser desplegadas en una pantalla digital, mostrando en forma directa el espesor de la tubería.

Acoplador:

Sustancia líquida que permite la continuidad entre la superficie de la tubería y el transductor, en algunas ocasiones se emplea grasa o agua como acoplador.

8.3.3. Equipo requerido

- Medidor de espesores por ultrasonido, con pantalla digital para servicio en seco y bajo el agua.
- Acoplante en cantidad suficiente.
- Limas y martillos.
- Crayones y cinta de medir.

8.3.4. Responsabilidades

Ingeniero de campo:

El personal de campo encargado de la medición de espesores de la tubería, deberá verificar antes de realizar la tarea de inspección lo siguiente:

Calibrar los equipos con los bloques de referencia estándar en caso de que se requiera. Verificar que tenga una cantidad suficiente de grasa como acoplante.

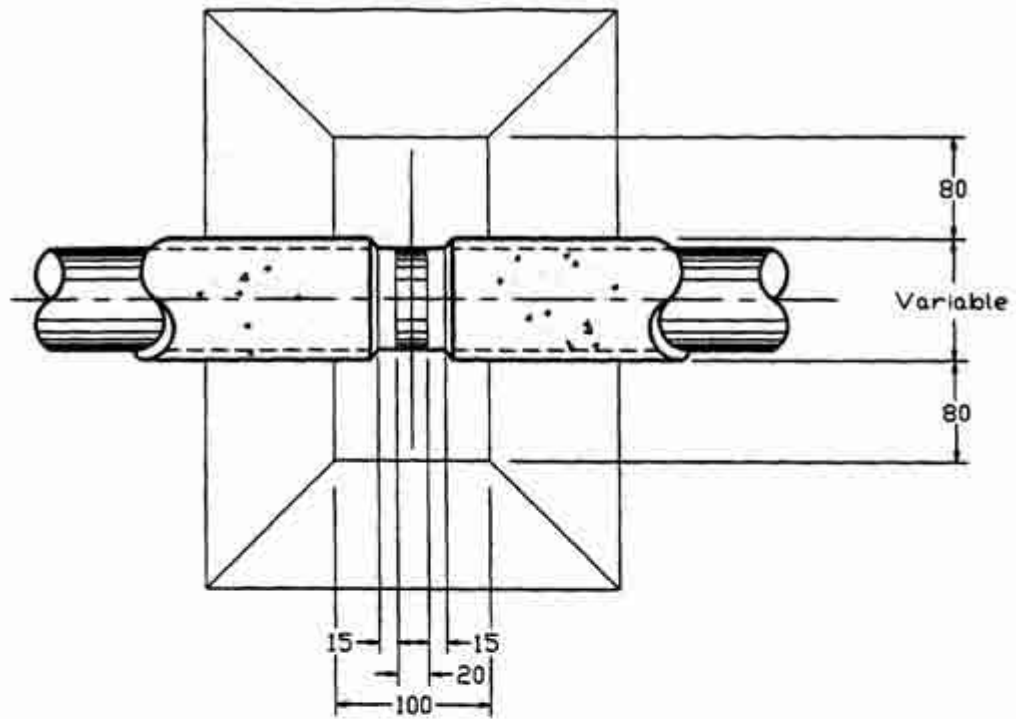
El personal encargado de realizar los trabajos de localización y excavación de la tubería, deberá tomar en cuenta las precauciones pertinentes para no producir raspaduras, rayones o abolladuras a la tubería.

8.3.5. Actividades principales

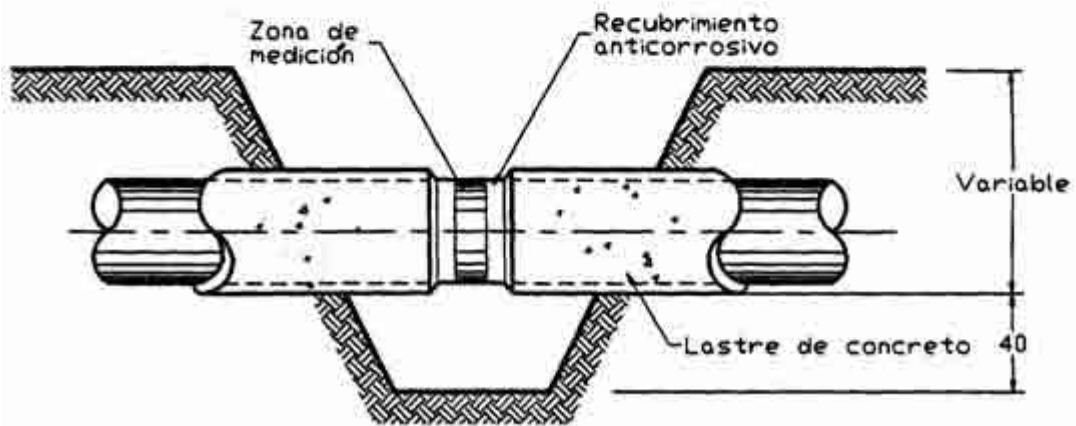
Selección de puntos de medición:

Los puntos donde se medirán espesores de la tubería son los siguientes:

- Codos susceptibles de sufrir erosión o esfuerzos altos.
- Puntos inferiores en cambios de dirección vertical.
- Zonas de baja resistividad del suelo (0 - 1000 ohms - cm).
- Zonas con problemas de interferencia debido a la presencia de otras líneas protegidas catódicamente.
- Áreas con daños mecánicos (rayones, abolladuras, etc.).
- Zonas cercanas a poblaciones.
- Zonas reparadas (cambio de tramo de tubo).



P L A N T A



E L E V A C I O N

Figura 8.1 Excavación para medición de espesores

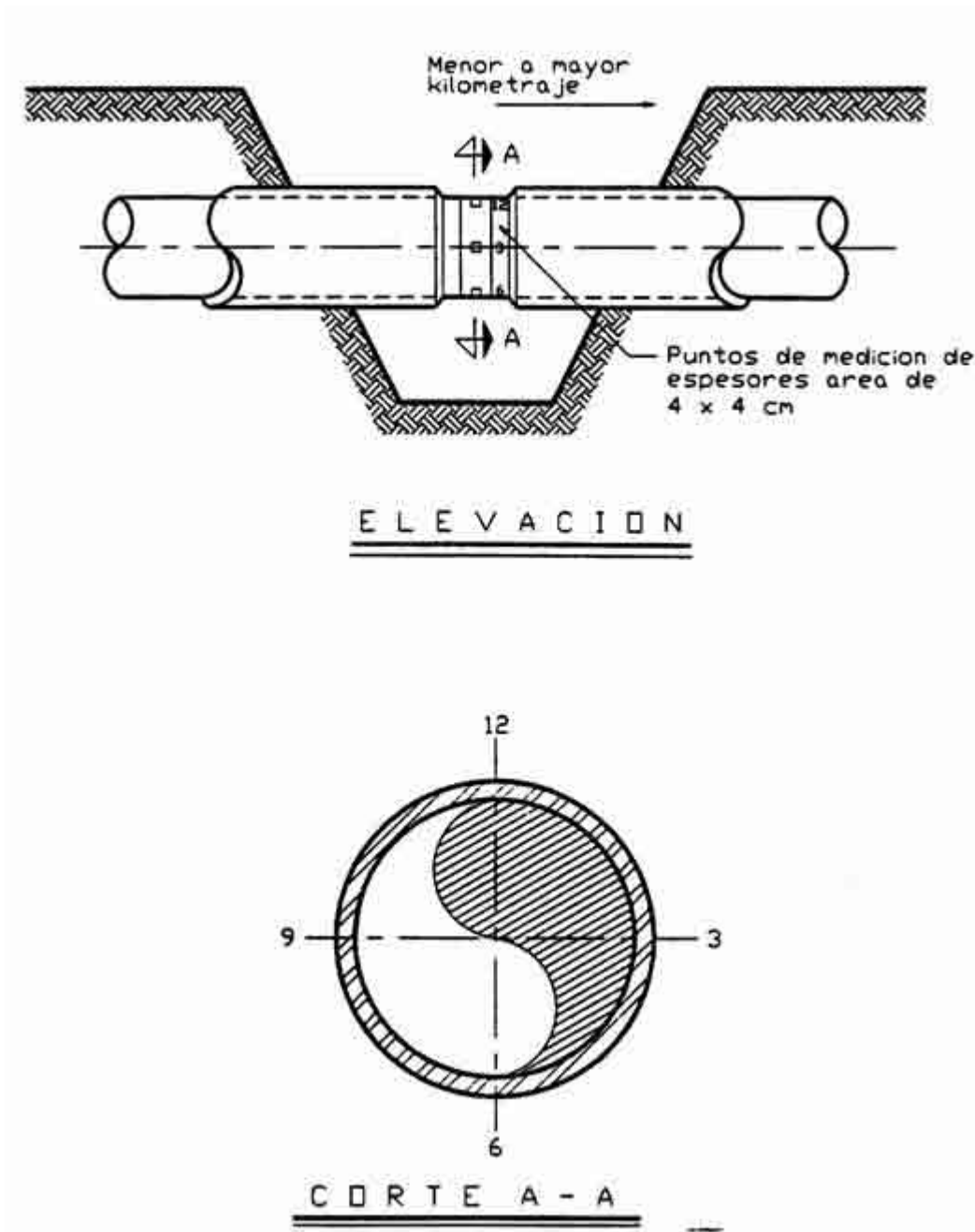


Figura 8.2 Sistema de referencia para medición de espesores

8.3.6. Excavación

Una vez que los puntos donde se medirán los espesores han sido seleccionados, se procederá a descubrir la tubería en toda su circunferencia y con una longitud no menor de 1,000 mm.

Durante la excavación únicamente se permitirá el empleo de palas; el uso de picos o barrenas estará prohibido.

Posteriormente, se removerá el recubrimiento anticorrosivo en una franja de 200 mm de ancho y longitud igual el perímetro de la tubería. En dicha franja se marcará con crayón el sistema de referencia (ver Figura 8.1).

8.3.7. Sistema de referencia

Sobre la superficie limpia se marcará el sistema de referencia, similar a tipo "horario", cabe aclarar que la orientación de dicho sistema será en la dirección del menor al mayor kilometraje y de acuerdo con las manecillas del reloj (ver Figura 8.2).

8.3.8. Limpieza en los puntos de medición

En los puntos marcados con las 12, 3, 6 y 9 horas, se procederá a limpiar la superficie metálica con cepillo de cuerdas metálicas y limas, hasta lograr un acabado similar a "comercial"; las áreas limpias tendrán una superficie de aproximadamente 40 mm x 40 mm.

8.3.9. Medición de espesores

El medidor de espesores será colocado perpendicularmente a la superficie metálica y en los puntos marcados con las 12, 3, 6 y 9 horas.

En caso de que se tenga una lectura muy variable, se deberá revisar que la película de acoplante sea suficiente y que el transductor sea normal a la superficie.

8.3.10. Reparación en la zona de medición

Cuando todas las mediciones sean terminadas, la zona metálica descubierta debe ser reparada por medio de la aplicación de un recubrimiento de calidad igual al aplicado originalmente sobre la tubería y con un traslape mínimo con el original de 150 mm.

8.3.11. Revisión de mediciones

Durante la realización de las mediciones, el operador deberá revisar en todo momento que las mediciones obtenidas no sean menores que el 15% del espesor original, en caso de que así suceda, se deberá repetir la medición y mapear la zona con el objeto de caracterizar la zona corroída.

8.3.12. Mapeo de zonas corroídas

En las zonas donde se observe corrosión generalizada, ésta deberá ser caracterizada mediante el trazo de una cuadrícula, midiéndose el espesor remanente en cada cruce de líneas. Cabe aclarar que se deberá medir la máxima corrosión; es decir, donde el espesor remanente sea menor, asimismo, se medirá la máxima longitud de la corrosión en la dirección longitudinal del tubo.

8.4. INSPECCIÓN DE PINTURA Y RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO

8.4.1. Campo de aplicación

Este procedimiento cubre los trabajos de inspección del recubrimiento anticorrosivo de tuberías enterradas y superficiales.

8.4.2. Definiciones

Hollidays:

En la industria de recubrimientos anticorrosivos se llama "hollidays" a las zonas dañadas del recubrimiento anticorrosivo, dejando expuesta a la corrosión la superficie metálica de la tubería.

Corrientes telúricas:

Son las corrientes producidas por la actividad magnética de la tierra.

Zona anódica:

Generalmente, en una tubería recubierta se presentan zonas dañadas (hollidays), donde el metal es expuesto a la acción de la corrosión; es decir, se convierte en una zona anódica.

8.4.3. Equipo requerido

- Receptor PCS-2000
- Un par de probetas y cables
- Un interruptor de corriente PCS-2000
- Un cargador de batería
- Sistema de contacto de electrodos
- Dos celdas de referencia de Cu/CuSO₄ (tipo bastón)
- Marcadores de defectos

8.4.4. Responsabilidades

Ingeniero de campo:

El ingeniero de campo encargado de inspeccionar el recubrimiento anticorrosivo, deberá verificar lo siguiente antes de iniciar los trabajos:

- Verificar que el nivel de carga de la batería del medidor de voltaje sea el adecuado.
- Verificar que el nivel de carga de la batería del interruptor de corriente sea el adecuado.
- Verificar que la punta de la celda de referencia esté libre de grasa o aceite.

8.4.5. Actividades principales

8.4.5.1. Tubería enterrada

La línea debe ser localizada mediante el empleo de los planos correspondientes, así como por su profundidad de enterrado; también es necesario conocer con anticipación el tipo y espesor del recubrimiento anticorrosivo aplicado sobre la tubería.

Medición de potencial

Directamente sobre la tubería, se medirá el potencial de las zonas descubiertas del recubrimiento anticorrosivo (holidays), para lo cual se debe realizar lo siguiente:

- 1 Clavar ligeramente las dos celdas de referencia
- 2 Encender el interruptor de corriente
- 3 Encender el medidor de voltaje (perilla del lado izquierdo)
- 4 Seleccionar el tipo de resistencia de entrada de acuerdo con el tipo de terreno; 100 suelo arcilloso húmedo, 1000 suelo rocoso seco o pavimento (perilla derecha)
- 5 Seleccionar el tipo de escala de voltaje (perilla central)
- 6 Leer la carátula central, donde se medirá el potencial de las zonas dañadas del recubrimiento anticorrosivo
- 7 Cuando se detecte una zona dañada durante el paso, se realizará lo siguiente:
 - 7.1 Cuando el bastón derecho esté adelante del bastón izquierdo y la aguja del medidor de potencial se mueva hacia la derecha, entonces el defecto se encuentra adelante hacia la derecha.
 - 7.2 Una vez localizado el daño, se procederá a mapear el mismo, para lo cual si los bastones son colocados dentro de dos líneas de igual potencial, su voltaje será indicado inmediatamente por la aguja del aparato.

En el caso de que los bastones sean colocados dentro de dos líneas de potencial, entonces la aguja no marcará nada

El paso numero 2 se repetirá varias veces hasta que el daño del recubrimiento anticorrosivo sea dimensionado.

Los resultados de la inspección deberán ser reportados en el formato anexo.

8.4.5.2.Tubería superficial

La inspección de tubería superficial se debe realizar de acuerdo con lo siguiente:

1. Selección del diámetro de electrodo, el cual debe ser igual al diámetro externo de la tubería por inspeccionar.
2. Limpieza de la superficie externa de la tubería, con el objeto de eliminar restos de grasa, agua, etc.
3. Seleccionar el voltaje de prueba, de acuerdo con el tipo de recubrimiento anticorrosivo.
4. Inspección continua de la tubería, mediante el uso del aparato Spy Modelo 72
5. En caso de que el aparato indique la presencia de un defecto, se procederá a marcar la zona con un crayón.

8.5. INSPECCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

8.5.1. **Medición de potenciales tubo - suelo**

8.5.1.1.Campo de aplicación

Este procedimiento será empleado para la medición de potenciales entre la tubería y suelo, por medio del empleo de una celda de referencia, multímetro y conexiones eléctricas instaladas permanentemente en los postes de registro de la línea.

8.5.1.2.Definiciones

Celdas de referencia:

Este dispositivo es empleado para la medición de potencial entre la tubería y suelo; comúnmente se emplea la celda de cebra/sulfato de cobre; la cual consiste de una barra de cobre inmersa en una solución saturada de sulfato de cobre, manteniendo el contacto con el suelo a través de un tapón poroso.

Multímetro:

Instrumento para medir voltaje, tal como el que existe entre una tubería y una celda de referencia; para medición de potenciales se emplea un multímetro de alta resistencia (o alta sensibilidad).

Conexión eléctrica:

La conexión eléctrica entre la tubería y la celda de referencia se logra a través de alambres con forro para uso enterrado del número. 12 A.W.G. instalado en forma permanente en postes de registro. El alambre sobresale a través de un perno o conector mecánico en una de las caras superiores del poste de registro; su posición o color es establecido por cada compañía propietaria de la línea.

8.5.1.3. Equipo requerido

Una celda de referencia de cobre/sulfato de cobre, con tapón poroso cónico, con dimensiones; diámetro 35 mm, de longitud 152.4 mm (13/8 pulg, longitud 6 pulg).

Multímetro o voltímetro con indicador digital (liquid crystal display) de alta sensibilidad, incluyendo puntas de prueba.

8.5.1.4. Responsabilidades

Ingeniero de campo:

El personal de campo encargado de la medición de potenciales deberá verificar lo siguiente antes de realizar las mediciones:

Identificar el alambre que conecta a la tubería con el poste de registro.

La celda de referencia deberá contener suficientes cristales de sulfato de cobre en solución y el nivel de solución deberá ser al menos de 3/4 del volumen total.

Verificar que las puntas de prueba del multímetro sean de longitud suficiente para alcanzar la punta del alambre del poste de registro.

En caso de que se tenga suelo duro o seco en el sitio de medición de potencial, esta zona deberá ser humedecida antes de la toma de potencial.

8.5.1.5. Actividades principales

Medición de potencial.

Para medir potenciales entre la tubería y el suelo, se empleará la celda de referencia de cobre/sulfato de cobre conectada a la terminal positiva (+) del multímetro, mientras que la terminal negativa (-) del multímetro se conectará al alambre del poste que hace contacto con la tubería (ver Figura 8.3).

La celda de referencia se colocará sobre el eje longitudinal de la tubería y se enterrará en el suelo aproximadamente a 2.54 cm (1 pulg).

La lectura registrada en el multímetro se anotará en el formato anexo.

Revisión de mediciones.

Una vez realizada la medición de potenciales, estos valores serán comparados con el valor de -850 mV ; en caso de que se registre un valor menor, la medición se repetirá,

8.5.2. Inspección de rectificadores

8.5.2.1. Campo de aplicación

Este procedimiento se aplicará cuando se lleve a cabo la inspección de rectificadores del sistema de corriente Impresa.

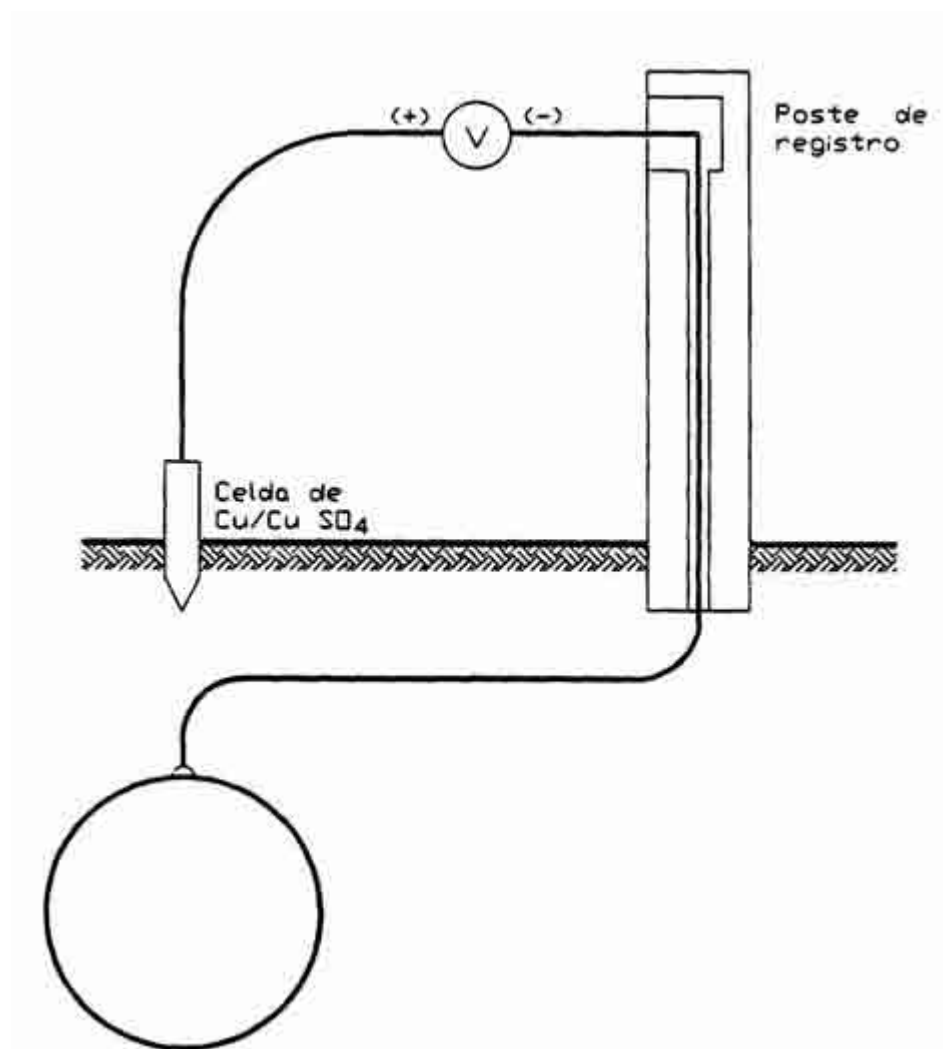


Figura 8.3 Arreglo para la medición de potenciales tubo - suelo

8.5.2.2. Definiciones

Rectificador:

Dispositivo que transforma la corriente alterna en corriente directa, a través de diodos de sílice o selenium.

Corriente alterna:

La corriente alterna es el flujo de electrones en una dirección alternante; es decir, sigue una variación del tipo senoidal, con valores positivos y negativos.

Corriente directa:

La corriente directa es el flujo de electrones en una sola dirección y en forma de media onda.

8.5.2.3. Equipo requerido

Un multímetro Una celda de referencia de cobre/sulfato de cobre

8.5.2.4. Responsabilidades

Ingeniero de campo:

El personal de campo encargado de la inspección de rectificadores deberá verificar lo siguiente:

Identificar cada una de las conexiones, a fin de evitar daños por choque eléctrico.

8.5.2.5. Actividades principales

Consultar el libro de operación del rectificador.

El personal de campo deberá consultar el libro de operación del rectificador, con la finalidad de familiarizarse con el tipo de rectificador instalado.

Revisión de reportes pasados.

Se deberán revisar los reportes de inspecciones pasadas del rectificador, principalmente el voltaje y amperaje de la corriente de entrada y salida, así como su eficiencia.

Medición de Watts de entrada de corriente alterna.

La medición de Watts de entrada de corriente alterna puede ser realizada directamente con un wattímetro de corriente alterna o a través de un medidor

instalado en el rectificador de watt-hora, en un período de varios segundos y calculados con la siguiente fórmula:

$$\text{Watt} = (K * N * 3600) / T$$

donde:

K = Constante del medidor de watt-hora; el cual es indicado en la carátula del mismo medidor.

N = Es el número de revoluciones del disco medidor.

T = Es el tiempo de medición en segundos.

8.5.2.6.Verificación de la eficiencia del rectificador

Con los datos de watts de entrada y salida se procede a calcular la eficiencia del rectificador con la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia} = (\text{DC volts} * \text{DC amperes} * 100) / \text{AC watts}$$

donde:

DC = corriente directa

AC = corriente alterna

8.5.2.7.Verificación del nivel de aceite

En caso de que el rectificador sea enfriado con aceite, se deberá verificar que la cantidad de aceite sea suficiente y que se encuentre limpio.

También es importante comparar el amperaje de salida del rectificador con el amperaje medido en el poste del registro, para conocer la cantidad de corriente que entrega la cama anódica y si ésta corresponde a la corriente suministrada a la cama anódica por el rectificador.

El resultado de la inspección deberá ser reportado en el formato anexo.

8.5.3. **Medición de corriente de salida de ánodos inertes**

Este procedimiento debe ser aplicado cuando se lleve a cabo la medición de la corriente de salida del ánodo del tipo inerte, empleado en sistemas de protección catódica a base de corriente impresa.

8.5.3.1. Definiciones

Shunt:

Resistencia calibrada que se instala en la parte superior de los postes de registro, para permitir la medición de corriente de salida del grupo de ánodos que constituyen la cama anódica.

Ley de ohm:

Esta ley derivada por Ohm indica que la cantidad de corriente que fluye por un conductor, es igual al producto de la diferencia de potencial multiplicada por la resistencia del mismo conductor, y se expresa de la siguiente forma:

$$I = VR$$

8.5.3.2. Equipo requerido

Un multímetro con indicador digital de alta resistencia, incluyendo puntas de prueba.

8.5.3.3. Responsabilidades

Ingeniero de campo:

El personal encargado de la medición de la corriente en camas anódicas deberá verificar lo siguiente antes de realizar las mediciones:

- Identificar el alambre que conecta a la cama de ánodos y el alambre que conecta a la tubería (cable de retorno).
- Verificar que el multímetro se encuentre en buen estado y que las puntas de prueba sean lo suficiente largas para realizar la medición.

8.5.3.4. Actividades principales

Identificación de alambres en contacto con la cama anódica y tubería.

Medición de la corriente.

El valor de la corriente de protección suministrada por un rectificador de corriente alterna, es indicado por el amperímetro con que está provisto dicho rectificador.

Sin embargo, usualmente cerca de las camas anódicas se acostumbra instalar un poste de registro, el cual contiene en forma permanente una resistencia calibrada (shunt).

La corriente de protección proporcionada por la cama anódica, será la que resulte de aplicar la siguiente fórmula:

$$I = VR$$

donde:

I = corriente, en amperes

V = voltaje medido en los alambres que unen al shunt

R = resistencia calibrada (shunt); valores usuales:

tipo RS 0.01 ohms 6 amperes

tipo SO 0.001 ohms 50 amperes

tipo SS 0.001 ohms 25 amperes

El voltaje se medirá con un multímetro con sus puntas de prueba instaladas como se muestra en la Figura 8.4.

El valor de corriente así calculado, se deberá reportar en el formato anexo.

8.5.4. Inspección de cruces

8.5.4.1. Campo de aplicación

Este procedimiento debe ser aplicado cuando se realice la inspección de camisas de refuerzo en cruces con carreteras, ferrocarril, etc.

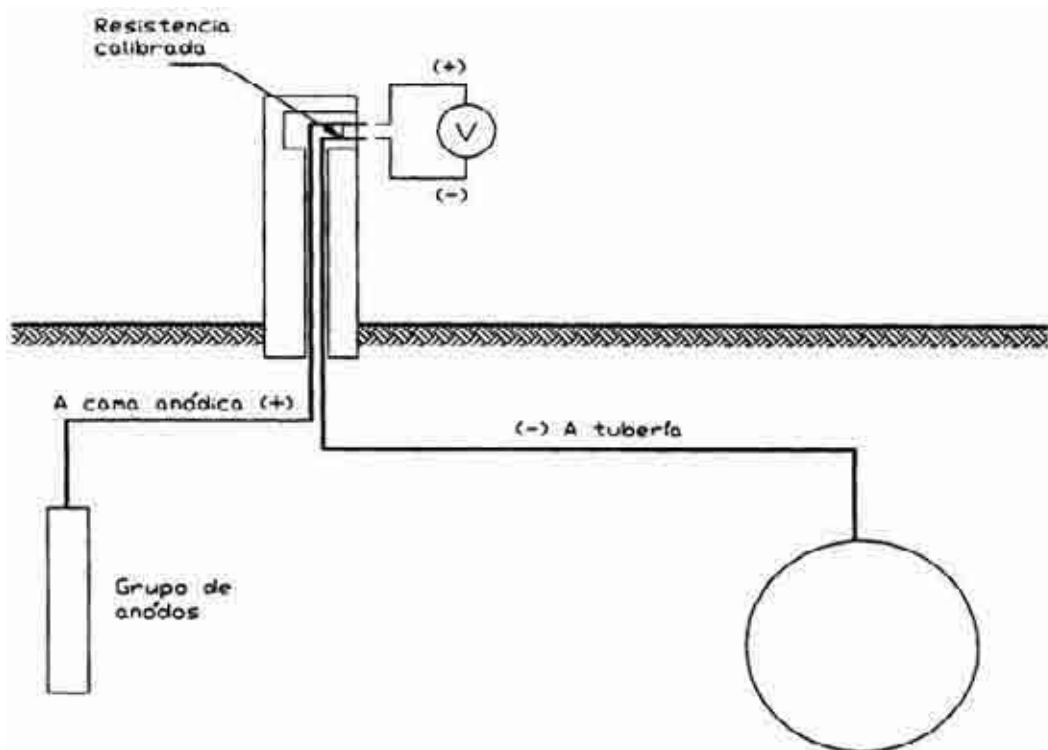


Figura 8.4 Arreglo para la medición de corriente de salida de ánodos

8.5.4.2. Definiciones

Camisa:

- Tubería de diámetro mayor que la tubería de conducción, la cual se instala en cruces donde la carga vertical sobre la tubería de conducción es de tal magnitud que puede producir daños a la misma.
- La camisa es aislada eléctricamente de la tubería de conducción, a través de separadores. La camisa generalmente se instala con recubrimiento anticorrosivo.

Conexión eléctrica:

Alambre soldado permanentemente a la tubería o camisa y conectado a un poste de registro sobre el terreno.

8.5.4.3. Equipo requerido

- 2 celdas de referencia de cobre/sulfato de cobre
- 2 multímetros de alta sensibilidad
- Una batería de DC de 12 Volts

8.5.4.4. Responsabilidades.

Ingeniero de campo:

El ingeniero de campo encargado de la inspección de los cruces deberá verificar lo siguiente:

- Identificar cada uno de los alambres que conectan a la tubería y camisa en cada extremo del cruce.
- Verificar que el multímetro se encuentre en buen estado y que las puntas de prueba sean lo suficientemente largas para realizar las mediciones.

8.5.4.5. Actividades principales

Medición de potencial.

Tanto la camisa como la tubería de conducción en un cruce contienen permanentemente dos cables cada una, los cuales son llevados a la superficie a través de un poste de registro.

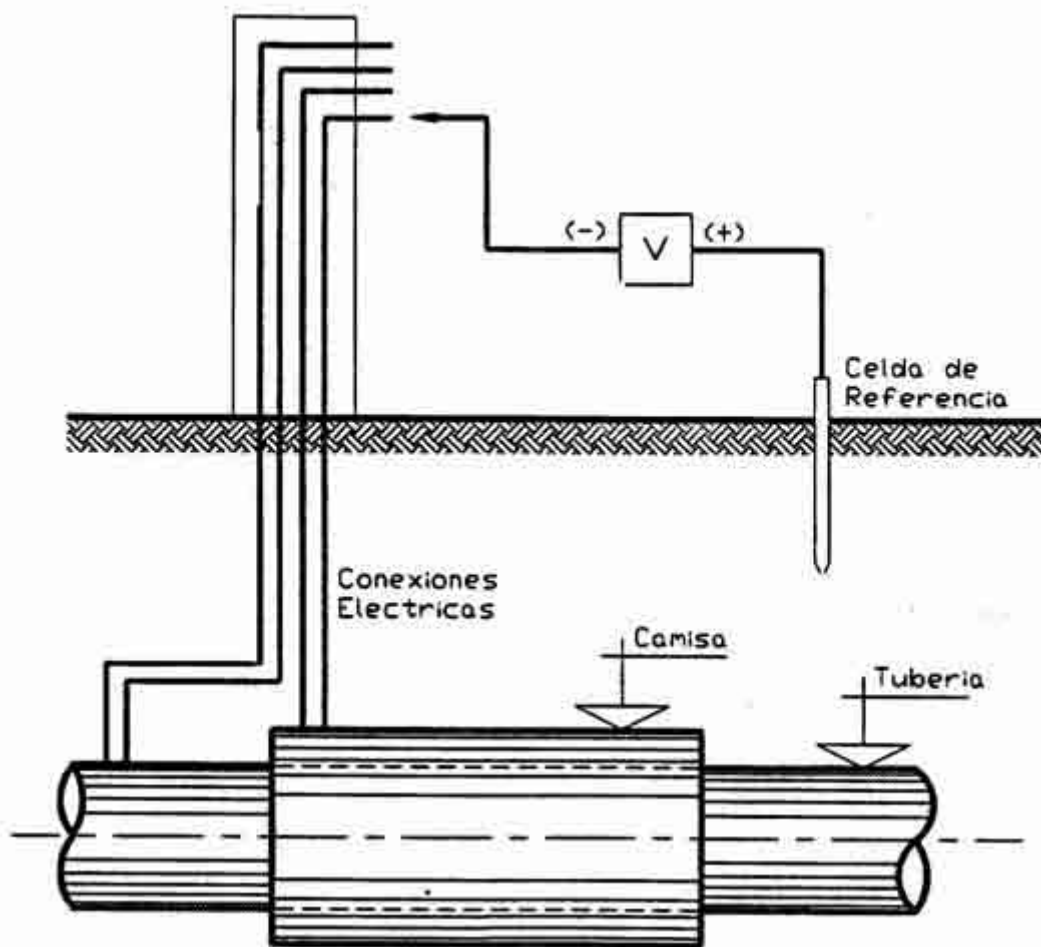


Figura 8.5 Arreglo para la medición de potenciales en tubería conductora y camisa

Para medir el potencial, se debe conectar el cable que conecta la tubería a la terminal negativa del multímetro, mientras que la celda de cobre/sulfato de cobre se conecta a la terminal positiva del mismo multímetro, ver Figura 8.5.

Medición de resistencia interna entre tubería y camisa.

Instalación de los equipos auxiliares.

Para verificar que los separadores que existen entre la tubería y la camisa estén efectivamente aislando la tubería, se lleva a cabo la medición de la resistencia de la unión aislante.

Para lo anterior, es necesario inyectar una cantidad conocida de corriente directa a la tubería, de tal forma que si se mide el potencial tanto en la tubería como en la camisa, se puede conocer la variación de potencial. Además, aplicando la ley de Ohm, se conoce la resistencia de la conexión aislante entre la tubería y la camisa.

La fuente de poder puede ser una batería de automóvil de 12 Volts conectada a la tubería y camisa, tal como se muestra en la Figura 8.6, al mismo tiempo se debe medir el potencial de la tubería y camisa.

El procedimiento es como sigue:

1. Conectar el amperímetro, batería y voltímetro número 1, tal como se indica el Figura 8.5
2. Cerrar el circuito (hacer contacto)
3. Leer simultáneamente el valor de la corriente inyectada, así como el potencial de la tubería y camisa.
4. Abrir el circuito (romper el contacto)
5. Leer el potencial de la tubería.
6. Repetir varias veces los pasos del dos al cinco para asegurar que no hay errores.
7. Quitar el voltímetro numero 1 y conectar al voltímetro numero 2 tal como se muestra en la Figura 8.5
8. Repetir los pasos del uno al seis.

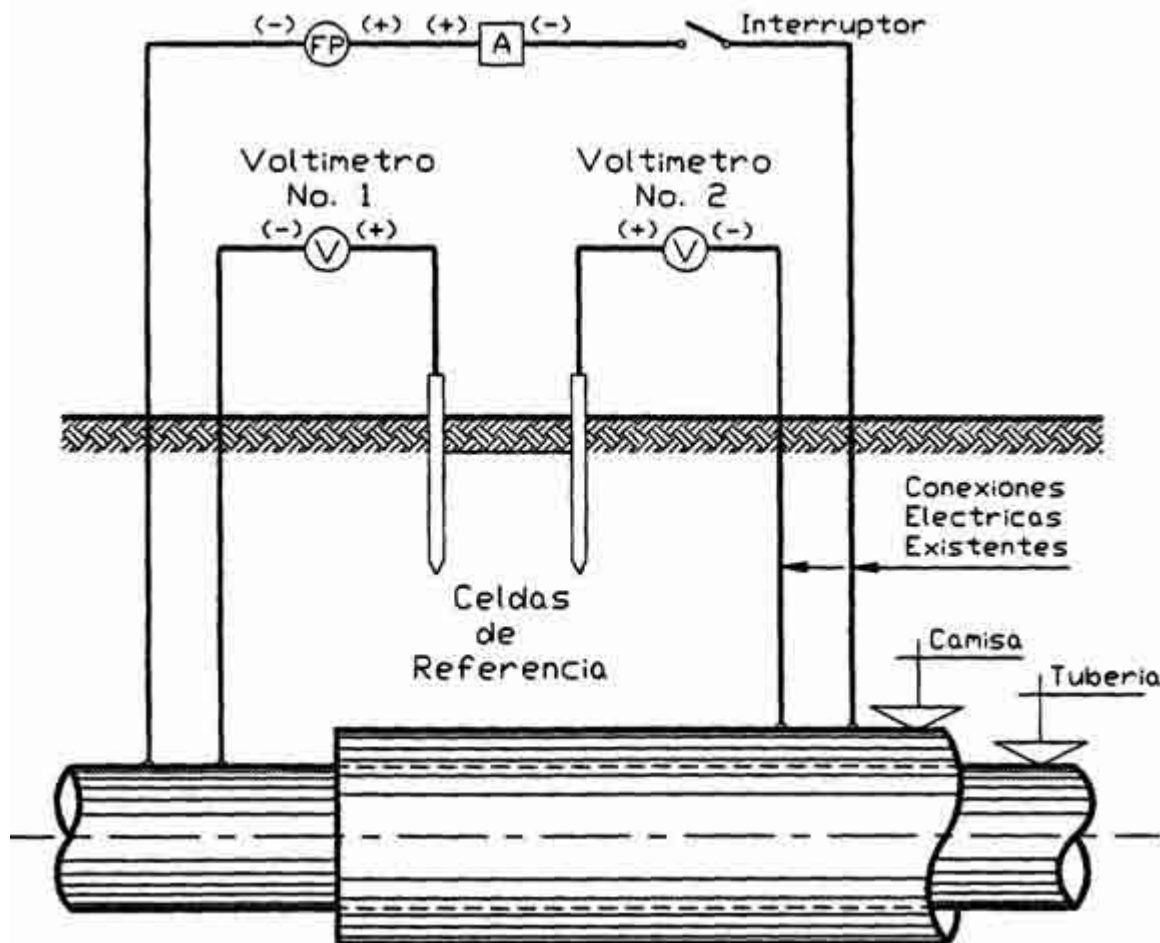


Figura 8.6 Arreglo para la inspección de camisas

8.5.4.6.Cálculos

La resistencia del aislador se calculará con la siguiente fórmula:

$$R = (P/S_{lon} - P/S_{loff}) + (P/S_{2on} - P/S_{2off})/I_{on}$$

$$R = (P/S_1 + P/S_2)/I$$

Es muy importante hacer un diagrama de las polaridades empleadas en la prueba, por que éstas deben considerarse cuando se realice la suma algebraica P/S1 y P/S2. Con el orden de polaridades como se muestra en la Figura 8.5; P/S1 será de polaridad opuesta de P/S2.

Con las polaridades como se muestra en la Figura 8.6, la camisa se convierte en ánodo con respecto a la tubería, cuando se cierre el circuito, por lo tanto, la protección catódica se está aplicando a la tubería a través de la batería de 12 Volts.

8.5.4.7.Revisión de mediciones

Una vez que la resistencia es calculada, su valor nos dará idea de la efectividad de los aislantes; es decir, si el valor de la resistencia es alta indica que el aislador está trabajando correctamente.

Los valores de las mediciones se reportarán en el formato anexo.

REPORTE DE CAMPO DE INSPECCION
 TECNICA DE TUBERIAS
 INSPECCION DE RECTIFICADORES

IDENTIFICACION DE RECTIFICADOR:							
CORRIENTE DE ENTRADA	CORRIENTE DE SALIDA		EFICIENCIA	RESISTENCIA DEL CIRCUITO	RESISTENCIA DEL CIRCUITO MEDIDO		
	DC Volts	Dc amperes			(DC volts)/(DC amp) 100 AC watts	$\frac{E}{I}$ volts amperes	E (volts)
<u>K.N.3600</u> T							

9. TUBERÍA SUBMARINA

9.1. GENERALIDADES

En esta sección se presenta un esquema general del proceso de diseño de una tubería submarina. En algunos casos se presentan ejemplos numéricos, como el de las fuerzas hidrodinámicas y el diseño de la protección catódica. En otras situaciones, se ha considerado más práctico describir el procedimiento constructivo, omitiendo cálculos, que restarían claridad a la exposición, tal es el caso del cruce con la costa.

Cabe mencionar que todas las Tablas y Figuras a las que se hace referencia en este ejemplo se encuentran en el capítulo 8 del "Manual de Análisis y Diseño de Tubería de Acero para Líneas de Conducción de Agua Potable".

9.2. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UNA TUBERÍA SUBMARINA

Para realizar el diseño de una tubería submarina, el diseñador debe dividir la tubería en línea regular y obras especiales. Generalmente, el diseño de las obras especiales requiere mayor grado de detalle que la línea regular.

Una vez que se ha seleccionado la ruta y se cuenta con la información oceanográfica y geotécnica descrita en el capítulo 8 del manual, la secuencia de actividades para diseño puede proseguir como se ilustra en el diagrama de flujo 10.12 (capítulo 10 de esta guía)

Siguiendo el orden mostrado en la Figura 10.12, se presentan a continuación algunos ejemplos numéricos o la descripción del procedimiento constructivo correspondiente.

Con objeto de lograr la mayor claridad posible en la exposición, se plantearon los datos de un ejemplo hipotético, para el cual se realizarán todos los cálculos y procedimientos. Supondremos la necesidad de dotar de agua potable a la población de Isla Esperanza, a 27.5 Km de) continente, en cuya costa se encuentra la fuente de abastecimiento. Para transportar el volumen de agua necesario, se requiere de una tubería de 1,220 mm de diámetro interno. El tirante de agua máximo es de 25 m, los demás datos se indican en los ejemplos:

9.3. SELECCIÓN DE LA RUTA

La ruta seleccionada para una tubería submarina queda plasmada en los planos de alineamiento. Estos planos deben contener toda la información necesaria para que el constructor pueda depositar la línea en la localización elegida, asimismo debe contener datos sobre las zonas de riesgo que debe evitar dicha línea.

Para ejemplificar un proyecto, se incluye aquí un plano denominado "Aproximación a la Costa". Se omitieron planos que hubieran mostrado el alineamiento del km 0+000

al km 3+000, ya que representaría otra aproximación a la costa, como la ilustrada en el Dibujo Numero 9.2.

El Dibujo Numero 9.1 también contiene toda la información de un plano típico de alineamiento, que sobre la referencia de un sistema de coordenadas presenta el trazo de la línea, rumbos, kilometrajes y datos de las curvas horizontales y verticales necesarias. Se dan datos de la tubería tales como espesor, material, recubrimientos anticorrosivos, lastre de concreto, masa de distribución de los ánodos de sacrificio. Además en el plano debe incluirse la sección transversal de la tubería, con las dimensiones de la zanja que la alojará.

9.4. APROXIMACIÓN A LA COSTA

El Dibujo Numero 9.2, Aproximación a la Costa, contiene los datos del alineamiento necesario para trazar la llegada de la tubería a la costa. Este plano queda complementado con el Dibujo Numero. 9.3 en donde se describe con todo detalle el procedimiento constructivo que se deberá emplear para instalar la tubería sobre la costa. Básicamente el procedimiento constructivo consiste en colocar la barcaza de tendido en el sitio más próximo a la playa, sobre el alineamiento de la tubería, dependiendo del calado de la embarcación. En la playa y sobre la proyección del alineamiento se instala un malacate que servirá para aplicar una tensión a la tubería, que será contrarrestada por los tensionadores de la barcaza. Aplicando una tensión constante sobre ambos extremos de la tubería, se podrá controlar mejor su posición mientras se adicionan tramos de tubo hasta que un extremo de la tubería alcance la playa. La tubería debe flotar sobre la superficie de mar para que pueda avanzar hasta la playa. La flotación necesaria se logra con la instalación de boyas que se suman a la flotación propia de la tubería, que se mantiene herméticamente sellada con la instalación de una cabeza de jalado en el extremo por el malacate de la playa.

Una vez que se ha completado todo el tramo de la tubería, desde la barcaza hasta la playa, se hace descender al fondo retirando las boyas. Posteriormente, la barcaza draga se encargará de cavar la zanja y depositar la tubería en el fondo de ésta. Es importante notar que la profundidad de la zanja debe ser mayor en la aproximación a la playa, ya que es aquí donde el oleaje genera mayor arrastre de sólidos o erosión.

9.5. CÁLCULO DE FUERZAS HIDRODINÁMICAS

El diseño de tuberías submarinas es un proceso iterativo, como acontece en muchos otros campos de la ingeniería. Es decir, es necesario estimar inicialmente ciertos parámetros, desarrollar los procedimientos de cálculo y obtener entonces otros parámetros que deben ser comparados con los criterios y limitaciones de diseño que marcan las normas aplicables. Si estos últimos satisfacen los requisitos de diseño, entonces se consideran correctos los parámetros estimados inicialmente; en caso contrario, se deberán proponer nuevamente los parámetros iniciales y repetir el proceso de cálculo.

Para desarrollar los ejemplos numéricos sobre diseño de tuberías submarina, se propondrá el espesor de pared de la tubería de acero, que inicialmente puede obtenerse considerando los efectos de presión interna, sobre-presión, etc., tal como se describe en el capítulo 6 Análisis y Diseño. Dicho espesor será revisado aquí por los efectos de fuerzas hidrodinámicas.

Análisis de estabilidad hidrodinámica.

- Se tiene una tubería que será instalada bajo el mar. Dicha tubería tiene las siguientes características.
- Especificación ASTM A570 GR 36
- Diámetro, $d = 1219$ mm
- Espesor de pared, $t = 14.27$ mm
- Espesor de recubrimiento anticorrosivo, dos capas de esmalte de alquitrán de hulla y dos capas de fibra de vidrio, cada una de 3.97 mm, resultando en total de $t_{ac} = 7.94$ mm.

Densidad de recubrimiento anticorrosivo = $18,044 \text{ N/m}^3$ ($1,840 \text{ kg/m}^3$)
 Peso del tubo de acero, vacío = $4,159 \text{ N/m}$ (424.10 kg/m)

Primeramente se revisará la estabilidad hidrodinámica con el tubo vacío, es decir, inmediatamente después de su instalación. Con el propósito de reducir el nivel de esfuerzos sobre la tubería, durante el proceso de instalación, ésta se instala vacía. Se propone para iniciar la revisión un lastre de concreto de las siguientes características:

Densidad del lastre de concreto = $25,154 \text{ N/m}^3$ ($2,565 \text{ kg/m}^3$)

Espesor del lastre de concreto = 0.0762 m.

El volumen total de una longitud unitaria de tubo, incluyendo recubrimientos es:

$$V = A \times I = \frac{\pi}{4} d_e^2 \times 1 = \frac{\pi}{4} (1.372)^2 \times 1 = 1.478 \text{ m}^3/\text{m}$$

El diámetro exterior es de $= 1.219 + 0.1524 = 1.372$ m

Peso del volumen de agua desalojado:

$$P = V \rho_{am}$$

$$\rho_{am} = 10,052 \text{ N/m}^3 \text{ (} 1,025 \text{ kg/m}^3 \text{) (densidad del agua de mar)}$$

$$P = (1.478)(10,052) = 14,857 \text{ N/m}$$

Ahora comparemos la masa del agua desalojada contra la masa del tubo.

$$P_{ac} = 4,159 \text{ N/m (masa de la tubería de acero)}$$

V_{rec} = volumen de recubrimiento anticorrosivo.

$$D_e = 1.219 + 0.00794 = 1.227 \text{ m}$$

$$d_e = 1,219 \text{ m}$$

$$V_{rec} = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - d^2) (l) = \frac{\pi}{4} (1.227^2 - 1.219^2) (1) = 0.015 \text{ m}^3/\text{m}$$

$$\rho_{rec} = 18,044 \text{ N/m (masa volúmica del recubrimiento)}$$

$$P_{rec} = (V_{rec}) (\rho_{rec}) = (0.015) (18,044) = 270.66 \text{ N/m}$$

V_{con} = volumen del concreto

$$D_e = 1.219 + 0.1524 = 1.372 \text{ m}$$

$$d_e = 1.219 + 0.00794 = 1.227 \text{ m}$$

$$V_{con} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) (l) = \frac{\pi}{4} (1.372^2 - 1.227^2) (1) = 0.296 \text{ m}^3/\text{m}$$

$$P_{con} = (V_{con}) (\rho_{con}) = (0.296) (25,154) = 7,445.58 \text{ N/m}$$

El peso total del tubo es:

$$P_{TUB} = P_{ac} + P_{rec} + P_{con}$$

$$P_{TUB} = 4,159 + 270.66 + 7,445.58 = 11,875.24 \text{ N/m}$$

El empuje debido al volumen de agua de mar desplazada es mayor que la masa de la tubería vacía.

$$P = 14,857 \text{ N/m} < P_{TUB} = 11,875.24 \text{ N/m}$$

Por lo tanto, debe incrementarse el espesor del lastre de concreto o la densidad de este. Debe tenerse cuidado al seleccionar la densidad del lastre de concreto, pues algunas densidades son difíciles o costosas de lograr. Por ejemplo, para alcanzar la densidad de $29,861 \text{ N/m}^3$ ($3,045 \text{ kg/m}^3$) es necesario emplear como agregado

mineral de hierro, escoria de alto horno o barita, lo cual hace que se dificulte la fabricación de dicho concreto en el ámbito nacional.

En el caso del ejemplo que estamos desarrollando, se mantendrá la misma densidad del concreto y se incrementará el espesor del lastre a 0.1143 m, por lo que $D = 1.2192 + (0.1143 \times 2) = 1.448$ m.

Repitiendo el proceso del cálculo anterior, para un espesor de lastre de concreto de 0.1143 m, se tiene que la masa del tubo vacío es de 16,104.09 N/m (1,642.16 kg/m), esto es, una densidad relativa 1.08.

El siguiente paso consiste en determinar el valor de las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre el tubo. Para ello es necesario conocer primero las condiciones ambientales. Los parámetros que definen dichas condiciones son:

- Período de ocurrencia: tormenta de un año.
- $H_s = 4.20$ m (altura de ola significativa)
- $T_s = 9$ s (período de la ola significativa)
- $d = 25$ m (tirante de agua)

Considerando el oleaje en dirección perpendicular al eje longitudinal de la tubería.

$$\begin{aligned}U_c &= 0.122 \text{ m/s (velocidad de la corriente a 1.0 m arriba del fondo, incluyendo efectos de viento, corriente marina y marea)} \\ \theta &= 0^\circ \text{ (pendiente del lecho marino)} \\ \mu &= 0.5 \text{ (coeficiente de fricción entre el suelo y el tubo lastrado)} \\ D &= 1.2192 + (0.1143 \times 2) = 1.448 \text{ m (diámetro considerando el nuevo espesor del lastre)}\end{aligned}$$

El período de tormenta de ocurrencia que se considera es de un año, porque es práctica común que la tubería pueda permanecer sobre el lecho marino hasta un año, antes de que sea depositada en una zanja.

Por otra parte, es conveniente aclarar que los parámetros ambientales son resultado de mediciones realizadas en el sitio, a través de campañas oceanográficas. En nuestro país está limitado el número de áreas marinas para las que se cuenta con estos datos. Sin embargo, es posible recurrir a compañías extranjeras, principalmente en USA, ya que pueden realizar extrapolaciones de sus datos oceanográficos a las distintas regiones del Golfo de México y del Océano Pacífico.

Para continuar con el ejemplo, se necesitarán las fórmulas que aparecen en la Tabla 8.3. Se empleará la teoría del oleaje lineal.

1. Verificamos que la teoría lineal, o de Airy es válida:

$$\frac{d}{gT_s^2} = \frac{25}{9.81(9)^2} = 0.0315$$

Como se observa en la Figura 8.12 la teoría lineal es válida.

2. La longitud de ola en aguas profundas está dada por:

$$L_o = \frac{gT_s^2}{2\pi} = \frac{(9.81)(9)^2}{2\pi} = 126.50 \text{ m}$$

Ahora obtenemos la relación:

$$\frac{d}{L_o} = \frac{25}{126.50} = 0.1976$$

De la Figura 8.10

$$\frac{d}{L} = 0.220 \qquad \frac{H}{H_o} = 0.950$$

Con estas relaciones se toma en cuenta el efecto del fondo. Despejando, L y H.

$$L = 113.64 \text{ m}$$

$$H = 3.99 \text{ m}$$

3. La velocidad horizontal de la partícula de agua está dada en la Tabla 8.3b

$$\left(\frac{1}{25}\right) < 0.22 < \left(\frac{1}{2}\right)$$

$$U = \left(\frac{H}{2}\right) \left(\frac{gT_s}{L}\right) \left(\frac{\cosh(2p(z+d)/L)}{\cosh(2\pi d/L)}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T_s}\right)$$

La velocidad y la aceleración se evalúan a 1.0 m por encima del lecho marino, debido al fenómeno de la capa límite.

Por otra parte, la velocidad es máxima cuando $t = 0$

$$U = \left(\frac{3.99}{2}\right) \left(\frac{9.81 \times 9}{113.64}\right) \left(\frac{\cosh(2\pi(-24+25)/113.64)}{\cosh(2\pi \times 25/113.64)}\right) \cos\left(\frac{2\pi \times 0}{9}\right)$$

$$U = 0.733 \text{ m/s}$$

La velocidad efectiva la obtenemos de la ecuación 8.13

$$U_e^2 = 0.778 U^2 \left(\frac{D}{Y_0}\right)^{0.286}$$

$$U_e^2 = (0.778)(0.733)^2 \left(\frac{1.372}{1}\right)^{0.286}$$

$$U_e^2 = 0.458 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$U_e = 0.676 \text{ m/s}$$

A la velocidad efectiva, provocada por el movimiento de las olas, hay que sumar la velocidad de corriente marina provocada por efecto del viento y mareas. Generalmente, los estudios oceanográficos deben de proporcionar la velocidad de corriente marina a un metro del fondo.

$$U_c = 0.122 \text{ m/s}$$

Con la velocidad total $U_e + U_c$, calculamos el número de Reynolds.

$$U_T = 0.67 + 0.122 = 0.798 \text{ m/s}$$

$$R_e = \frac{U_T D}{\nu} = \frac{0.798(1.448)}{0.0929 \times 10^{-5}} = 12.438 \times 10^5$$

$\nu = 0.0924 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (viscosidad cinemática del agua).

De la Tabla 8.4 tomamos, con el número de Reynolds, los valores recomendados para los coeficientes C_D , C_L y C_M .

$$\begin{aligned} C_D &= 0.7 \\ C_L &= 0.7 \\ C_M &= 1.5 \end{aligned}$$

La fuerza horizontal total que actúa sobre el tubo es:

$$F_H = F_D + F_I$$

Hasta este momento tenemos todos los elementos para determinar la fuerza de arrastre, F_D , pero para calcular la fuerza de inercia, F_I , es necesario calcular la aceleración de las partículas. Dicha aceleración está dada por:

$$A_e = \frac{dU_e}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{g\pi H}{L} \right) \left(\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T_s}\right)$$

$$A_e = \left(\frac{g\pi H}{L} \right) \left(\frac{\cosh[2\pi(z+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \right)$$

Cuando $t = 0$, la aceleración es cero:

$$A_e = 0$$

Ahora podemos proceder a calcular las fuerzas hidrodinámicas:

Fuerza horizontal de las ecuaciones 8.9 y 8.10

$$F_H = F_D + F_I$$

$$F_H = \left(\frac{1}{2} \rho_{am} C_D U_e |U_e| D \right) + \left(\rho_{am} C_M \frac{\pi D^2}{4} A_e \right)$$

$$F_H = \frac{1}{2} (10,052)(0.70)(0.676) |0.676| (1.448) + 0$$

$$F_H = 2,328 \text{ N/m}$$

La fuerza de levantamiento es:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_{am} C_L D U_e^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} (10,052)(0.7)(1.448)(0.458)$$

$$F_L = 2,333.21 \text{ N/m}$$

Sustituyendo F_H y F_L en 8.8, para $\theta = 0$ (pendiente del lecho marino = 0) y $\mu = 0.5$, obtenemos la masa mínima que debe tener la tubería para mantenerse estable ante las fuerzas hidrodinámicas:

$$W = \frac{F_D + F_I + \mu F_L}{\mu \cos\theta + \sin\theta}$$

$$W = \frac{1}{\pi}(F_D + F_I) + F_L$$

$$W = \frac{1}{0.5}(2,429.70) + 2,333.21$$

$$W = 7,192.61 \text{ N/m}$$

Esto quiere decir que la masa de la tubería (16,104 N/m) es mayor que la mínima masa requerida (14,857 N/m), para resistir las fuerzas hidrodinámicas, para el caso en que $t = 0$. Sin embargo, un diseño completo debe incluir una revisión de la fuerzas hidrodinámicas para diferentes ángulos de fase de la ola, de modo que se encuentre la máxima fuerza hidrodinámica (combinación de fuerza de arrastre más fuerza de inercia), para la cual el lastre deberá ser adecuado.

9.6. DISEÑO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA

Para ejemplificar el proceso de diseño de un sistema de protección catódica, se supondrá una tubería submarina de las siguientes características:

- Diámetro = 1.2192 m.
- Especificación: ASTM A-570 GR 36
- Longitud de la línea, LT = 27500 m.
- Recubrimiento anticorrosivo externo: esmalte de alquitrán de hulla, dos capas de 0.00397 m. reforzado con dos capas de fibra de vidrio, total
- $t_c = 0.00794$ m
- Espesor del lastre de concreto = 0.1143 m
- La tubería permanecerá bajo el lecho marino en una zanja, a un m de profundidad sobre el lomo del tubo.

1. Primer paso consiste en determinar la superficie de la tubería que se considera dañada. De la Tabla 8.5 tenemos que para un recubrimiento de espesor grueso, como el esmalte de alquitrán de hulla reforzado con fibra de vidrio, se tienen los siguientes porcentajes:

Inicial	1%
Medio	10%
Final	20%

Conviene aclarar que el esmalte de alquitrán de hulla epóxico, señalado en la Tabla 8.5, es un recubrimiento delgado, diferente al esmalte de alquitrán de hulla reforzado con fibra de vidrio, que es al que se refiere el presente ejemplo.

La superficie exterior total de la tubería es:

$$A_T = \pi DT = \pi(1.2192)(27,500) = 105,331.3 \text{ m}^2$$

El área de recubrimiento dañado es por lo tanto:

inicial	$A_T(0.01)$	=	1,053 m ²
media	$\dot{A}_T(0.10)$	=	10,533 m ²
final	$\dot{A}_T(0.20)$	=	21,066 m ²

2. A continuación se determinará la masa total de los ánodos, necesario para proteger la tubería durante una vida útil de 30 años.

De 8.17 despejamos W, masa de los ánodos.

$$W = \frac{LEI}{u}$$

L	= 30 años
E	= 6.13 kg/A-año
I	= 40 m A/m ²
u	= 0.80, factor de utilización.

El valor de E, velocidad de consumo de los ánodos, está tomado de la Tabla 8.6. Los ánodos que se instalarán en esta línea son de una aleación de Aluminio, Zinc a Indio y permanecerán dentro de una zanja. Se observa que la velocidad de consumo depende de la temperatura ambiente. Se considerará que la línea estará instalada en aguas con una temperatura de 298.15 °K (25 °C). El valor de E = 6.13 kg/A-año se obtiene interpolando los valores tabulados.

Por lo que respecta a la densidad de corriente requerida, I, en la Tabla 8.6 se recomiendan valores para los casos de la tubería enterrada y tubería sobre el lecho marino. Tomaremos los valores recomendados para tubería enterrada. Cabe aclarar, sin embargo, que dichos valores se consideran conservadores, y es posible tomar en cuenta valores menores, dependiendo de los datos que se tengan del sitio particular. Por otra parte, se dan tres valores en la citada Tabla 8.6, que son valores de corriente requeridos al inicio, al final y promedio con respecto a la vida útil de la línea. El valor medio es el que se utiliza para determinar la masa total de los ánodos, en este caso 40 m A/m². Por tanto, el requerimiento total de corriente es:

$$I = (40 \text{ mA/m}^2)(10,533 \text{ m}^2) = 421,320 \text{ MA} = 421.32 \text{ A}$$

Volviendo a la ecuación 8.17, obtendremos la masa total de los ánodos:

$$W = \frac{(30 \text{ años})(6.13 \text{ kg/A-año})(421.32 \text{ A})}{0.80}$$

$$W = 96,850.90 \text{ kg}$$

El sistema debe estar protegido por ánodos de sacrificio, que en conjunto pesen 96,850.9 kg.

- Distribución de los ánodos; para determinar la separación de los ánodos es necesario conocer previamente la masa de cada ánodo. Normalmente habrá que consultar con los fabricantes de ánodos las dimensiones y masas en que se producen. En este caso, consideraremos que los ánodos tendrán una longitud de 0.2286 m.

El espesor de dichos ánodos queda fijado por el espesor del lastre de concreto, para este ejemplo 0.1143 m, que es el mismo que se calculó en el ejemplo 8.1. Con las dimensiones señaladas y la densidad de la aleación de los ánodos, se determinará la masa de un ánodo.

$$\begin{aligned} \text{Espesor} &= 0.1143 \text{ m.} \\ \text{Longitud} &= 0.2286 \text{ m.} \end{aligned}$$

Del ejemplo 8.1, el diámetro exterior del tubo más el recubrimiento anticorrosivo es; $d = 1.227 \text{ m}$.

El diámetro exterior total, del mismo ejemplo 8.1, incluyendo el lastre de concreto es; $D = 1.448 \text{ m}$.

La densidad de la aleación de aluminio (Galvalum III) de la que están compuestos los ánodos es:

$$\rho_a = 0.095 \text{ lb/plg}^2 (2,631.95 \text{ kg/m}^3)$$

La masa individual de un ánodo es:

$$P_a = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) L \rho_a$$

$$P_a = \frac{\pi}{4} (1.448^2 - 1.227^2) (0.2286) (2,631.95)$$

$$P_a = 279.36 \text{ kg}$$

Ahora, el número de ánodos necesarios es:

$$N_a = \frac{W}{P_a} = \frac{96,850.9}{279.36} = 346.6 \text{ ánodos} = 347 \text{ ánodos}$$

La longitud total de la línea entre el número de ánodos nos da la separación

$$S = \frac{L_T}{N_a} = \frac{27,500}{347} = 79.25 \text{ m}$$

Si consideramos que la longitud nominal de cada tramo de tubo es de 12.00 m.

$$S = \frac{79.25}{12.00} = 6.60 \text{ tramos}$$

Es decir, a cada seis tramos debe instalarse un ánodo.

4. Revisión por capacidad de corriente drenada de cada ánodo. Es necesario revisar la separación entre los ánodos de acuerdo con la cantidad de corriente que puede drenar cada uno de ellos, la cual depende no de la masa sino de la forma y área expuesta del mismo. De acuerdo con la ecuación 8.16

$$I_a = \frac{\Delta V}{R_a}$$

ΔV o potencial motriz, está tomado de la Tabla 8.6, para el caso de ánodos de Al-Zn-In en lodo salino y a una temperatura que varía entre 278.25 °K y 303.15 °K (5°C y 30 °C), interpolando los valores para 298.15 °K (25 °C) tenemos:

$$\Delta V = 230 \text{ MV} = 0.230 \text{ V}$$

La resistencia del circuito se toma como la resistencia anódica, R_a , que depende de la superficie expuesta y forma del ánodo. De la Figura 8.13, tenemos que:

$$R_a = \frac{0.315\xi}{\sqrt{A}}$$

Datos:

- ξ = 20 Ohm-cm = 0.20 Ohm-m, de la Figura 8.13.
- A = superficie expuesta del ánodo.
- A = $1.4478 (\pi) (0.2286)^2 = 1.0398 \text{ m}^2$.

Entonces

$$R_a = \frac{0.315(0.20)}{1.0398} = 0.060589 \text{ Ohm}$$

Ahora podemos conocer la corriente drenada por cada ánodo.

$$I_a = \frac{\Delta V}{R_a} = \frac{0.230 \text{ V}}{0.060589 \text{ Ohm}} = 3.7961 \text{ A}$$

Dividiendo la demanda total de corriente entre corriente drenada por un ánodo, tendremos la separación entre ánodos. En este punto conviene aclarar que esta revisión debe realizarse con la demanda total de corriente al final de la vida útil del sistema de protección catódica.

Por tanto:

$$I_T = I \times A_{\text{final}}$$

$$\begin{aligned} I &= 30 \text{ mA/m}^2, \text{ de la Tabla 8.6} \\ A_{\text{final}} &= 21066 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$I_T = (30 \text{ mA/m}^2)(21,066 \text{ m}^2) = 631,980 \text{ mA} = 631.98 \text{ A}$$

Ahora podemos conocer la separación de ánodos por demanda de corriente al final de la vida útil del sistema.

$$N_a = \frac{I_T}{I_a} = \frac{631.98 \text{ A}}{3.7961} = 166.48 \text{ ánodos}$$

5. Finalmente, comparamos el número de ánodos requeridos por demanda de corriente, del punto 4, contra el número de ánodos requerido por masa, punto 3. El mayor número de ánodos requeridos es el que deberá instalarse.

Observamos que el número de ánodos requerido por masa es mayor, es decir, 347 ánodos. Ya en el mismo punto 3 se encontró que el espaciamiento de los ánodos debe ser de 6.60 tramos, por lo que tenemos que sólo puede instalarse un ánodo cada seis tramos. Aun debe revisarse si esta separación satisface la recomendación de "Rules for Submarine Pipeline Systems", 1981 de Det Norske Veritas (DNV) en el sentido de que la distancia entre ánodos no debe exceder 150 m. Si la longitud nominal de los tubos de acero es de 12.00 y la separación es de seis tramos, la distancia entre ánodos es de 72 m.

Por lo tanto, la especificación final del sistema de protección catódica para este ejemplo es:

Dimensiones de los ánodos:

- Diámetro interno = 1.227 m.
- Espesor = 0.1143 m.

- Longitud =0.2286 m.
- Masa =279.36 kg.

Tipo de ánodos:

Aleación de Al-in-2n (Galvalum III)

Separación entre ánodos:

- Un ánodo a cada seis tramos de tubo de 12.00 m de longitud. (72 m)

Número total de ánodos:

$$N_T = \frac{27,500 \text{ m}}{72 \text{ m}}$$

$$N_T = 382 \text{ ánodos}$$

9.7. REVISIÓN DE ESFUERZOS EN LA ZONA DE CURVATURA SUPERIOR DURANTE EL TENDIDO

Como se señaló en el capítulo 8, el método más comúnmente empleado para instalar tuberías en el fondo del mar es aquél en el que la tubería adquiere un perfil de S, conforme es bajada al mar. Se mencionó también que los métodos de análisis son diferentes para la sección de curvatura superior a inferior. En este ejemplo únicamente se presentará el proceso básico para determinar los esfuerzos debidos al radio de curvatura superior, para la tubería submarina del ejemplo 8.1. Los parámetros de dicha tubería son:

Diámetro, $D = 1.2192 \text{ m} = 1,219.2 \text{ mm}$

Espesor de pared, $wt = 0.014275 \text{ m} = 14.275 \text{ mm}$

Especificación: ASTM A-570 GR 36

Esfuerzo de fluencia especificado, $f_y = 248 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidad, E acero, $E = 205,940 \text{ MPa}$

Factor de seguridad, $F_d = 0.85$

De la ecuación 8.3

$$R = \frac{ED}{2f_y F_s} \quad (8.3)$$

El radio máximo que se puede aplicar a la tubería en la zona de curvatura superior es:

$$R = \frac{(205,940)(1,219.2)}{2(248)(0.85)} = 595,546 \text{ mm} = 595.5 \text{ m}$$

Es necesario sumar al esfuerzo debido al radio de curvatura, el esfuerzo que produce la tensión que hay que aplicar a la tubería. La determinación de esta tensión y la determinación de la longitud del pontón, son parte de los resultados que deben proporcionar los análisis de la curva inferior de la tubería. Sin embargo, debido a la complejidad de las ecuaciones que representan el comportamiento de la curva inferior es necesario el empleo de programas de cómputo sofisticados. Por considerarse más allá del alcance del presente manual, no se ejemplificará el análisis de la zona de curvatura inferior.

10. DIAGRAMAS DE FLUJO

Como ayuda de diseño, a continuación se presentan los siguientes diagramas de flujo en los cuales se indican los procedimientos específicos utilizados para el desarrollo de la actividad mencionada:

10.1. ANÁLISIS Y DISEÑO

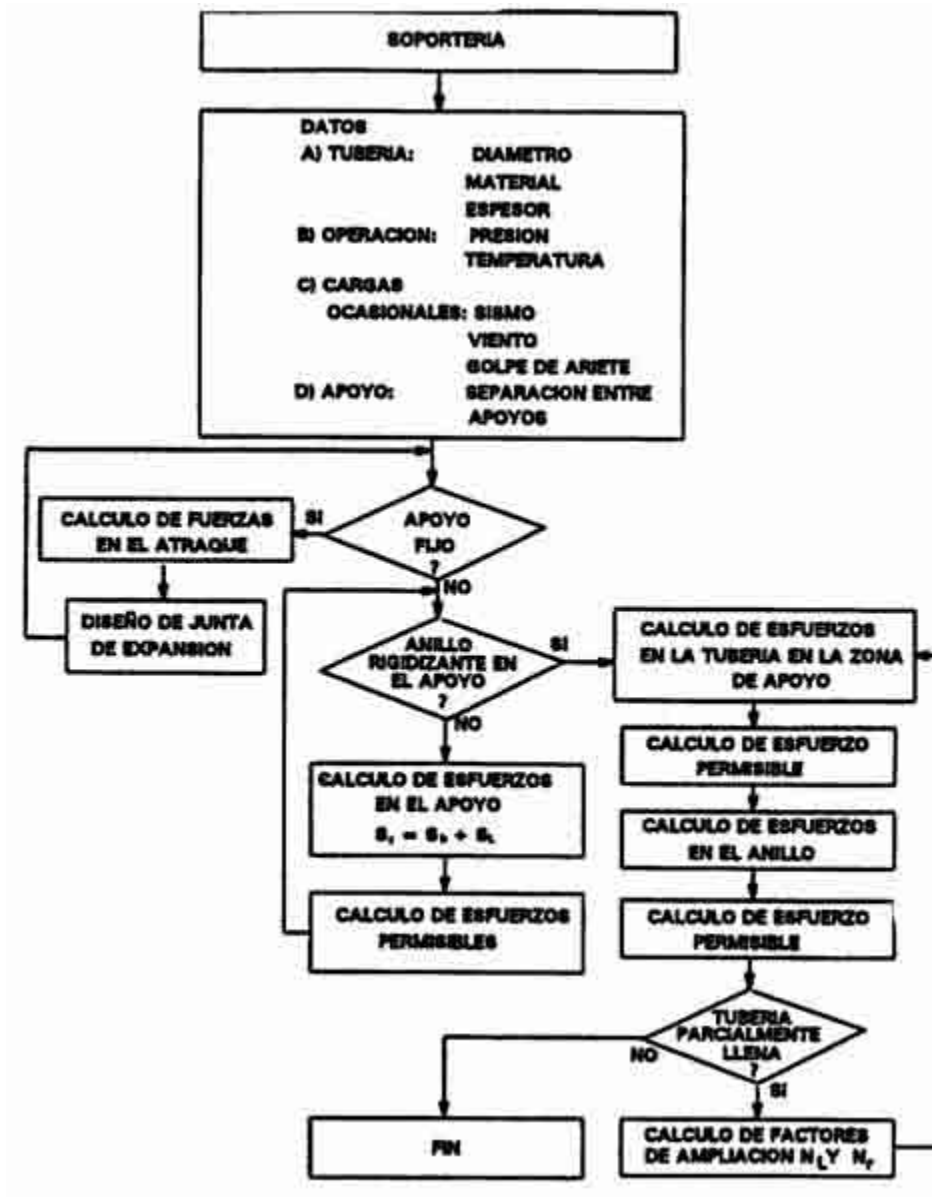


Figura 10.1 Análisis y diseño

10.2. SOBREPRESIÓN POR EL FENÓMENO TRANSITORIO (GOLPE DE ARIETE)

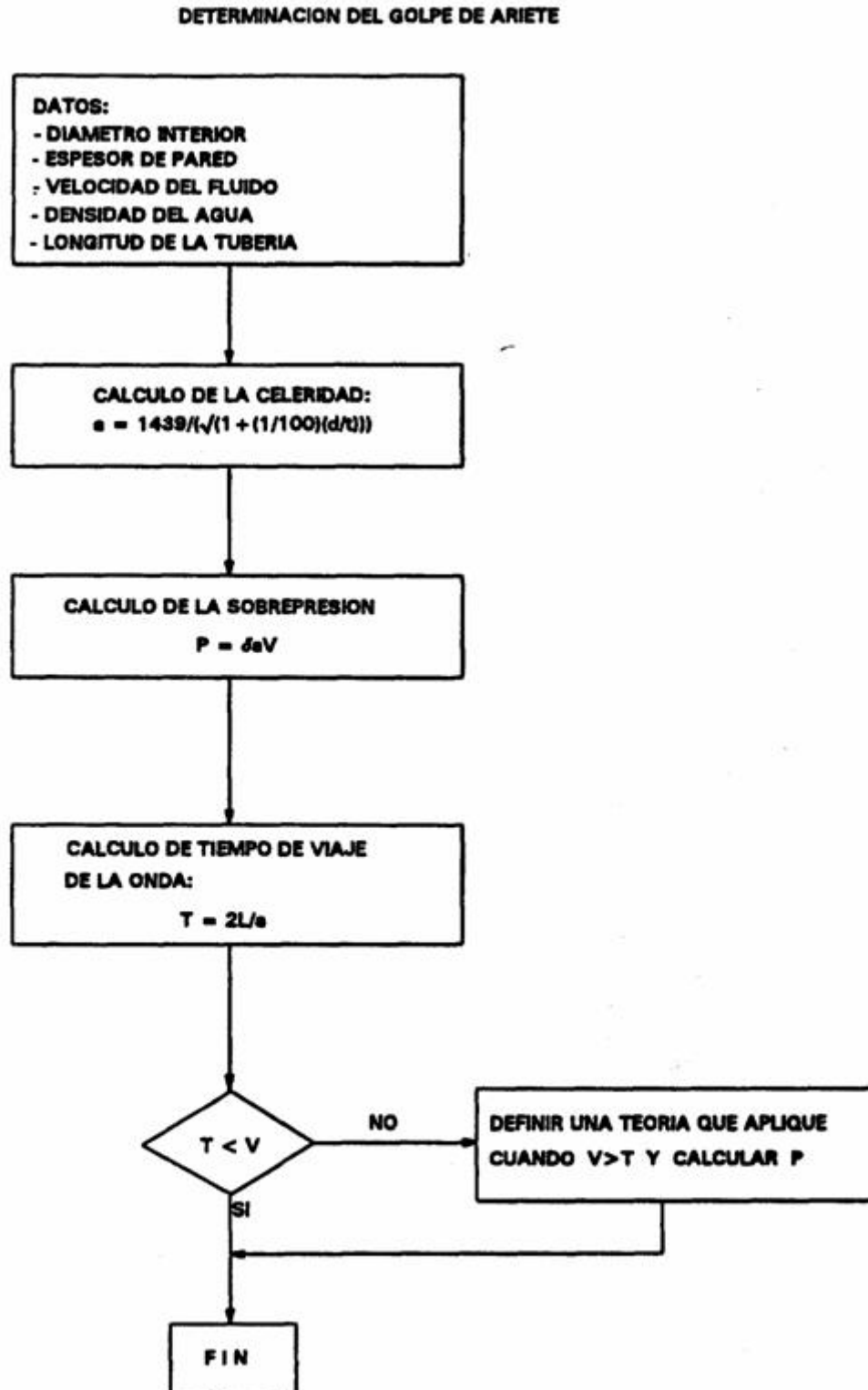


Figura 10.2 Sobrepresión por el fenómeno transitorio (golpe de ariete)

10.3. CARGA MUERTA DEBIDA AL PESO DEL RELLENO

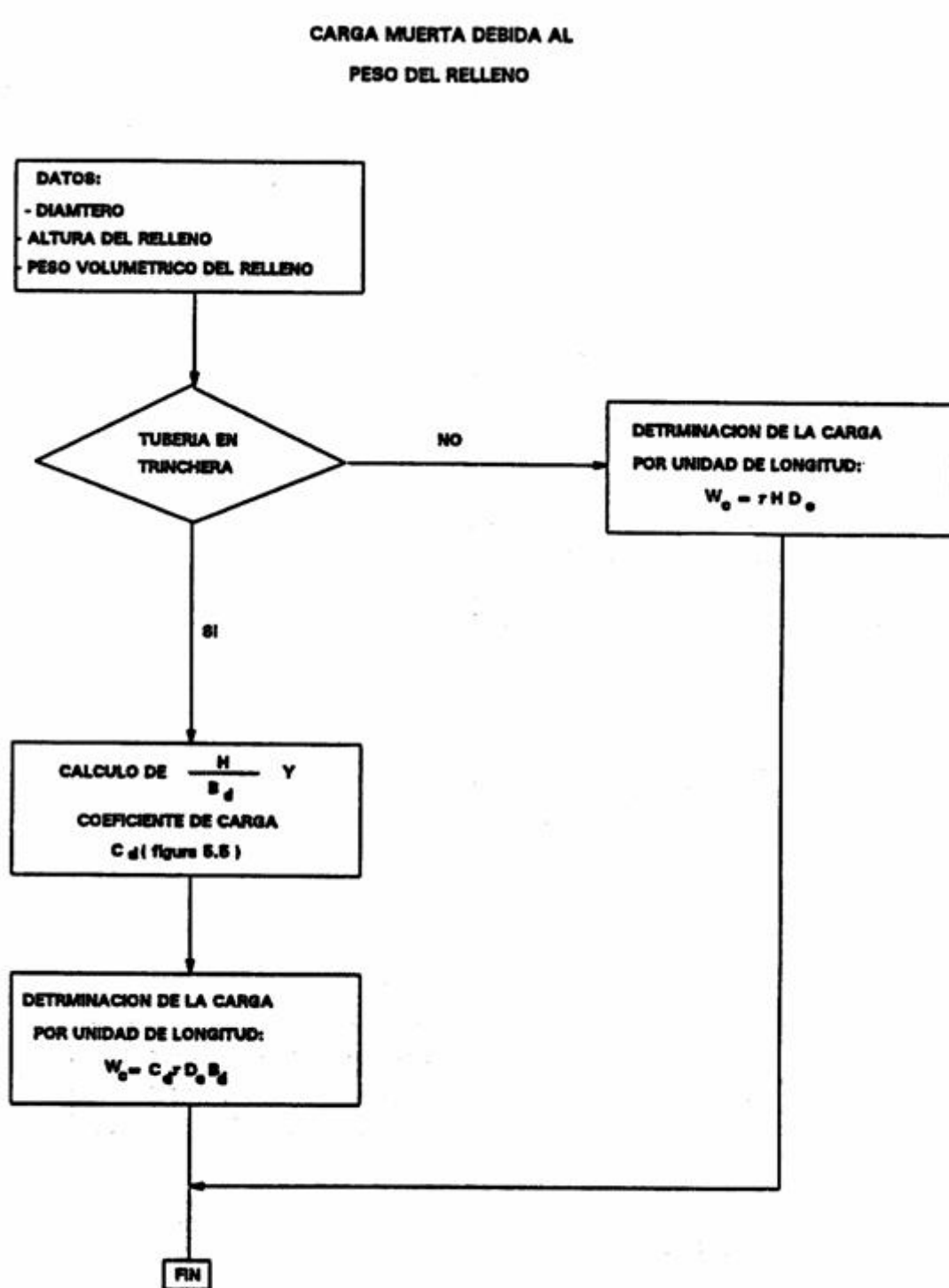


Figura 10.3 Carga muerta debida al peso del relleno

10.4. FUERZA SÍSMICA EN TUBERÍA SUPERFICIAL

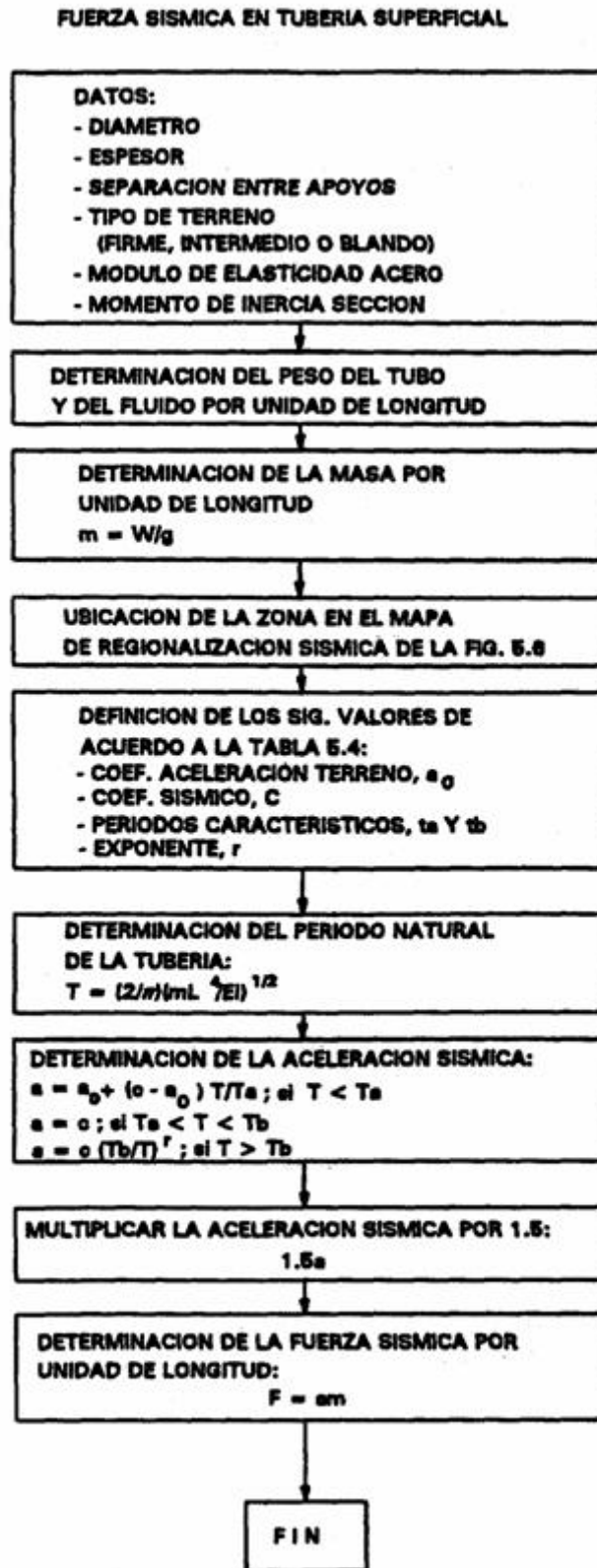


Figura 10.4 Fuerza sísmica en tubería superficial

10.5. FUERZA POR VIENTO EN TUBERÍA SUPERFICIAL

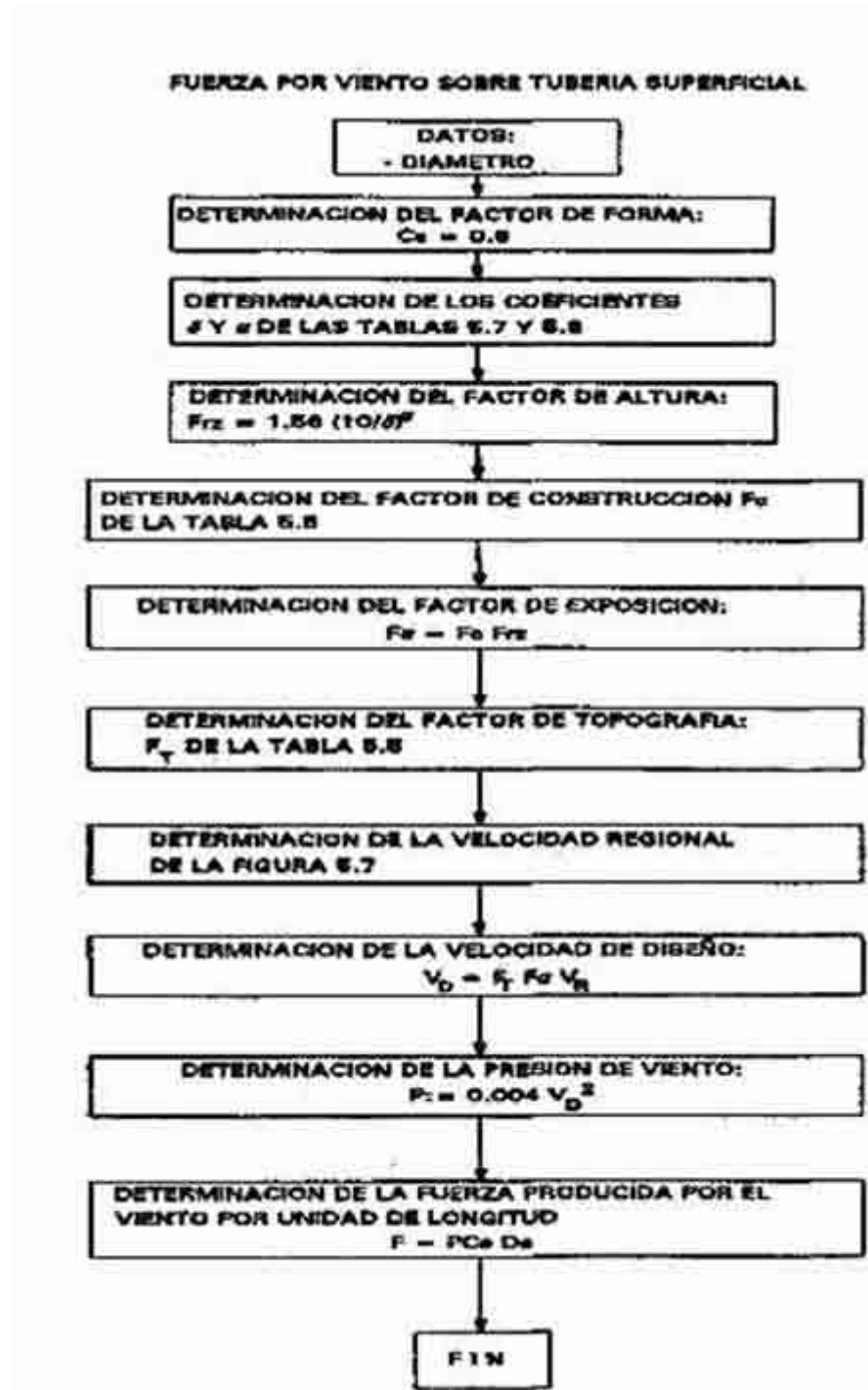


Figura 10.5 Fuerza por viento en tubería superficial

10.6. CARGA VIVA POR TRANSITO DE VEHÍCULOS

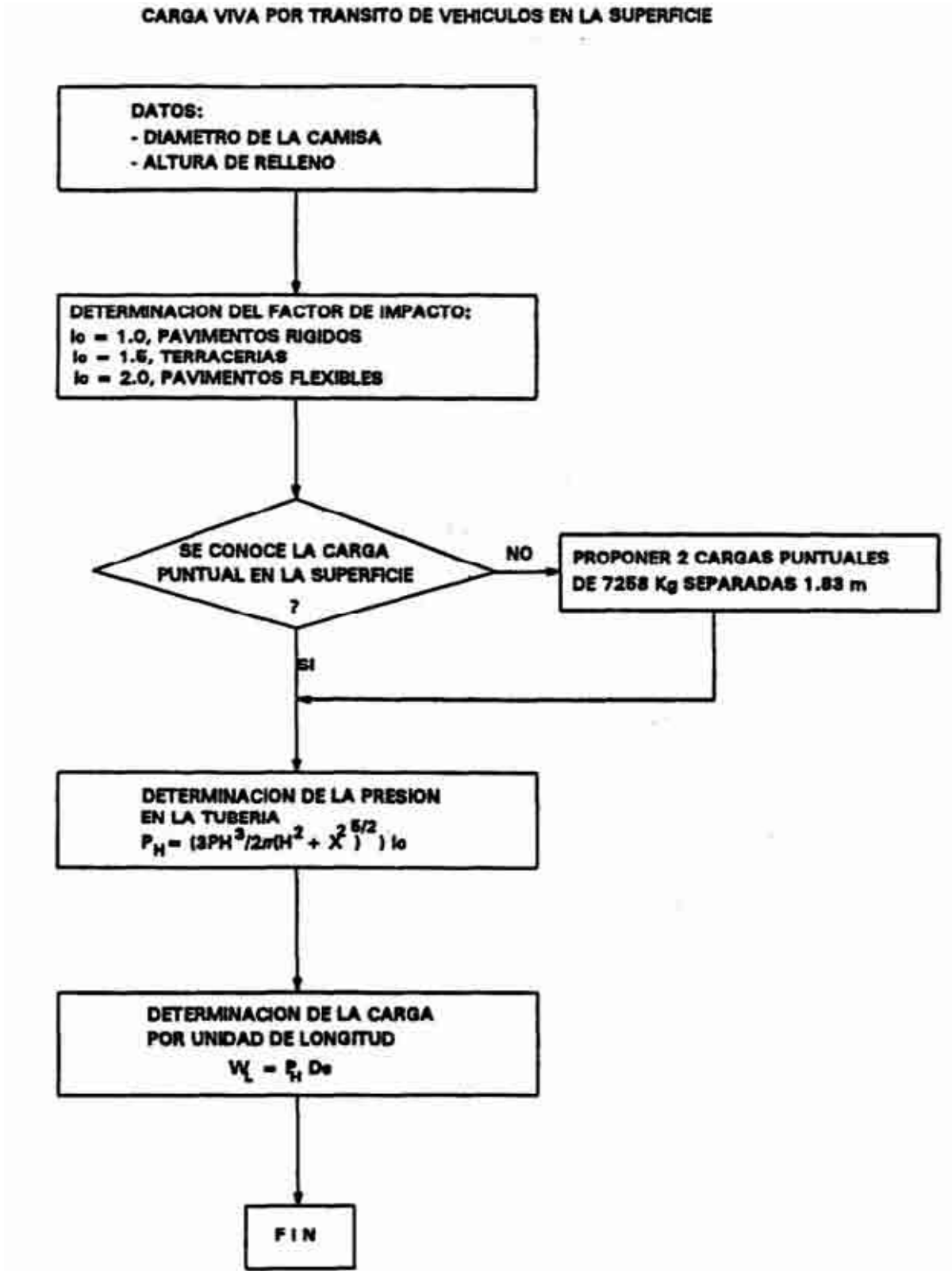


Figura 10.6 Carga viva por transito de vehículos

10.7. CARGA VIVA POR TRANSITO DE MAQUINARIA Y EQUIPO PESADO

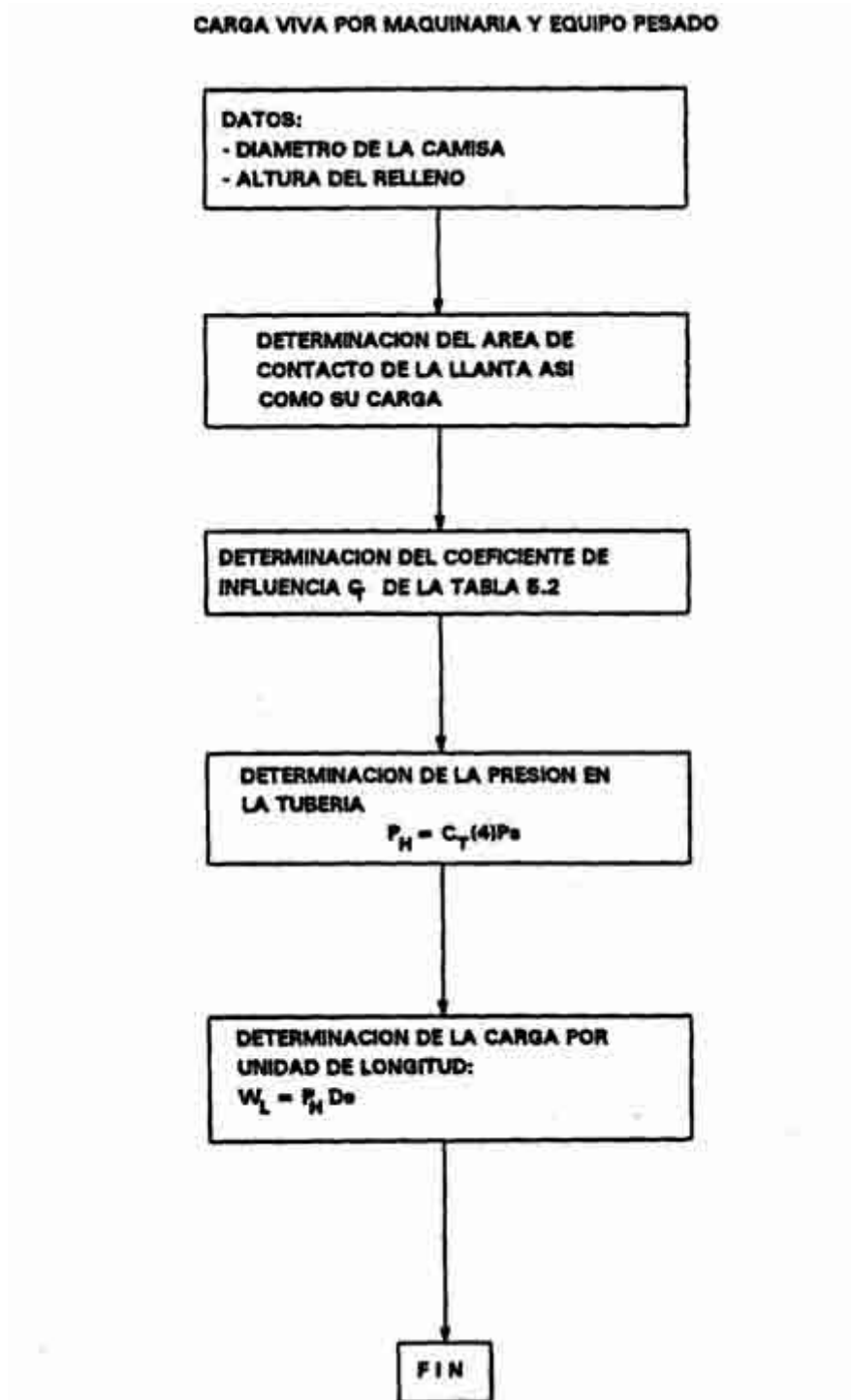


Figura 10.7 Carga viva por transito de maquinaria y equipo pesado

10.8. CARGA VIVA POR TRANSITO DE FERROCARRIL

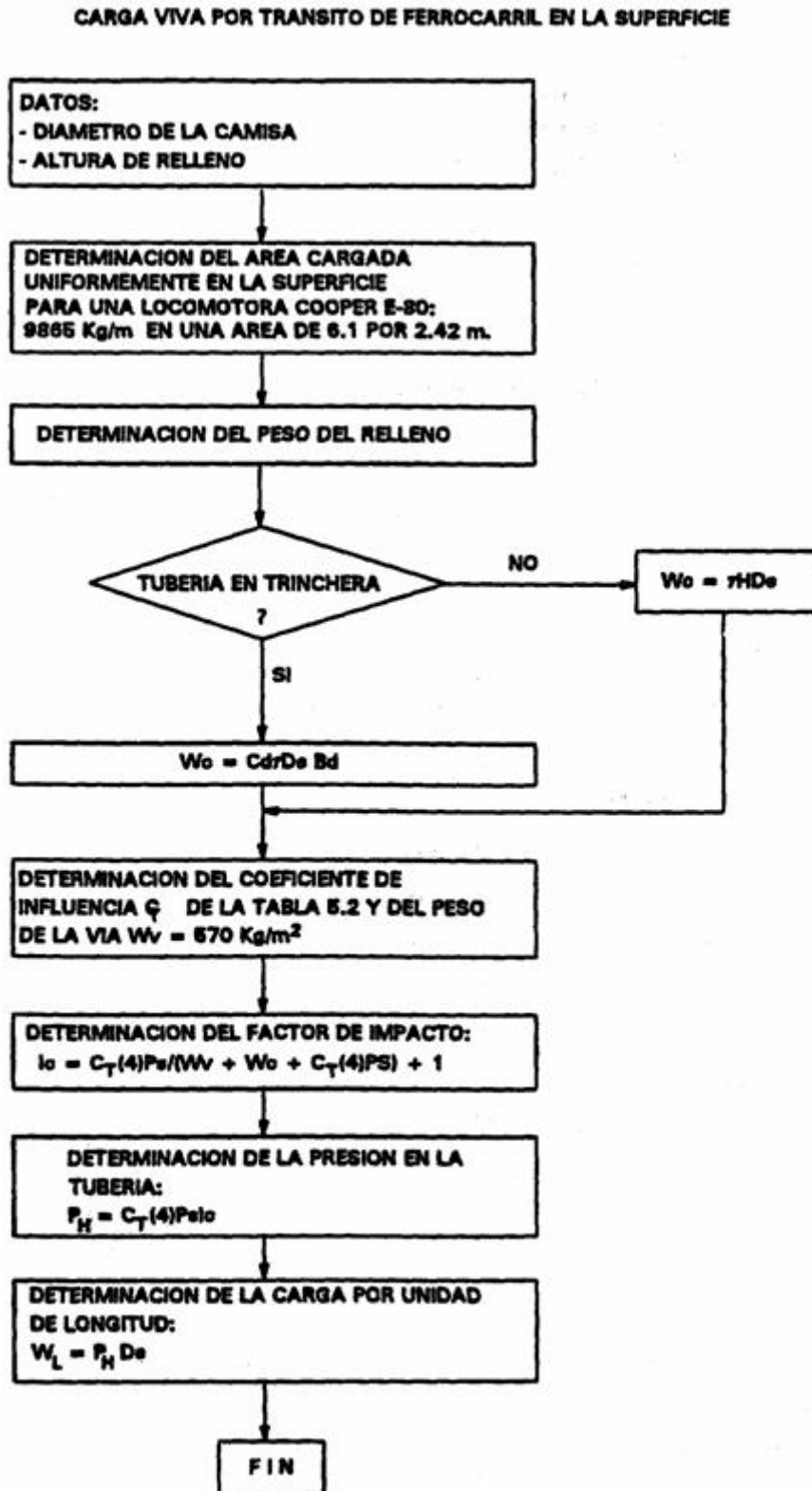


Figura 10.8 Carga viva por transito de ferrocarril

10.9. SOCAVACIÓN EN UN RÍO

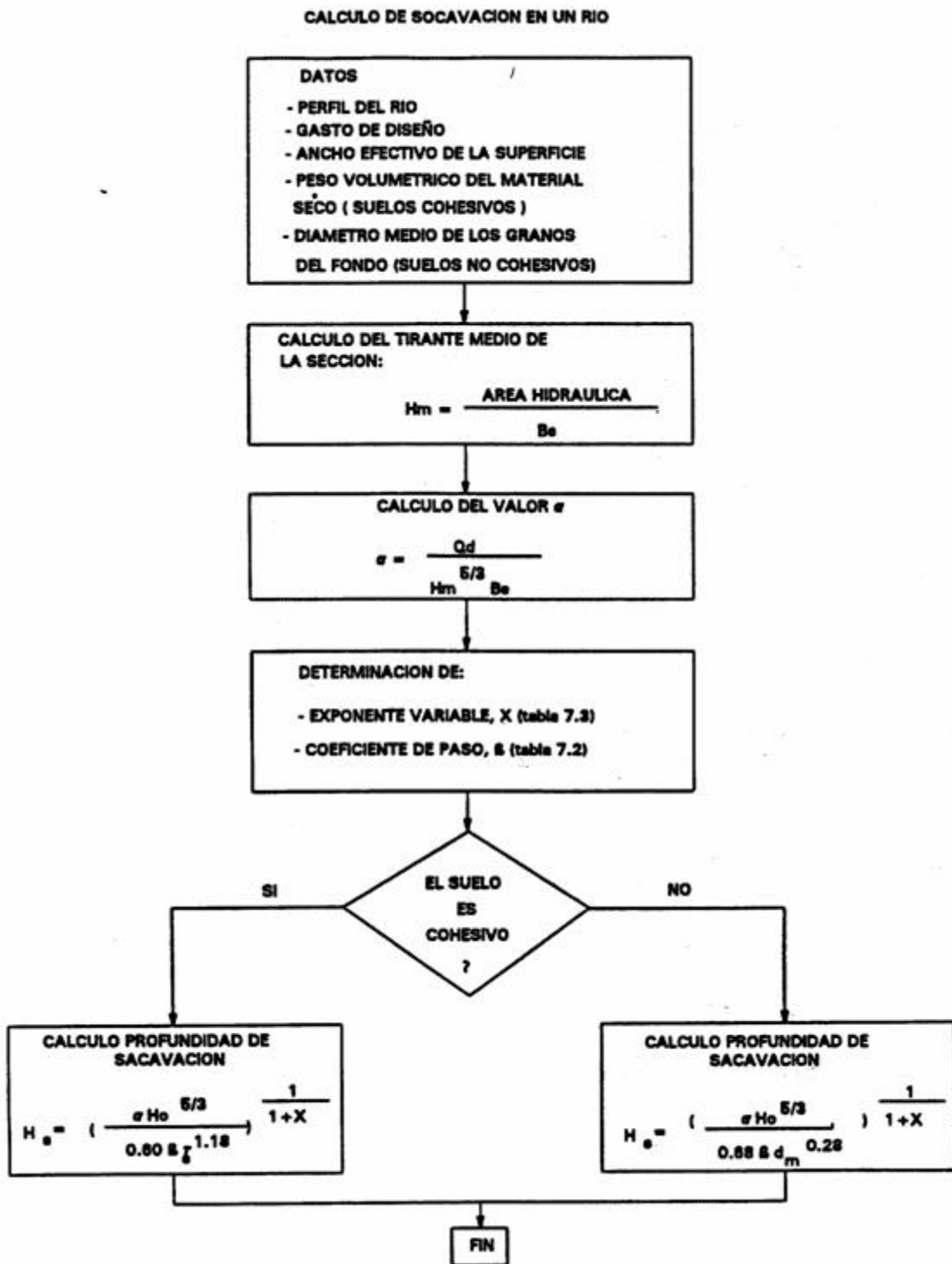


Figura 10.9 Socavación en un río

10.10. LASTRE DE CONCRETO EN CRUCE CON RÍO

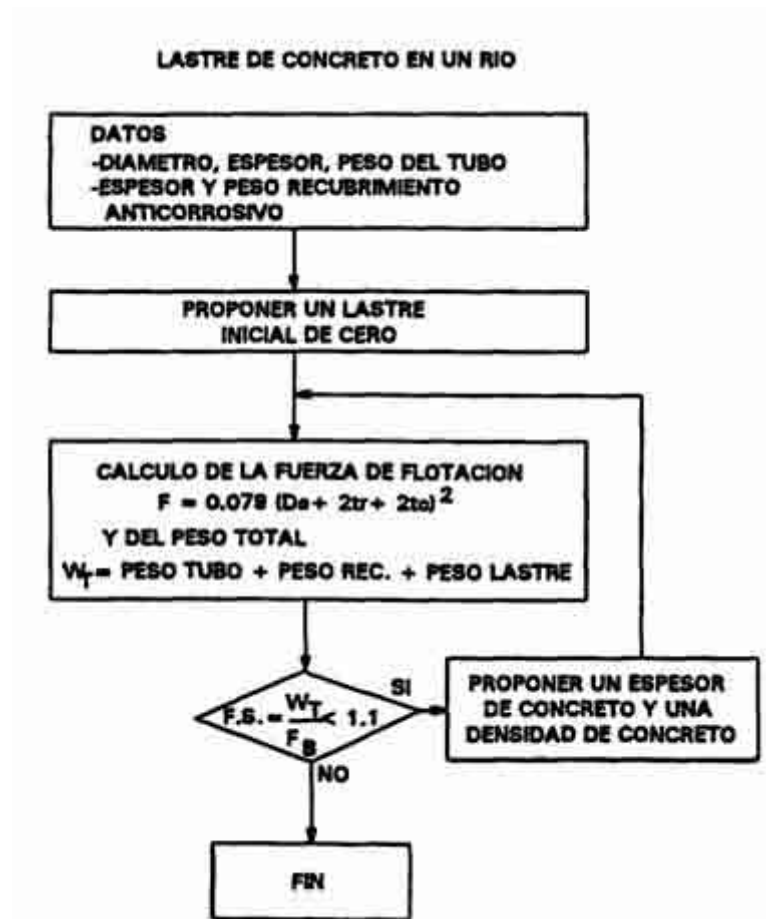


Figura 10.10 Lastre de concreto en cruce con río

10.11. DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA

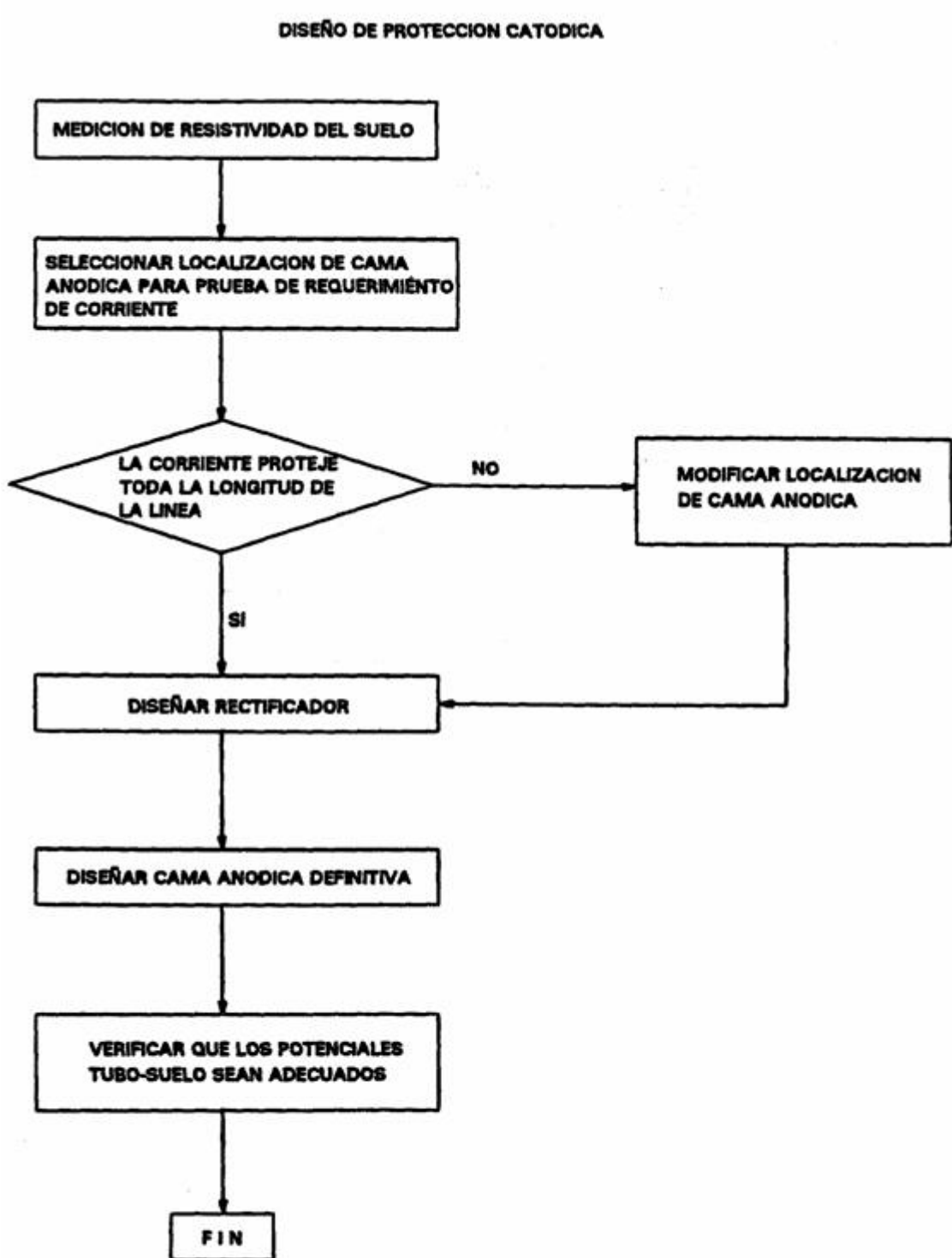


Figura 10.11 Diseño de protección catódica

10.12. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE TUBERÍA SUBMARINA

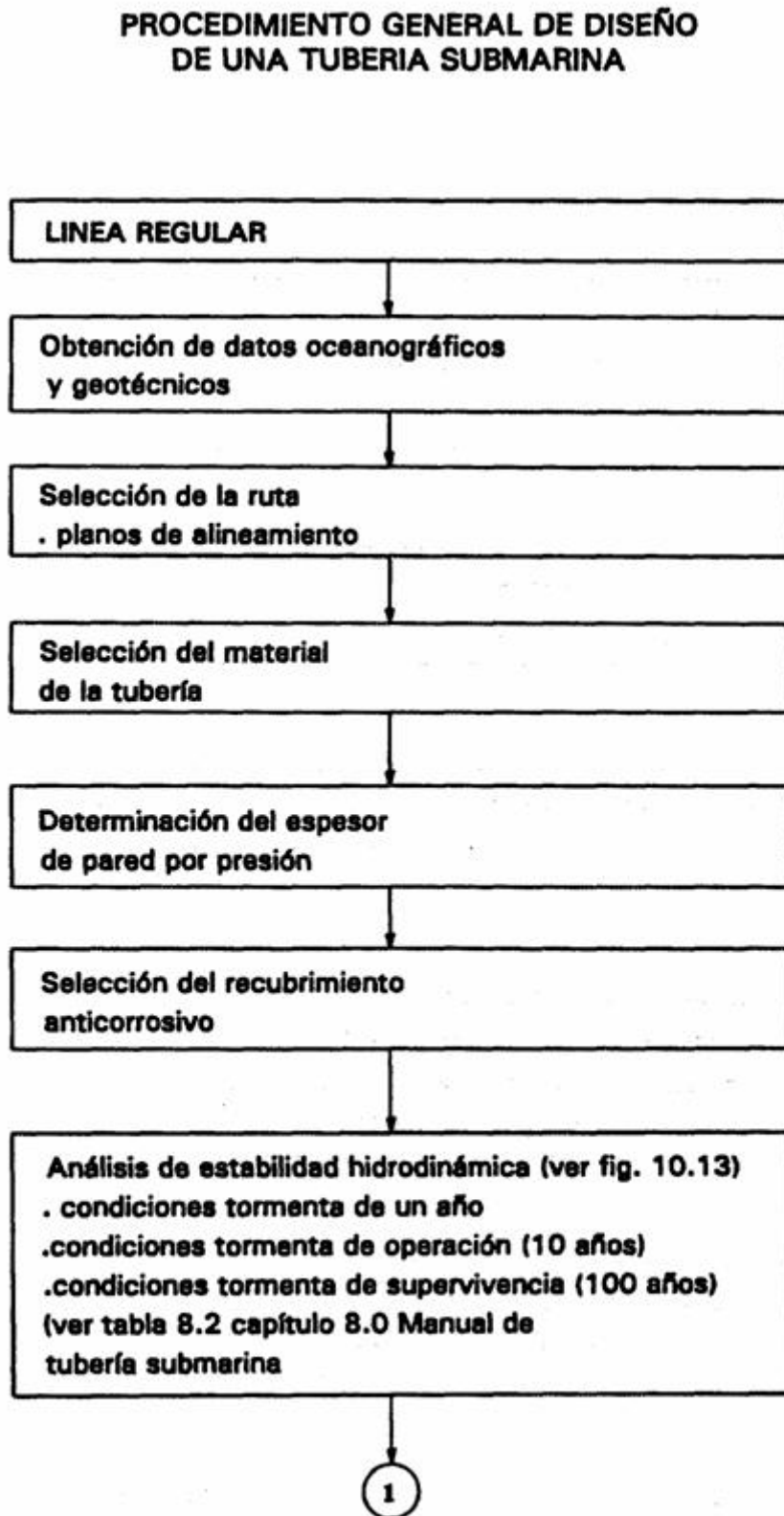


Figura 10.12 Procedimiento de diseño de tubería submarina (1/2)

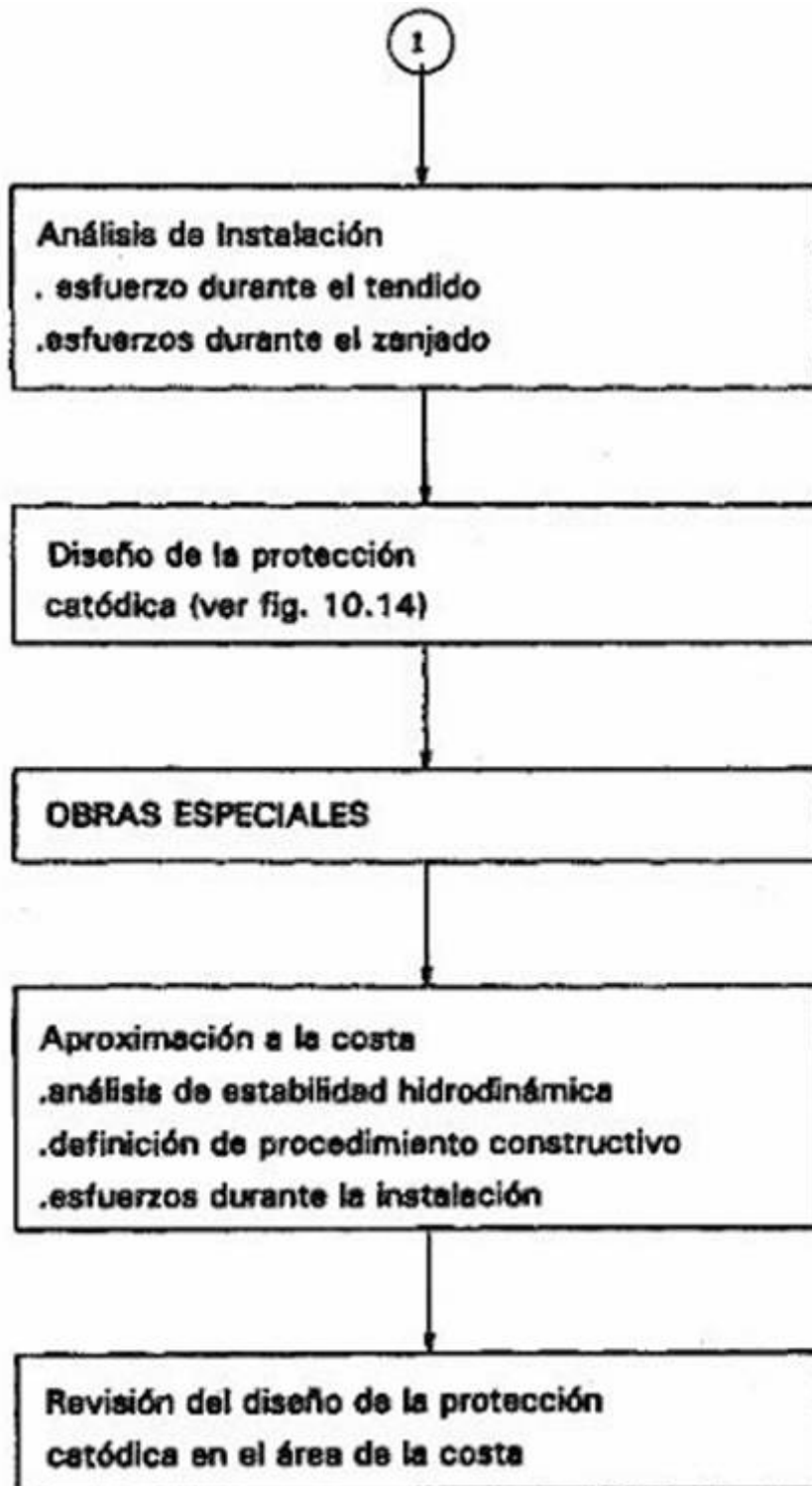


Figura 10.12 Procedimiento de diseño de tubería submarina (2/2)

10.13. ESTABILIDAD HIDRODINÁMICA

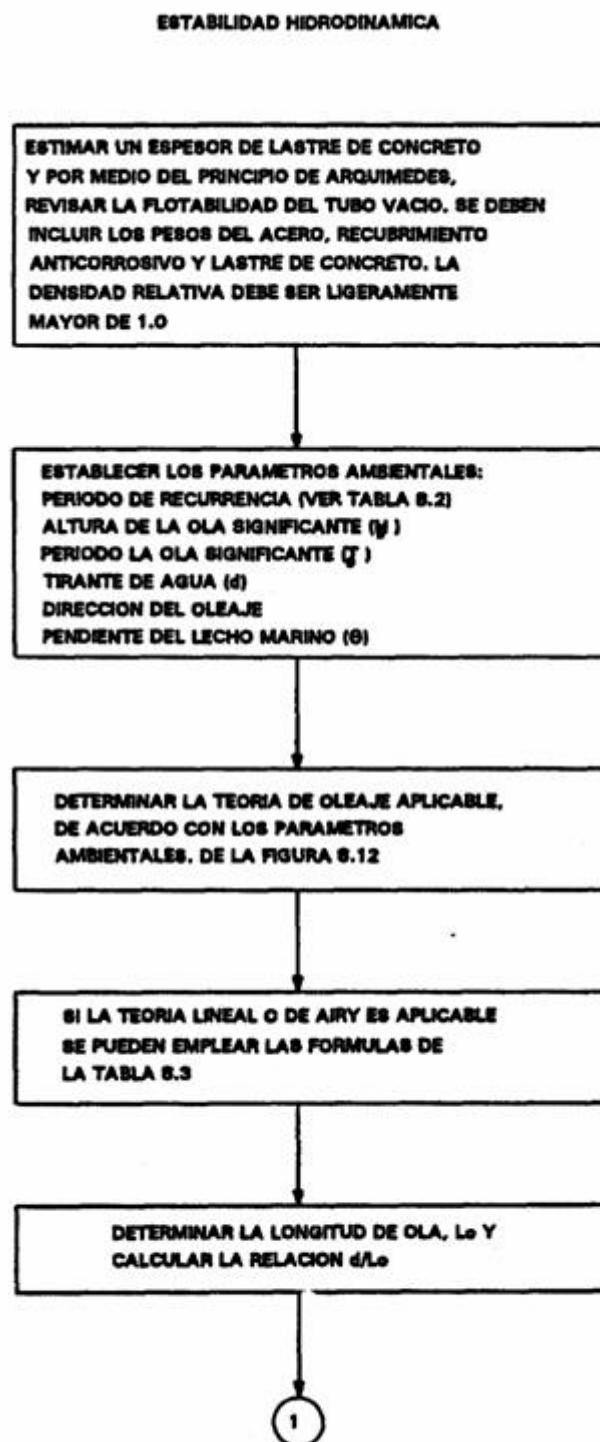


Figura 10.13 Estabilidad hidrodinámica (1/4)

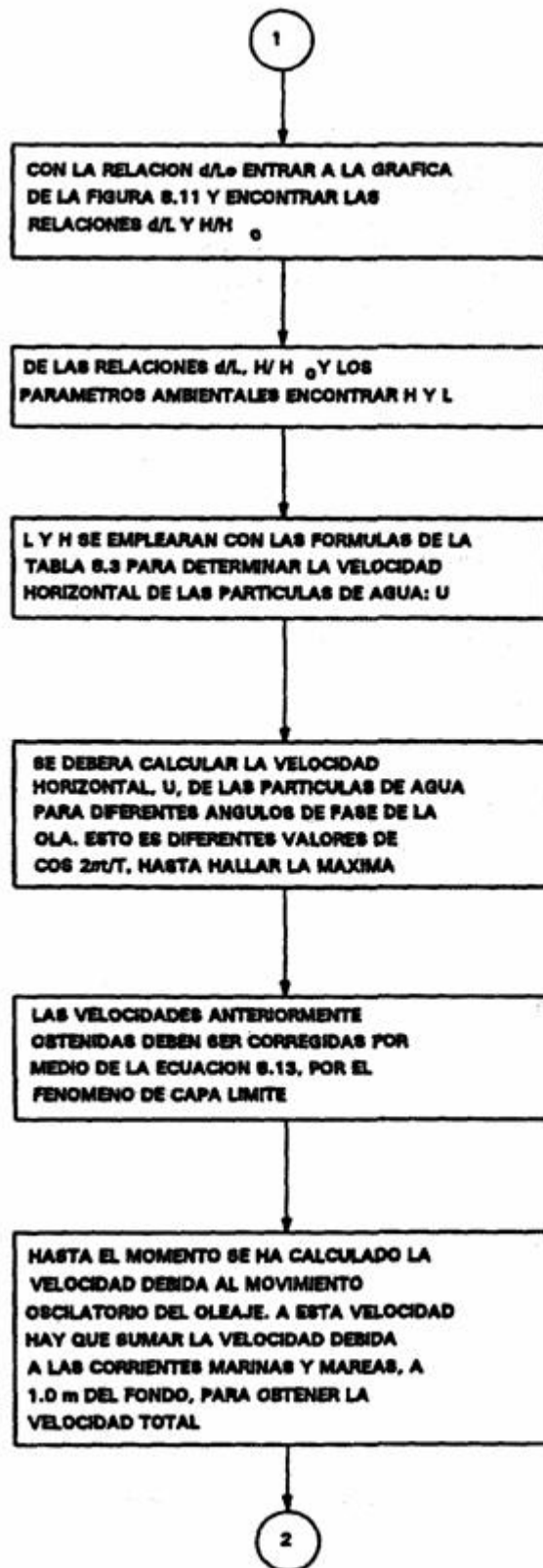


Figura 10.13 Estabilidad hidrodinámica (2/4)

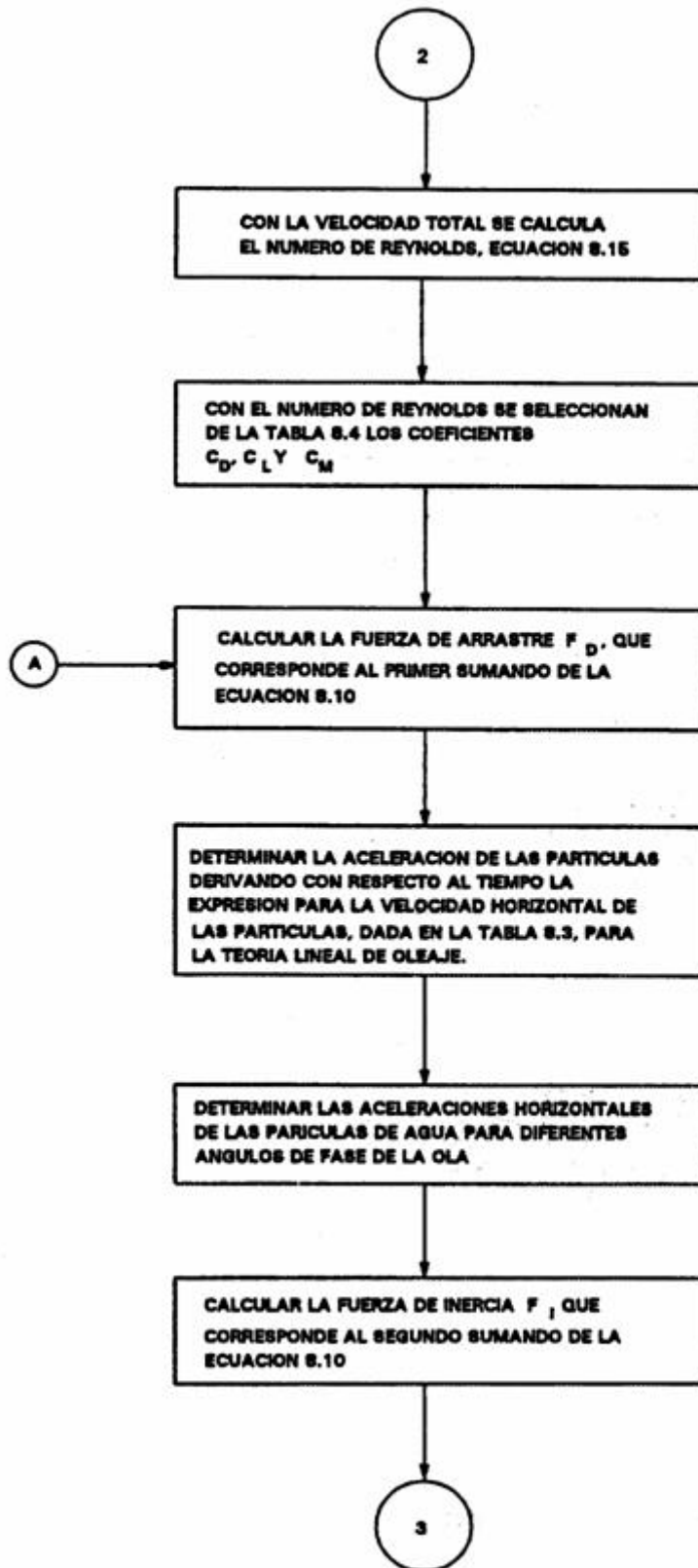


Figura 10.13 Estabilidad hidrodinámica (3/4)

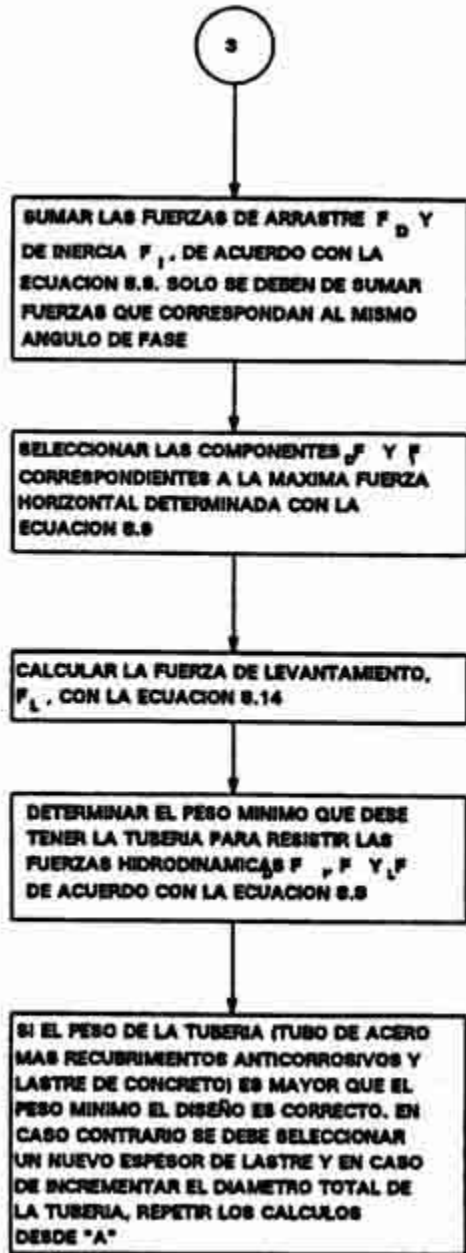


Figura 10.13 Estabilidad hidrodinámica (4/4)

10.14. PROTECCIÓN CATÓDICA DE TUBERÍA SUBMARINA

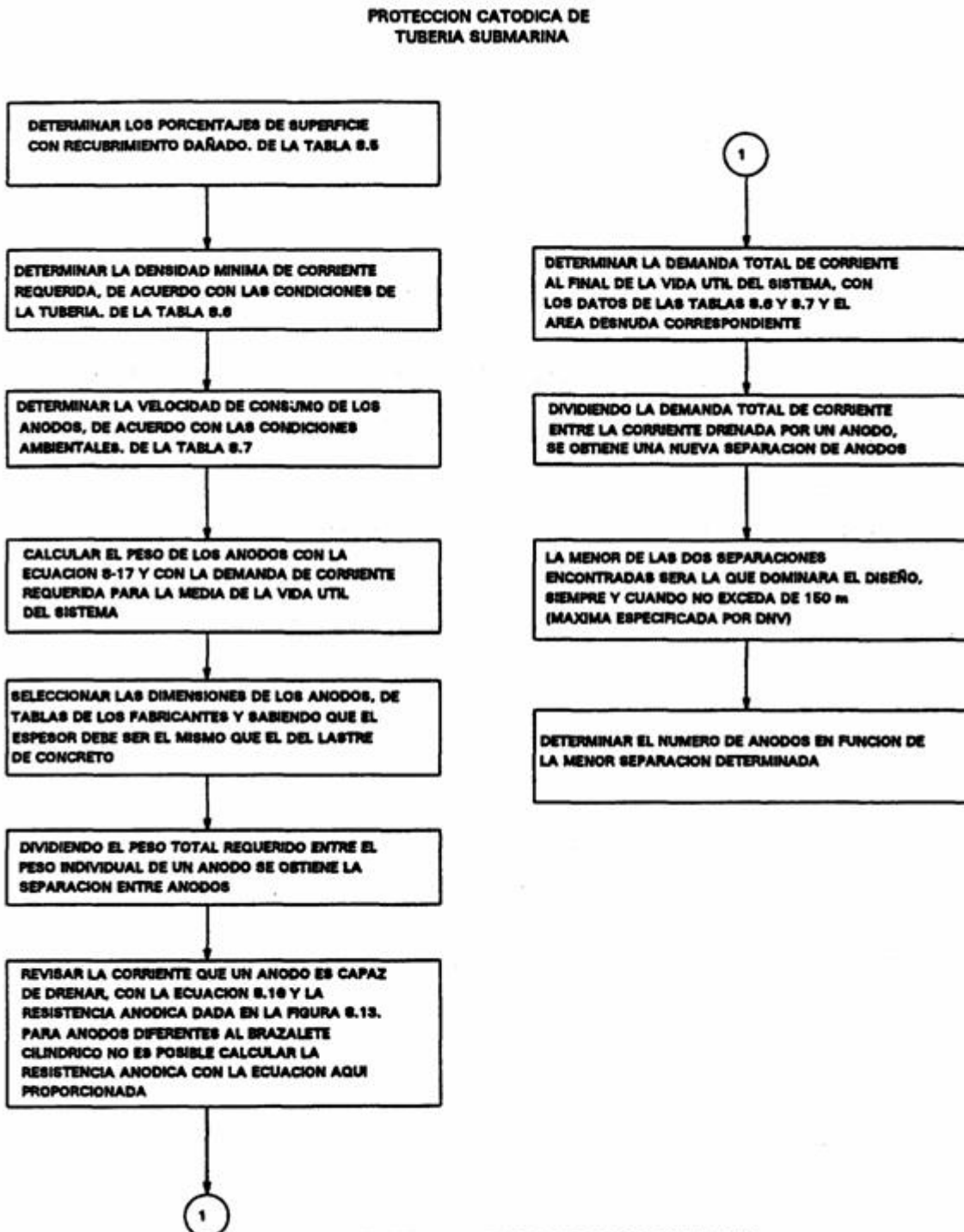


Figura 10.14 Protección catódica de tubería submarina

Tabla de conversión Sistema Internacional

UNIDAD	SIMBOLO	MULTIPLICADO POR	SE CONVIERTE A	
			UNIDAD	SIMBOLO
ESFUERZO (FUERZA ÁREA)				
Kilogramo fuerza/cm ²	Kgf/cm ²	0.09806650	Newton/milimetrico ²	N/mm ²
Kilogramo fuerza/cm ²	Kgf/cm ²	98066.5	Pascal	Pa
Megapascal	MPa	0.101972	Kilogramo fuerza/mm ²	Kgf/mm ²
FUERZA				
Kilogramo – fuerza	kgf	9.806650	Newton	N
Newton	N	0.101972	Kilogramo-fuerza	Kgf
TEMPERATURA				
Grado Celsius	°C	$t_k = t_c + 273.15$	Kelvin	K
TORSIÓN O MOMENTO DE FLEXION				
Kilogramo – fuerza - metro	kgfm	9.806650	Newton - metro	Nm

ANEXO A "ASPECTOS PRÁCTICOS DE LA CORROSIÓN"

A ASPECTOS PRÁCTICOS DE LA CORROSIÓN

A.1 MÉTODOS DE PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN

En esta guía se presenta la secuencia lógica para prevenir la corrosión de tuberías de conducción de agua. Asimismo se incluye un ejemplo numérico de diseño de un sistema de protección catódica de un acueducto de 80 Km de longitud, el cual se está manejando dentro de esta guía como modelo. Es conveniente mencionar que la numeración de las fórmulas no corresponde al manual.

A.1.1 Corrosión interna

Las tuberías de conducción de agua están expuestas a corrosión interna; un método de prevención de la misma consiste en aplicar un recubrimiento anticorrosivo interno, para formar una barrera entre el electrolito y la superficie metálica.

A.1.2 Corrosión externa

La corrosión externa de tuberías enterradas se previene mediante la aplicación de un recubrimiento anticorrosivo, suplementado con un sistema de corriente impresa o ánodos de sacrificio, mientras que la de tuberías superficiales se previene aplicando una pintura anticorrosiva.

A.2 LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE A RECUBRIR

La limpieza de la superficie metálica a recubrir debe llevarse a cabo por medio de chorro de abrasivos a presión; los abrasivos comúnmente empleados son arena y granalla metálica.

El procedimiento consta de las siguientes operaciones

Se debe realizar un descostrado, con ayuda de martillo y cincel, para eliminar las costras de óxido, escamas y restos de soldadura.

Mediante el uso de solventes o detergentes se deberá eliminar toda clase de materias extrañas como aceites o grasas.

Limpieza con chorro de abrasivo.

Eliminación de polvo mediante sopleteado con aire limpio y seco.

El agente abrasivo será tamizado entre las mallas Mex-18 y Mex-80, de acuerdo al patrón de anclaje requerido, cuando se utilice arena, ésta deberá ser cuarzona o silicosa, lavada y seca, y estar libre de sales. Cuando se uso granalla metálica, será del tipo munición acerada limpia y seta, o bien, puede ser escoria de toque o cobre.

La rugosidad o máxima profundidad de perfil que se obtenga en la superficie limpia y que servirá como anclaje para el recubrimiento, estará comprendida entre 0.025 mm y 0.063 mm, de acuerdo con el espesor de película del primario, el cual deberá ser mayor que la profundidad del perfil de anclaje.

El aire deberá estar exento de agua, aceite o grasa.

La granalla metálica podrá emplearse nuevamente en limpiezas posteriores, siempre y cuando esté libre de contaminantes, seta y tamizada, de acuerdo a las mallas Mex-18 y Mex-80.

A.2.1 Aceptación de la superficie limpia

Para aceptar una superficie limpiada con abrasivo, ésta deberá tener el mismo aspecto que un área de dos metros cuadrados, seleccionados previamente como patrón y representativa de dicha superficie.

Para comprobar que la profundidad de anclaje es la especificada, la superficie limpiada se comparará con la del patrón aceptado, utilizando para ello equipo comparador de perfil de anclaje.

A.2.2 Tiempo máximo para recubrir

En cualquier caso en que se haya especificado limpieza con abrasivo, el tiempo máximo que se permitirá que transcurra entre la limpieza y aplicación del recubrimiento, estará en función del medio ambiente en el sitio de trabajo, sin embargo, nunca deberá ser mayor de cuatro horas; en caso de excederse este tiempo, se deberá limpiar nuevamente la superficie.

A.3 SELECCIÓN DE RECUBRIMIENTOS PARA TUBERÍAS SUPERFICIALES

Las tuberías superficiales están sujetas a corrosión externa a interna, debido principalmente a su exposición al medio ambiente y agua. No obstante, una forma de prevenir la corrosión es mediante la aplicación de recubrimientos anticorrosivos.

En este capítulo se muestran sistemas de recubrimientos anticorrosivos que pueden ser empleados en los diversos componentes que están sujetos a corrosiones interna o externa. Es importante aclarar que las tablas son únicamente una guía para la selección del recubrimiento anticorrosivo, por lo que la opción definitiva debe contemplar un análisis detallado de factores tales como; propiedades químicas del recubrimiento, cualidades ecológicas, facilidad de aplicación en tiempo, costo, facilidad de reparación, etc.

A.3.1 Definición de medios corrosivos

A continuación se definen los medios que pueden favorecer la corrosión de estructuras metálicas

A.3.1.1 Ambiente húmedo con o sin salinidad y gases derivados del azufre

Es el que predomina en las refinerías y zonas cercanas a Ciudad Madero, Minatitlán, Poza Rica, etc.

A.3.1.2 Exposición de agua no potable.

Son las condiciones interiores de tanques y tuberías para agua no potable

A.3.1.3 Exposición de agua potable

Son las condiciones interiores de tanques y tuberías para agua potable

A.3.1.4 Exposición a destilados tratados

Son las condiciones interiores de tanques para destilados dulces en las refinerías, plantas y terminales de almacenamiento.

A.3.2 Condiciones del medio ambiente

A.3.2.1 Ambiente seco

Predomina en zonas climatológicas, cuya humedad relativa es menor del 60%, como las de Reynosa, Salamanca, Monterrey, Tula, etc.

A.3.2.2 Ambiente húmedo

Predomina en zonas climatológicas como las de México, Huauchinango, Ciudad Pemex, o en las zonas donde la humedad relativa sea mayor del 60%.

A.3.2.3 Ambiente húmedo y salino

Típico de zonas climatológicas cuya humedad relativa es mayor de 60% y con brisa marina, como las de Tampico, Tuxpan, Ciudad Madero, Coatzacoalcos, etc.

A.3.3 Sistemas para cada tipo de exposición

En la Tabla 2.5 se describen las características de los sistemas para cada condición de medio corrosivo, y además se incluyen el tipo de preparación de la superficie, tipo de primario y acabado, número de capas y espesor en milésimas de milímetro de película seta por capa, así como el sistema de aplicación que se recomienda.

A.4 SELECCIÓN DE RECUBRIMIENTOS PARA TUBERÍAS ENTERRADAS

Para combatir la corrosión externa en tuberías enterradas que operan a baja temperatura (menor de 333.15 °K (60 °C)), comúnmente se emplea alquitrán de hulla

aplicado en caliente, el cual consiste de pintura primaria seguida por una capa de esmalte de alquitrán de hulla, reforzada con una capa de fieltro de fibra de vidrio. Este recubrimiento se protege con una capa final de encalado resistente al agua o con una envoltura de papel "kraft", para el caso de esmaltado en planta.

A.4.1 Pintura primaria

Este tipo de pintura consiste de alquitrán de hulla residual negra y aceites de alquitrán de hulla refinado; no debe contener bencol o otros solventes volátiles o tóxicos, debe pasar las pruebas descritas en AWWA C-203, y satisfacer las características de la Tabla 2.9.

El esmalte no debe contener asfalto o algún otro derivado del petróleo, además se deberán marcar en sus envases los datos siguientes; esmalte sólido a base de alquitrán de hulla, temperatura óptima de aplicación. Temperatura máxima de calentamiento, tiempo máximo antes de usarlo, resistencia dieléctrica en Volt para un espesor de 2.4 mm (3/32 pulg) y nombre del fabricante.

A.4.1.1 Aplicación de pintura primaria y esmalte

La pintura primaria se puede aplicar con brocha, por aspersion o con máquina viajera, y debe ser uniforme, libre de chorreaduras, goteo, discontinuidades de espesor o cualquier otro defecto que interrumpa dicha uniformidad. Las superficies pintadas se deben proteger contra la humedad, lluvia, polvo o otra materia extraña durante la aplicación del esmalte.

A.4.2 Aplicación de fieltros

Los fieltros deben estar debidamente secos, con el fin de evitar que durante la instalación se produzcan gasificaciones o vacíos en la capa de esmalte debajo del fieltro.

El fieltro debe ser de un ancho apropiado al diámetro del tubo, uniforme, y aplicarse en espiral y con un traslape no mayor de 25.4 mm (1 pulg).

A.5 PRUEBA DIELECTRÍCA

Después de ejecutadas las diferentes fases de aplicación del recubrimiento, el constructor debe inspeccionar el mismo mediante un detector eléctrico de fallas, las cuales en caso de encontrarse deben ser reparadas satisfactoriamente a inspeccionarse nuevamente. El equipo probador será portátil, de bajo amperaje y de tensión regulable con señal audible y luminosa. El detector debe ser ajustado cuando menos tres veces en la jornada, una vez antes de iniciarlas, otra a media jornada y finalmente verificar antes del término de la misma que el aparato no tenga desajustes; la tensión de prueba será la mostrada en la Tabla A.1.

A.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Las tuberías enterradas generalmente se protegen contra la corrosión por medio de la aplicación de un recubrimiento anticorrosivo, suplementado con un sistema de protección catódica ya sea a base de corriente impresa o ánodos de sacrificio.

A.6.1 Diseño de un sistema de protección catódica a base de corriente impresa.

Por diseño de un sistema de protección catódica se deben entender dos puntos principales: dimensionar el equipo y elaborar las especificaciones de cada sistema.

Para dimensionar el equipo adecuado para controlar el fenómeno de la corrosión, es necesario conocer los siguientes datos

- a) Cantidad de corriente que requiere la tubería o cátodo
- b) Número de puntos de drenaje para la distribución adecuada de la corriente requerida
- c) Potencia requerida en cada punto de drenaje

El primer punto del dimensionamiento es la determinación de la cantidad de corriente requerida por la tubería, la cual depende principalmente de dos factores

- a) Área de la tubería o cátodo
- b) Actividad del electrolito (suelo o agua)

Cuando se trata de tuberías o estructuras desnudas, la superficie externa de la tubería está en contacto directo con el suelo, mientras la demanda de corriente sólo depende en este caso de la actividad del electrolito. Cuando se tiene una tubería provista con un recubrimiento, la demanda de corriente depende de la actividad del electrolito y del estado del recubrimiento.

A.6.1.1 Resistividad del electrolito

La resistividad es un dato de diseño que sirve para determinar

- a) Densidad de corriente de protección en tubería desnuda.
- b) Corriente de salida en ánodos de sacrificio.
- c) Resistencia de contacto de ánodos inertes para corriente impresa.

Se entiende por resistividad de un electrolito, en el caso de suelo o agua, la recíproca de la conductividad, siendo la conductividad la capacidad del medio para conducir la corriente eléctrica.

La resistividad es una propiedad que indica la resistencia unitaria de una sustancia o medio, y se puede expresar como la resistencia al paso de la corriente entre dos caras opuestas de un cubo que tiene un centímetro por lado.

La resistencia de un cuerpo de sección homogénea al paso de la corriente eléctrica, es directamente proporcional a la resistividad y la longitud del cuerpo, a inversamente proporcional al área de la sección transversal al flujo de la corriente, ver fórmula A.1

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (A.1)$$

donde:

- R es la resistencia, en Ohm
- ρ es la resistividad, en Ohm-cm
- L es la longitud, en mm
- A es el área de la sección transversal, en cm²

En el Método de Wenner se utilizan cuatro electrodos y un instrumento tipo Nillson 400, el cual permite hacer determinaciones in situ de grandes volúmenes de terreno. Para el caso de líneas enterradas dependiendo de su longitud, se recomienda medir la resistividad del suelo a cada 200 m, y a diferentes profundidades, modificando el espaciamiento entre varillas de acuerdo con:

1/2 D, D y 2D; donde D es la profundidad de enterrado en metros hasta el lecho inferior de la tubería.

A.6.1.1.1 Mediciones de Resistividad del Suelo.

Una vez seleccionada la separación entre varillas, éstas se clavarán en el suelo a lo largo de la ruta proyectada para la construcción de la tubería enterrada, y con una profundidad aproximada de 1/20 de altura de la varilla; en caso de existir suelo seco, se permitirá que este último sea humedecido.

Las dos varillas extremas serán las que conduzcan la corriente proveniente de las baterías del equipo y estarán conectadas a las terminales C1 y C2 del mismo, mientras que las dos varillas internas deberán estar conectadas a las terminal es del equipo marcadas como P1 y P2, estas dos últimas serán las encargadas de medir la caída de potencial entre ellas por medio de un galvanómetro, ver Figura A.1.

El equipo contiene un selector de sensibilidad, el cual deberá estar al inicio de la toma de resistividad en la posición de baja sensibilidad, asimismo, el aparato contiene un selector de rangos de resistencia que varía entre 0.01 hasta 100 k-Ohm, dicho selector deberá estar colocado en un rango alto; por ejemplo en el rango de 100 k-Ohm.

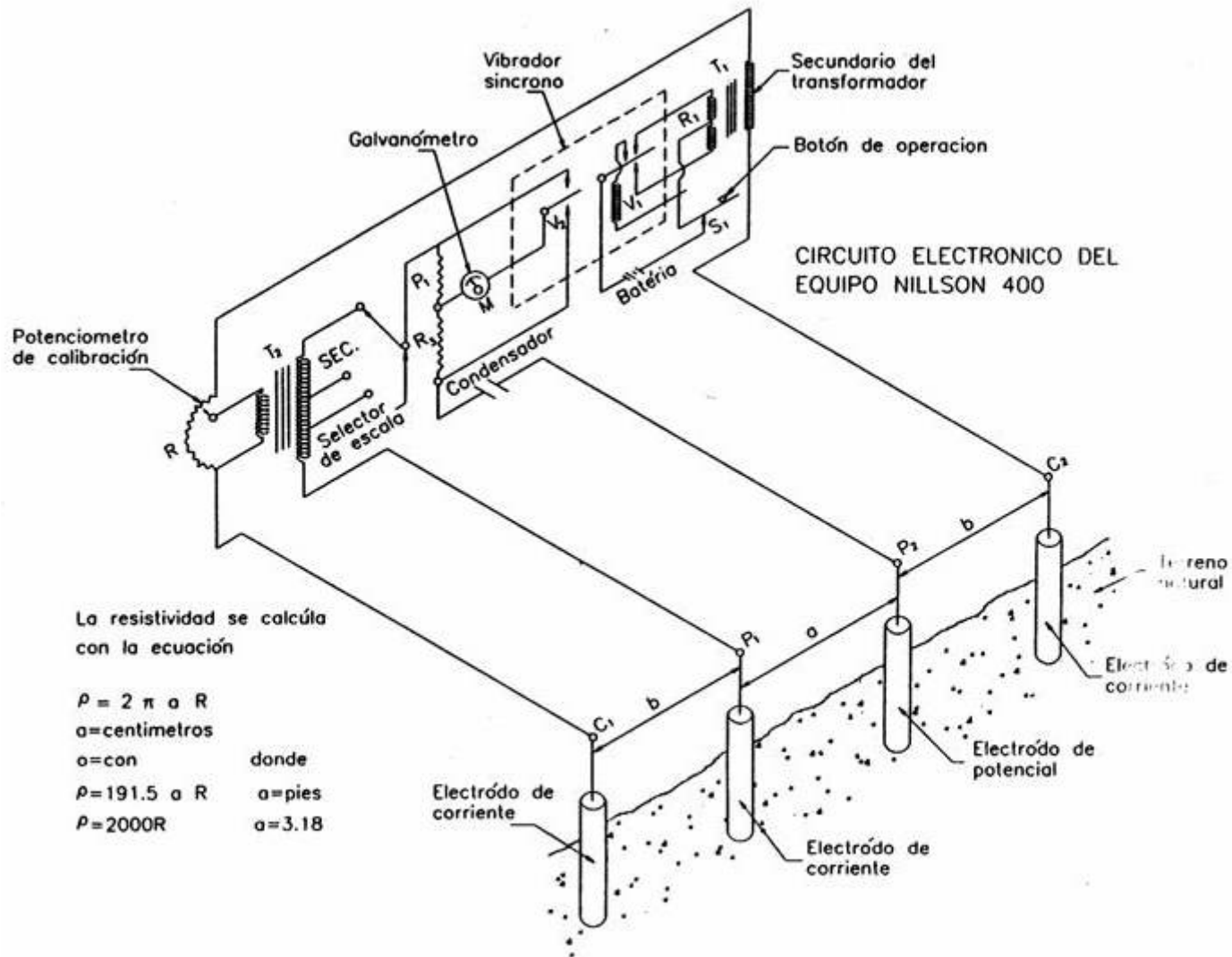


Figura A.1 Método de Wenner para la medición de resistividad del suelo

Una vez que el equipo es encendido, la aguja indicadora mostrará cierto desbalanceo.

Por medio de la perilla grande se balancea la aguja indicadora, hasta que esta última quede en el centro de la carátula o marca indicadora, afinando la lectura en el selector de alta sensibilidad.

Finalmente, se procede a medir la lectura en Ohm de acuerdo a la escala indicada en la perilla pequeña y a la indicación de la marca indicada en la escala de la perilla grande.

La resistividad del suelo será la dada por la fórmula A.2:

$$R = 2\pi ar \quad (A.2)$$

donde:

π	es la constante 3.14159
R	es la resistividad, en Ohm-cm
a	es la separación entre varillas, en cm
r	es la lectura que proporciona el aparato, en Ohm

A.6.1.2 Pruebas de requerimientos de corriente para protección catódica

Los casos típicos de determinación de requerimientos de corriente para protección catódica son:

Exterior de tuberías recubiertas.

Interior de tanques y recipientes para almacenamiento o manejo de agua potable o no potable.

Exterior de fondos de tanques de gran diámetro para almacenamiento de hidrocarburos, agua, etc.

El problema más estudiado y mejor resuelto sobre la determinación de requerimientos de corriente de protección catódica, es indudablemente el que se refiere a la protección catódica exterior de tuberías recubiertas.

Las pruebas de requerimiento de corriente se realizan por medio de prueba y error, es decir, se instala una cama anódica provisional a (a mitad o inicio con una separación mínima de 30 m de la tubería y de la tubería a proteger, inyectando corriente directa por medio de una planta de soldar portátil.

Cuando el punto de drenaje se ha instalado en uno de los extremos de la tubería y la corriente de prueba alcanza a llegar hasta el otro extremo de la tubería, se anota el valor de la corriente inyectada (Ampere y Volt) del punto de drenaje que proporcione un potencial tubo-suelo de p/s = -0.850 Volt en el extremo final de la tubería. Estos

serán los requerimientos mínimos de corriente de protección catódica para toda la tubería.

Si la corriente en el punto de drenaje se aumenta, incrementando con esto el potencial en el punto de drenaje a un valor mayor de, $(p/s)_i = -2.00$ Volt, sin lograr incrementar el potencial en el extremo final de la tubería a un valor mínimo de:

$$(p/s)_L = -0.850 \text{ Volt}$$

Esto último indicará que no hay posibilidad de proteger toda la tubería desde un solo punto de drenaje en un solo sentido. En tal caso, se deberán anotar el voltaje y amperaje de la corriente máxima en el punto de drenaje, correspondiente al potencial máximo admisible en ese punto.

$$(p/s)_i = -2.00 \text{ Volt}$$

Siendo "x", la distancia protegida que se alcanza para esas condiciones.

Entonces se puede decir que los requerimientos de corriente de protección catódica de la tubería son de:

Corriente de I, Amperes y V, voltaje, para una distancia de "x" kilómetros de tubería.

Siempre que sea posible, la determinación de "x", deberá ser a ambos sentidos del punto de drenaje.

A.6.1.3 Diseño de la cama anódica

El diseño de la cama anódica debe tener como base una baja resistividad del suelo donde se instalará. Por esta razón, el diseño debe iniciarse con el cálculo de la resistencia de contacto a tierra de la cama anódica de acuerdo con la fórmula A.3

$$R_{(g)} = \frac{0.00521\rho}{d_o} \left[\left[\ln \frac{8L_o}{d_o} - 1 + \frac{2L_o}{S} \ln 0.656N \right] + \frac{1}{N} \left[\frac{0.00521\rho_o}{L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) - \frac{0.0521\rho_o}{L_o} \left(\ln \frac{8L_o}{d_o} - 1 \right) \right] \right] \quad (A.4)$$

donde:

- ρ es la resistividad del suelo, en ohms-cm
- N es el número de ánodos en posición vertical, unidos en paralelo
- L es la longitud del ánodo, en pies
- d es el diámetro del ánodo, en pies
- S es la separación entre ánodos, en pies
- o es el relleno

A.6.1.4 Capacidad del transformador

La capacidad del transformador se calcula con la fórmula A.4

$$C = \frac{IV}{EF1000} \quad (A.5)$$

Donde

- C es la capacidad del transformador, en KVA.
- E es la eficiencia del rectificador (0.85)
- I es la intensidad de corriente directa del rectificador (Ampere)
- V es el voltaje de corriente directa del rectificador (Volt)
- F es el factor de potencia del transformador (0.80)

A.6.1.5 Ánodos de fierro - silicio.

El fierro con alto contenido de silicio es un material ampliamente utilizado para la fabricación de ánodos inertes, debido a su alta resistencia al ataque electrolítico.

Se trata de una aleación relativamente frágil aunque comparativamente mucho más resistente al impacto que el grafito, otro material profusamente empleado en este servicio.

Un análisis típico de este material es el siguiente.

Silicio	14.3 5%
Carbón	0.85%
Manganeso	0.65%
Fierro	<u>diferencia</u>
	100.00%

Se usa en forma de barras cilíndricas de 25, 38, 50 y 76 mm de diámetro y longitudes de 228, 304, 762 y 152.4 mm.

Los más empleados en trabajos de campo son los de 5.0 y 7.6 cm de diámetro por 152.4cm de longitud.

El consumo de los ánodos de fierro - silicio pueden ser del orden de 0.22 a 0.68 kg/Ampere-año, cuando se hace un diseño adecuado.

Los ánodos de fierro - silicio de los diámetros mencionados anteriormente, se pueden utilizar en agujeros de diámetro de por ejemplo 304 mm, rellenando el espacio anular con un material de baja resistencia como el toque. En esta forma, el diámetro real del elemento anódico es igual al diámetro del material de relleno "backfill", o sea 304 cm.

Cuando una cama anódica tiene que hacerse en terreno inundado o en el lecho de un arroyo, en una playa, etc., donde no existe una protección física segura para los ánodos de grafito que son muy frágiles, los ánodos de fierro - silicio pueden ser empleados con mayor facilidad.

Cuando se trata de terreno arenoso, inestable y con alto contenido de humedad, los ánodos de fierro - silicio pueden ser instalados a buena profundidad con jet de agua, mientras que los de grafito se pueden quebrar en una maniobra de este tipo.

Se debe tomar un especial cuidado en la conexión de cable, en la cabeza del ánodo. Dicho cable debe ser de un forro especial y la conexión debe quedar perfectamente aislada, pues cualquier penetración de humedad, en esta parte, produce violentos daños por electrólisis en el conductor metálico, provocándose rotura del cable.

Asimismo, los ánodos de fierro - silicio muestran ventajas en la instalación de camas anódicas profundas, donde su resistencia mecánica, una vez más, lo coloca en ventaja frente a los ánodos de grafito.

A.6.1.6 Ánodos de grafito.

Es el material que más se emplea en la instalación de camas anódicas en tierra, sobre todo por su magnífica conductividad y su bajo consumo en la mayor parte de los suelos.

Su consumo es del orden de 0.09 a 0.22 kg/Ampere-año; a densidades de corriente de 5 a 10 Ampere/m de superficie anódica. Sin embargo, este consumo se incrementa considerablemente a densidades de corriente mayores, debido a la formación de oxígeno en la superficie anódica que reacciona con el grafito, destruyéndolo.

El acceso del oxígeno a la superficie del ánodo de grafito, normalmente se evita manteniendo densidades moderadas de corriente anódica e instalando el ánodo en agujeros de mayor diámetro. Como se mencionó en el caso de los ánodos de fierro - silicio, el espacio anular se llena con relleno especial (backfill).

Una vez más el ánodo propiamente dicho, o sea el elemento que entra en contacto con el terreno, es el cilindro de relleno especial compactado; el área de contacto resulta así mucho mayor y la evolución del oxígeno no se presenta en la interfase grafito - suelo.

Los ánodos de grafito también tienen una forma cilíndrica de dimensiones D x L; sus medidas más comunes son: 76x1,320 mm y 101x2,032 mm.

También se usan en camas anódicas profundas, cuyo manejo debe ser más cuidadoso que el de los ánodos de fierro - silicio.

A.6.1.7 Camas anódicas

Generalmente, los ánodos antes descritos son empleados en grupos, las protecciones catódicas de tuberías enterradas, en donde suelen requerirse cantidades grandes, o cuando menos medianas de corriente. Se manejan como mínimo corrientes del orden de diez a quince amperes, y en sistemas muy grandes (legan a requerirse varios cientos de amperes. Es por esto que se tienen que agrupar varios ánodos en lo que se llama "dispositivo de contacto a tierra o camas anódicas", con el objeto de reducir la resistencia del circuito y consecuentemente la potencia consumida.

Al aplicar el método de corriente impresa o ánodos inertes, es necesario tener muy especial cuidado en el detalle de conexión del cable anódico al ánodo. Esta y todas la conexiones que finalmente quedarán enterradas o sumergidas al formar una cama anódica, representan la parte crítica del sistema, pues su potencial es fuertemente positivo con respecto al suelo.

Una mínima exposición (daño en el forro) del cable anódico produce un problema muy violento de electrólisis en el que rápidamente el cable se corta y el ánodo queda fuera de servicio. Se recomienda que los ánodos estén perfectamente aislados en la terminación del conductor.

Las camas de ánodos se construyen después de una cuidadosa selección del terreno, se procura ubicarlas donde la resistividad del suelo sea baja y haya una buena seguridad de humedad permanente. Los ánodos casi siempre se instalan en posición vertical, y a una profundidad tal, que su parte superior quede ligeramente por debajo del nivel freático del subsuelo, o cuando menos a una profundidad donde se manifieste una buena humedad, esa profundidad casi nunca es menor de 800 mm.

Cuando se tienen estratos muy duros o rocosos, donde los trabajos de excavación resultan muy caros, los ánodos se instalan en posición horizontal, pero siempre a profundidad suficiente para lograr una cantidad de corriente de salida adecuada. En estos casos, el cálculo de la corriente de salida por ánodo se lleva cabo empleando ecuaciones diferentes que las utilizadas para ánodos verticales; en ocasiones es necesario la instalación de ánodos más anchos y profundos. El cableado de la instalación se hace utilizando materiales de primera calidad para los empates y conexiones.

Existen recubrimientos anticorrosivos, por ejemplo epóxicos en dos componentes, para el sello de conexiones y empates. Estos materiales de aislamiento vienen acompañando a moldes de polietileno de formas especiales para conexiones tipo, de acuerdo con los calibres de cables que se van a empatar.

Para la instalación de camas anódicas donde se tiene que excavar en terrenos inestables, como en playas arenosas y en lechos de río, se puede ademar la excavación con tambores de 200 litros sin la tape y el fondo. Estos tambores pueden

ser abandonados en el lugar, permanecerán ahí por algún tiempo, al principio de la operación. Poco tiempo después serán destruidos por el proceso de electrólisis y el material de relleno trabajará directamente en contacto con el terreno.

En algunas ocasiones, cuando se tienen problemas verdaderamente críticos de espacio o se tienen valores muy altos de resistividad en los puntos donde resulta estratégico instalar un sistema de protección catódica por corriente impresa, se buscan estratos profundos de características adecuadas y se instala cama anódica vertical profunda.

La profundidad de este tipo de camas anódicas puede ser de algunas decenas de metros. Para su instalación se perfora un pozo con equipo de perforación de pozos de agua, se puede emplear tubería de ademe según las características del terreno.

En este tipo de camas de ánodos las reparaciones y mantenimiento de las mismas no es fácil, por lo que se deben extremar los cuidados para hacer los aislamientos de las conexiones. Todos los empates de cables en las camas anódicas de corriente impresa deben ser soldados.

A.6.1.8 Conductor anódico

El cable que conecta la cama anódica con el polo positivo del rectificador, es decir, el cable anódico, y todos los cables enterrados o sumergidos de polaridad positiva, deben ser de forro especial, completamente impermeable.

Es muy empleado en este servicio el cable con doble forro, polietileno de alta densidad o de alto peso molecular, para enterrado directo, para calibres de conductores ver Tabla A.2.

A.6.1.9 Conductor catódico

El cable que conecta el polo negativo del rectificador con la tubería, es decir, el cable catódico, no presenta problemas de electrólisis cuando está en contacto con el electrolito.

De cualquier forma, se recomienda utilizar el mismo tipo de cable de doble forro, empleado en la instalación anódica.

En las Figuras A.2, A.3, y A.4 se muestra un esquema típico de una cama anódica vertical.

Tabla A.1 Tensión mínima de prueba para varios espesores del recubrimiento

ESPESOR DE RECUBRIMIENTO EN mm (plg.)		TENSIÓN DE PRUEBA
trentaidosavos de plg	mm(milesimas de plg.)	Volt
-	0.40 (16)	5 000
1	0.81 (32)	7 000
2	1.59 (63)	9 800
3	2.38 (94)	12 100
4	3.18 (125)	14 000
5	3.97 (156)	15 000
6	4.76 (188)	17 000
16	12.70 (500)	28 000
20	15.88 (625)	31 000
24	19.05 (750)	35 000

Tabla A.2 Calibres de alambres estándar americano (AWG) resistencias típicas de alambre de cobre comercial

Calibre (AWG)	Ohm POR 300 m (1000 PIES)		CAPACIDAD DE:		USO RECOMENDADO
	294.15 °K (70°F) (21°C)	352.15 °K (167°F) (79°C)	CORRIENTE	AMPERIOS	
			AISLAMIENTO DE HULE	OTRO AISLAMIENTO	
4/0	0.050	0.060	160 - 248	193 - 510	CAMA ANODICAS CORRIENTE IMPRESA
3/0	0.062	0.075	136 - 215	166 - 249	
2/0	0.080	0.095	120 - 185	145 - 372	
1 /0	0.100	0.119	105 - 160	127 - 325	
1	0.127	0.150	91 - 136	110 - 280	
2	0.159	0.100	80 - 118	96 - 241	
4	0.254	0.302	60 - 87	72 - 180	
6	0.403	0.480	45 - 65	54 - 134	
8	0.645	0.764	35 - 48	41 - 100	INSTALACION ANODOS GALVANICOS
10	1.020	1.216	25 - 35	31 - 75	
12	0.620	1.931	20 - 26	23 - 57	PUNTAS DE MEDICION
14	2.570	3.071	15 - 20	18 - 43	
16	4.100	4.804	6	10	CONDUCTORES PARA INSTRUMENTOS
18	6.510	7.765	3	6	
20	10.300	12.350	-	-	
22	10.500	19.630	-	-	

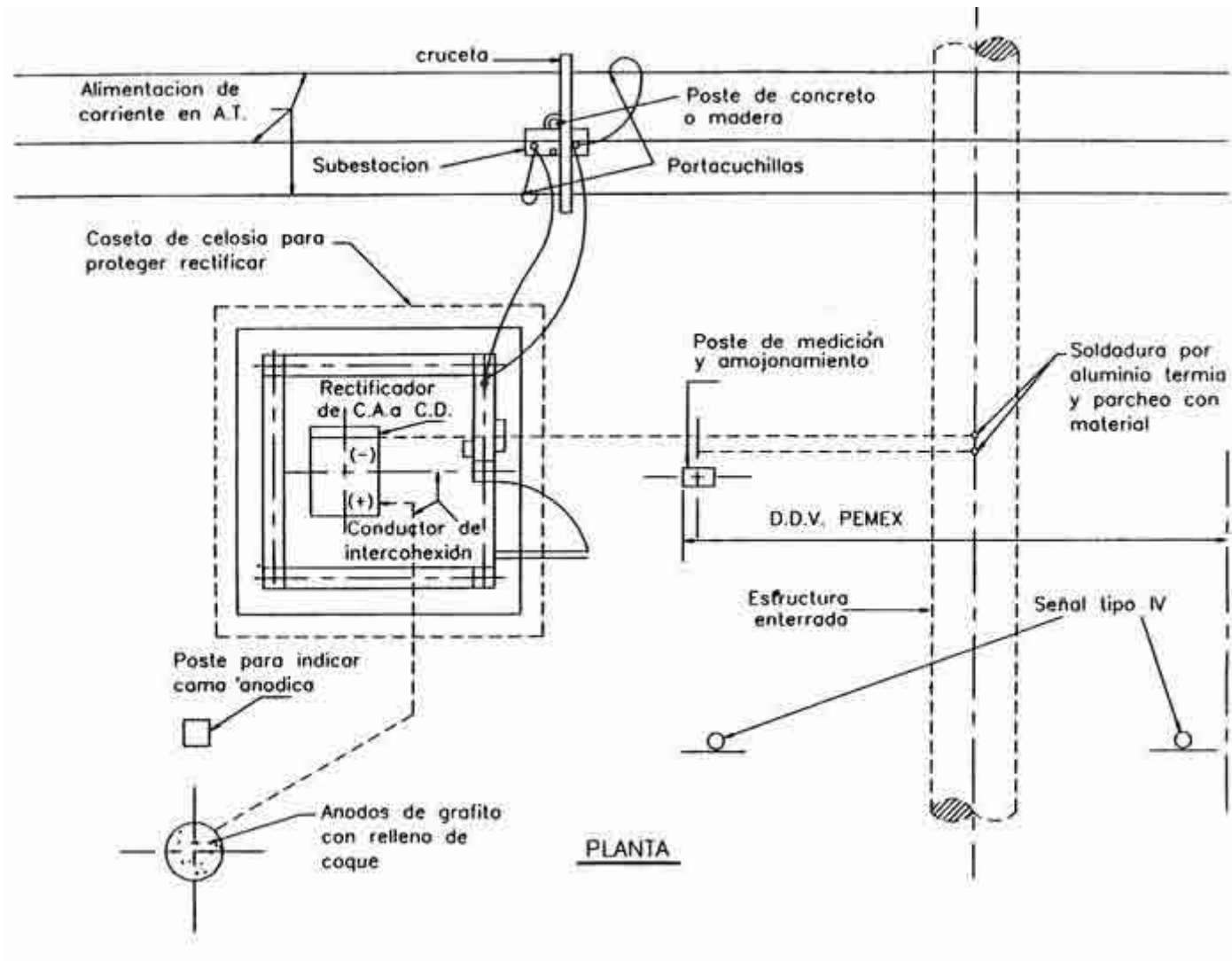


Figura A.2 Protección catódica sistema de corriente impresa

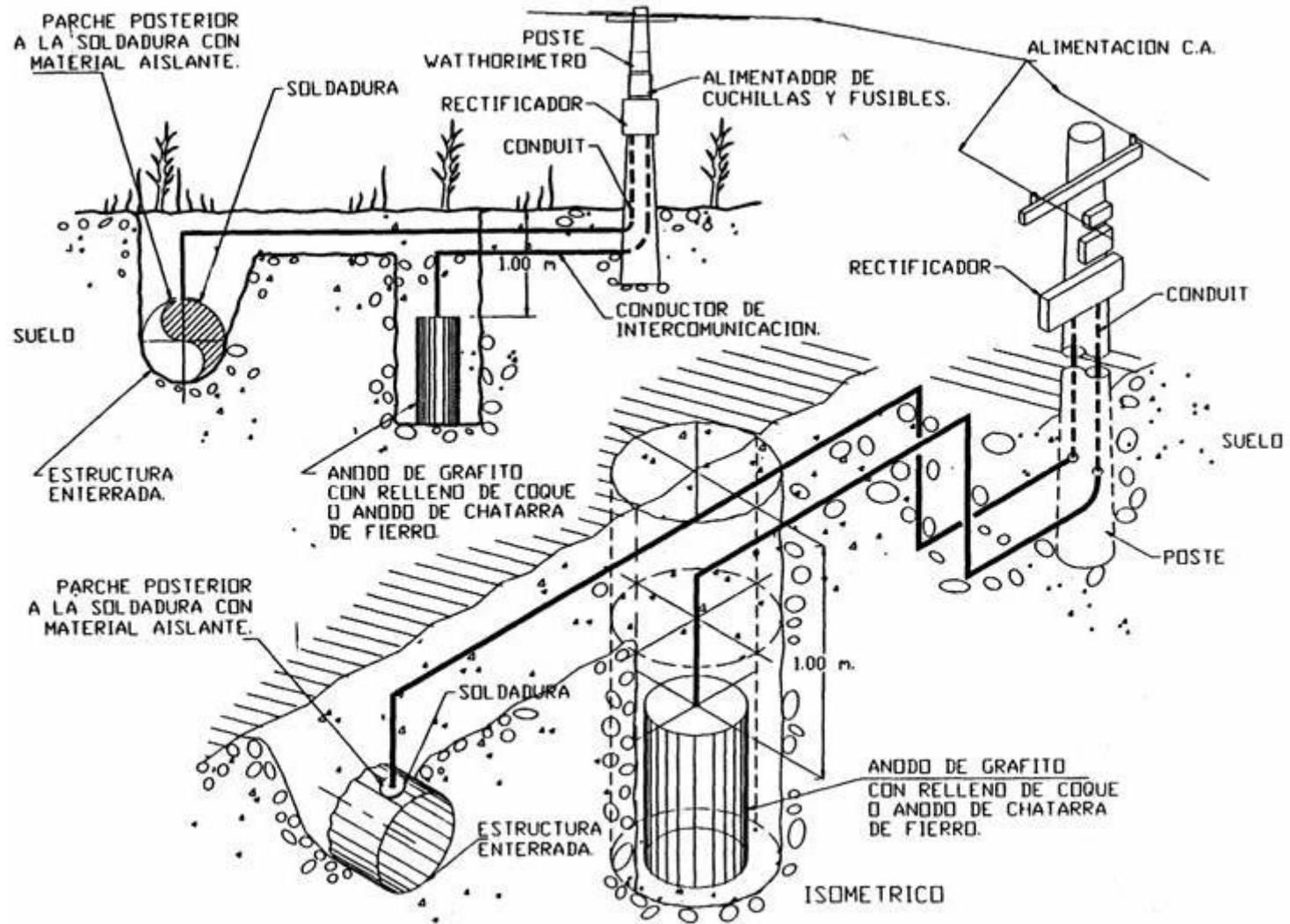
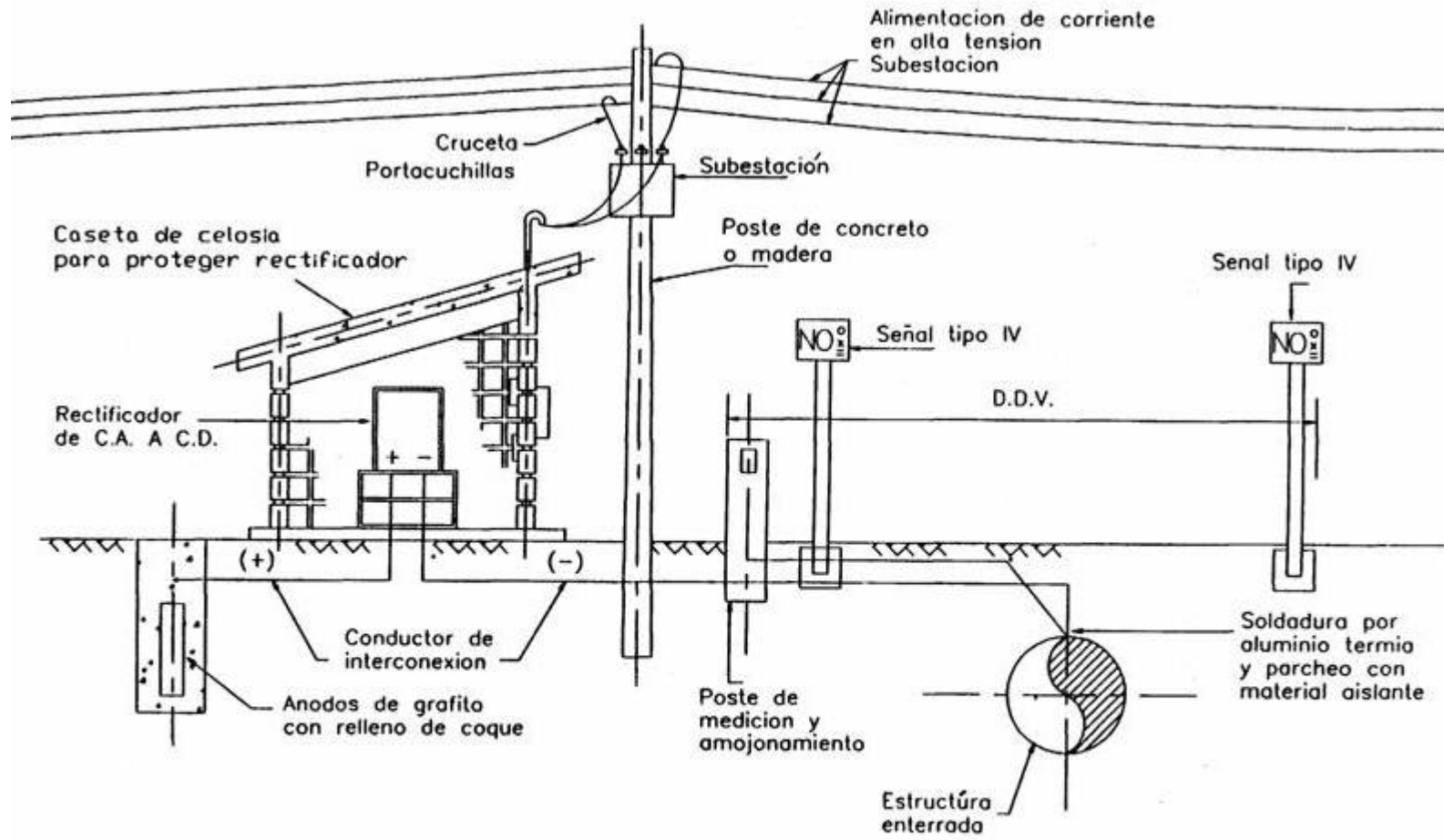


Figura A.3 Protección catódica sistema de corriente impresa



C O R T E

Figura A.4 Protección catódica sistema de corriente impresa

A.7 OTROS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA

A.7.1 Instrumentos

Casi todos los sistemas de protección catódica tienen un voltímetro de C.D. tipo tablero, para indicación de tensión de salida del rectificador; para arreglo general ver Figura A.5. En algunos casos, se intercala en el circuito de medición un contacto de botón, con lo que el medidor normalmente está desconectado y sólo se conectará cuando alguien quiere hacer una lectura, para lo cual baste oprimir el botón.

Generalmente, se tiene un amperímetro C.D. tipo tablero, intercalado en el circuito de carga para medir en cualquier momento la corriente de protección catódica. Este instrumento, igual que el voltímetro C.D., puede contar también con un contacto de botón para evitar que quede permanentemente conectado. Algunas veces se uso un contacto de doble polo, doble tiro y tres posiciones con resorte para posición obligatoria de reposo en OFF. Este contacto sirve para hacer las dos lecturas: el potencial de la fuente y la corriente, utilizando un sólo galvanómetro.

A.7.2 Gabinete

Se uso un gabinete para intemperie con acabados idóneos para el ambiente donde operará el rectificador, el cual debe contar con candado en la puerta. Suele ser de diseño adecuado para facilitar la intervención para inspección, limpieza, cambio de partes y mantenimiento en general. Asimismo tener rejillas para ventilación con protección contra insectos.

En algunas ocasiones, resulta muy conveniente tener módulos intercambiables para rapidez en el mantenimiento y continuidad en el servicio. En tales casos, el gabinete permanece firmemente instalado y el personal de mantenimiento simplemente sustituye el instrumento interior dañado por otro en buenas condiciones.

A.7.3 Protección

Se debe contar con protección contra cortos circuitos, tanto en corriente alterna como en corriente directa, así como con protección contra descargas eléctricas y toda clase de fenómenos transitorios.

Los rectificadores de corriente alterna se complementan en su alimentación, con interruptor termomagnético, fusibles y apartarrayos.

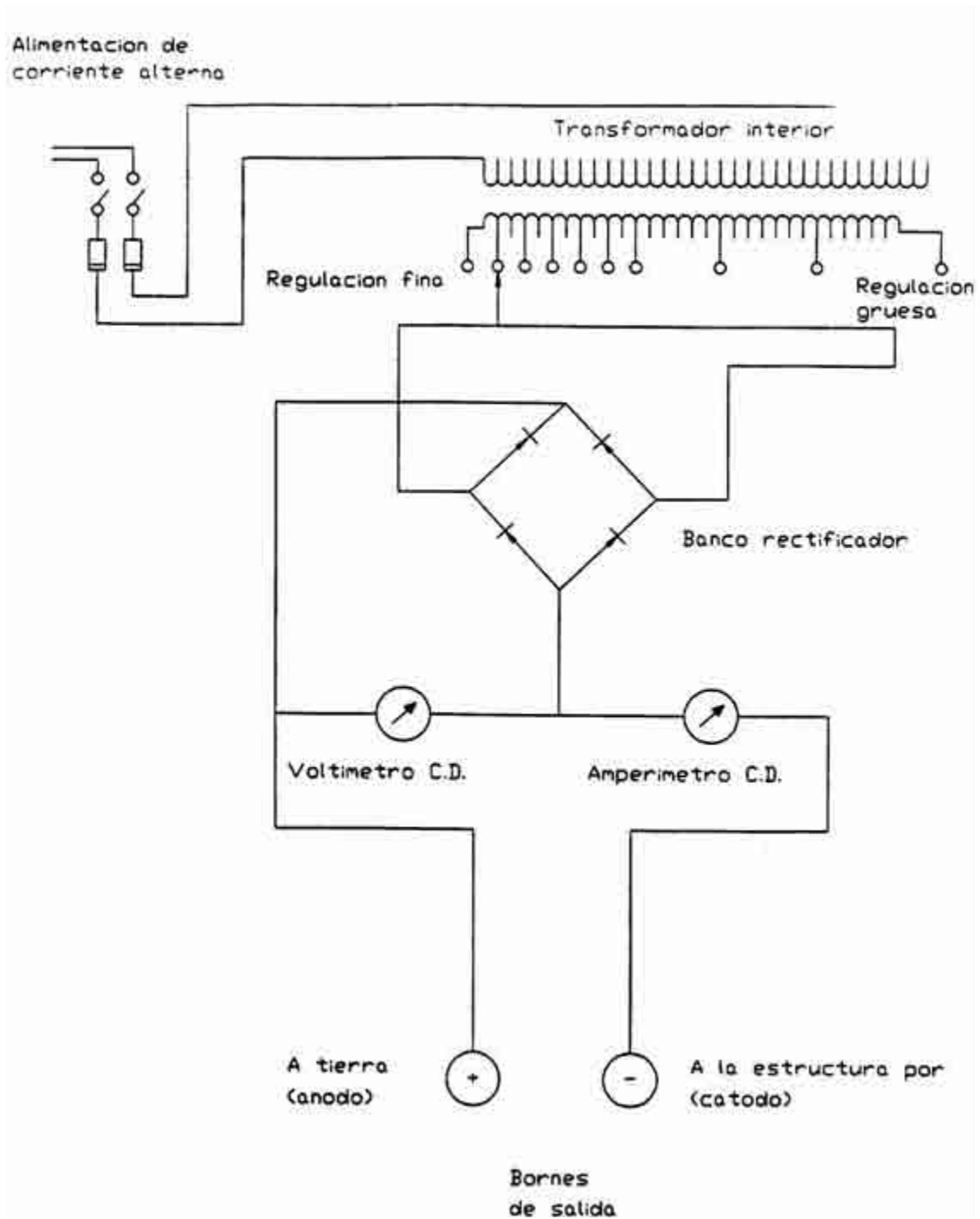


Figura A.5 Esquema de un rectificador monofásico para protección catódica.

A.7.4 Sistemas de enfriamiento

Los rectificadores de corriente alterna cuentan con sistemas de enfriamiento. Son dos los puntos que requieren enfriamiento en un rectificador para protección catódica: el transformador y el banco de rectificación.

Los rectificadores de baja capacidad son enfriados por convección natural de aire.

Cuando se trata de unidades grandes, el transformador puede ser enfriado por aceite, mientras que el banco de rectificadores por un ventilador que proporcione aire forzado.

A.7.5 Montaje y protección de rectificadores

De acuerdo con el lugar donde se instale el equipo y con las dimensiones y características propias de cada rectificador, se selecciona el tipo adecuado de montaje, que puede ser desde simple montaje en un poste hasta la construcción de casetas de estructura de mampostería con iluminación, puertas y ventanas.

A.8 PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO PARA UN SISTEMA DE ÁNODOS DE SACRIFICIO

Los ánodos de sacrificio se emplean generalmente para reforzar un sistema de protección catódica a base de corriente impresa o para proteger tuberías de longitud pequeña; para arreglo general ver Figura A.6.

Para el diseño de un sistema de ánodos galvánicos, se deben considerar los siguientes puntos

- a) Selección del material de los ánodos a utilizar, de acuerdo a la resistividad del terreno, costo, disponibilidad, eficiencia de ánodo y vida útil deseada.
- b) Selección de la configuración de los ánodos

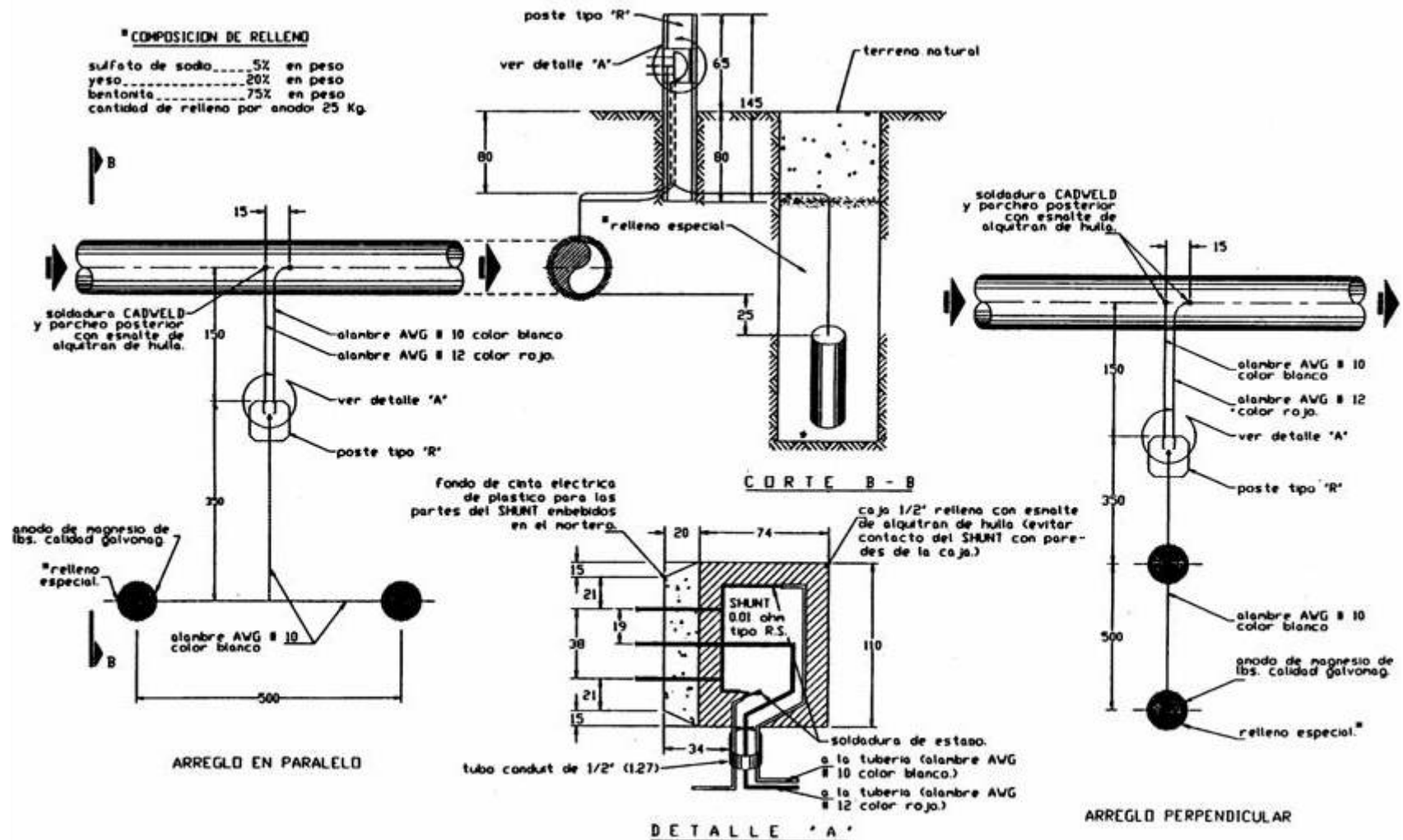


Figura A.6 Instalación de ánodo de magnesio

A.8.1 Corriente de diseño

La corriente de diseño se calcula con la fórmula A.5

$$I_D = A_T A_d d_c F_s \quad (A.5)$$

donde:

- I_D es la corriente de diseño, en Ampere
- A_T es el área total por proteger, en m^2
- A_d es el porcentaje de área desnuda
- d_c es la densidad de corriente, en mA/m^2
- F_s es el factor de seguridad = 1.5

El % de área desnuda de una tubería nueva, se considera para efectos de cálculo dentro del rango de 2 a 59b.

La densidad de corriente del acero en agua de mar es de 0.465 a 0.557 mA/m^2 (5 a 6 mA/pie^2) y en suelos de 0.093 a 0.279 mA/m^2 (1 a 3 mA/pie^2).

A.8.2 Intensidad de corriente drenada por ánodo

Las fórmulas A.6, A.7, A.8 y los datos de las Tablas A.3 y A.4, se utilizan para estimar aproximadamente la salida de corriente de ánodos de aluminio, magnesio y zinc.

Suponiendo una distancia de ánodo-estructura de tres metros, y una resistividad mayor a 500 Ohm-cm, se considera una tubería desnuda o con recubrimiento pobre.

Los factores de corrección de la Tabla A.4, corrigen la salida de corriente anticipada para otros valores de potencial tubo-suelo, diferentes a -0.850 Volts en la tubería que va a ser protegida.

$$I_a = \frac{150000f}{\rho} \quad (A.6)$$

$$I_m = \frac{150000fY}{\rho} \quad (A.7)$$

$$I_z = \frac{50000fY}{\rho} \quad (A.8)$$

donde:

- I_a es la salida de corriente de ánodo de aluminio, en mA
- I_m es la Salida de corriente de ánodo de magnesio, en mA
- I_z es la Salida de corriente de ánodo de zinc, en mA

- f es el factor de corrección (Tabla A.3)
 Y es el actor de corrección (Tabla A.4)
 ρ es la resistividad del suelo, en Ohm-cm

Tabla A.3

PESO DEL ÁNODO		FACTOR
(lb)	(kg)	"f"
3	1.3	0.59
5	2.2	0.66
9	4.0	0.81
17	7.7	1.00
32	14.5	1.16
50	22.6	1.22

Tabla A.4

POTENCIAL TUBO-SUELO	FACTORES DE CORRECCIÓN "Y"	
	MAGNESIO	ZINC
-0.70	1.14	1.60
-0.80	1.07	1.20
-0.85	1.00	1.00
-0.90	0.93	0.80
-1.00	0.79	0.40
-1.10	0.647	0.00
-1.20	0.50	0.00

Para estimar la corriente de salida de una tubería bien recubierta, las constantes 150,000 y 50,000 se multiplican por 0.80, esto supone un promedio de 20% menos de corriente de salida de los ánodos de la corriente anticipada.

A.8.3 Instalación de grupos de ánodos

En este caso, la corriente total de salida se puede determinar calculando la salida de un solo ánodo y multiplicando su valor por el factor apropiado (ver Tabla A.5).

Esta tabla está basada en la resistencia a tierra de ánodos múltiples, utilizando ánodos verticales de 7.7 kg empacados en paralelo. Para cálculos aproximados, la tabla puede aplicarse a cualquier otro tamaño de ánodos.

Las fórmulas anteriores y las tablas deben usarse únicamente como una guía para estimar las corrientes de salida de los ánodos galvánicos, las corrientes de salida verdaderas sólo pueden obtenerse por medición directa en campo, una vez que se han instalado los ánodos.

A.8.4 Cálculo de la corriente de salida de un ánodo galvánico

De una modificación de la ecuación de Dwight's, la resistencia de un ánodo cilíndrico al electrolito es igual al producto de la resistividad específica del electrolito y ciertos factores relacionados con la forma del ánodo, de acuerdo con la fórmula A.9:

$$R = \rho \frac{k}{L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (\text{A.9})$$

donde

R	es la resistencia ánodo-electrolito, en Ohm
ρ	es la resistividad del electrolito, en Ohm-cm
K	0.1 59 si L y r se expresan, en cm
K	0.0627 si L y r se expresan, en pulgadas
K	0.00521 si L y r se expresan, en pies
L	es la longitud del ánodo
r	es el radio del ánodo

Para determinar la corriente de salida de un ánodo galvánico, se utiliza la Ley de Ohm, de acuerdo con la fórmula A.10:

$$I = \frac{E}{R} \quad (\text{A.10})$$

donde:

I	es la intensidad de corriente (Ampere)
E	es la tensión eléctrica (Volt)
R	es la resistencia eléctrica (Ohm)

A.8.4 Número de camas anódicas

El número de camas anódicas se calcula de acuerdo con la fórmula A.11

$$N_c = \frac{I_d}{I_c} \quad (\text{A.11})$$

donde:

N_c	es el número de camas anódicas
I_d	es la corriente de diseño
I_c	es la corriente de salida por cama anódica

A.8.5 Separación entre camas anódicas

$$S = \frac{L}{N_c} \quad (\text{A.12})$$

La separación entre las camas anódicas se calcula con la fórmula A.12

donde:

- S es la separación entre camas anódicas
- L es la longitud del tubo a proteger

A.8.6 Material anódico necesario

La cantidad de material anódico se determina con la formula A.13:

$$W = \frac{I_t C_a V_a}{E_p} \quad (\text{A.13})$$

donde:

- W es la cantidad de material anódico necesario, en kg
- I_t es la corriente total requerida, en Ampere
- C_a es el consumo de material anódico (ver Tabla A.6), en kg-A/año
- V_a es la vida útil, en años
- E_p es la eficiencia del material anódico (0.80)

La vida útil de un sistema de protección catódica a base de ánodos de sacrificio, se considera generalmente de diez años.

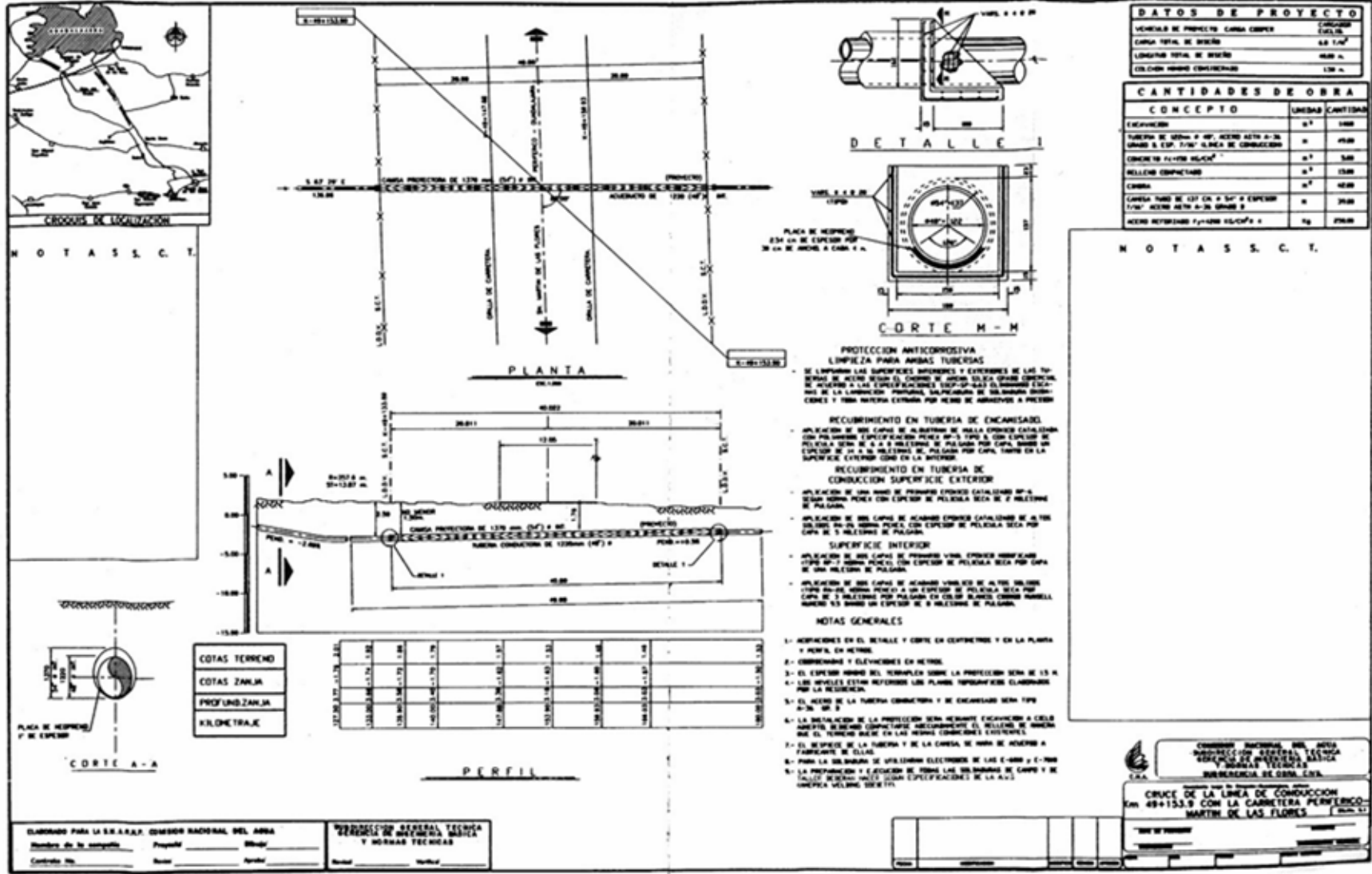
Tabla A.5

NUMERO DE ANODOS EN PARALELO	ESPACIAMIENTO	FACTORES DE LOS DE AJUSTE (METROS)		
	1.5	3.0	4.5	6.0
2	1.893	1.920	1.946	1.964
3	2.455	2.705	2.795	2.843
4	3.036	3.455	3.625	3.714
5	3.589	4.188	4.429	4.563
6	4.125	4.902	5.223	5.411
7	4.652	5.598	6.000	6.232
8	5.152	6.277	6.768	7.036
9	5.670	6.964	7.536	7.875
10	6.161	7.643	8.304	8.679

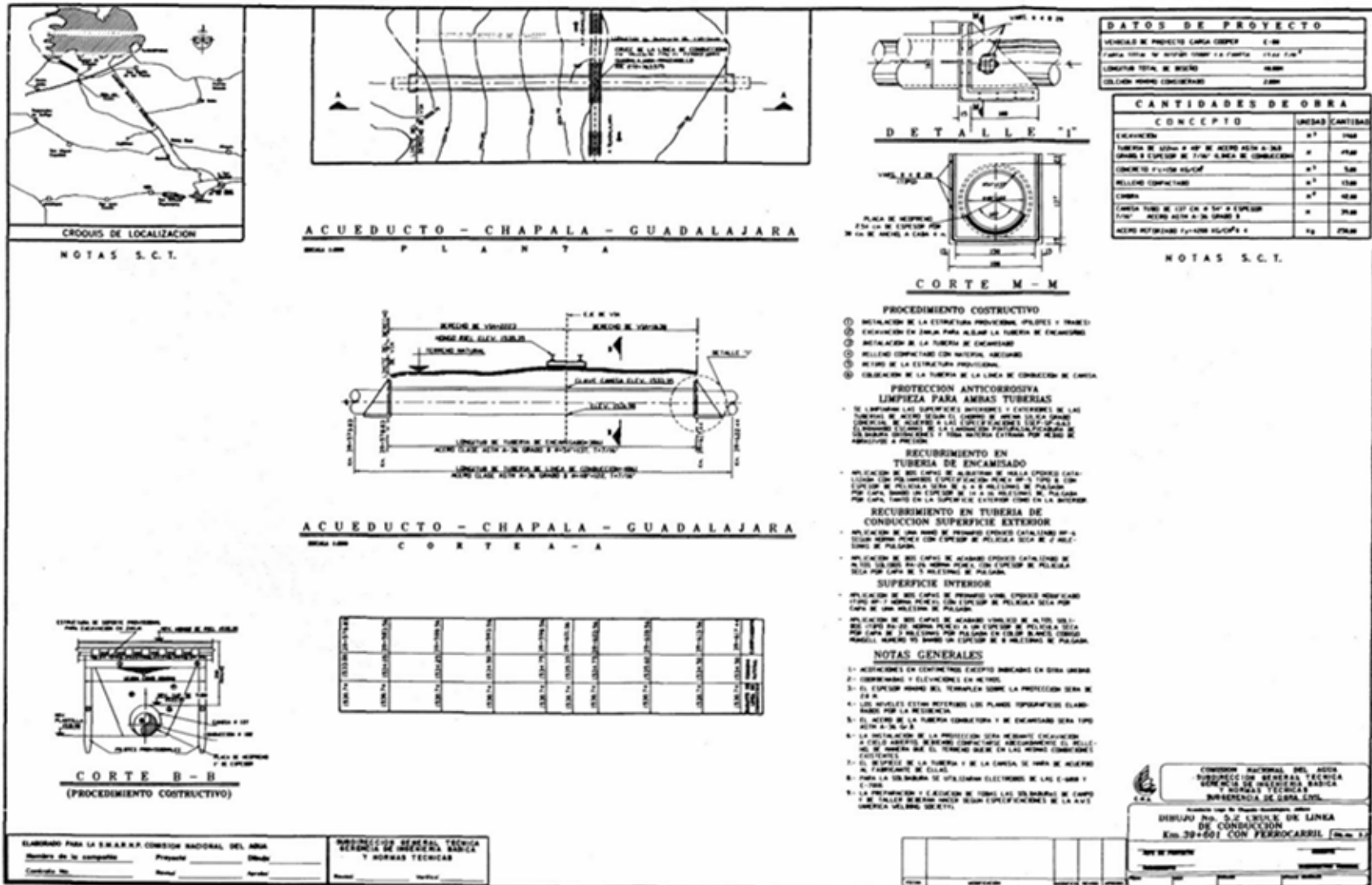
Tabla A.6

METAL	CONSUMO DE MATERIAL	
	lb/A- año	Kg/A- año
ALUMINIO	6.5	3.0
MAGNESIO	8.0	4.0
ZINC	23.6	10.7

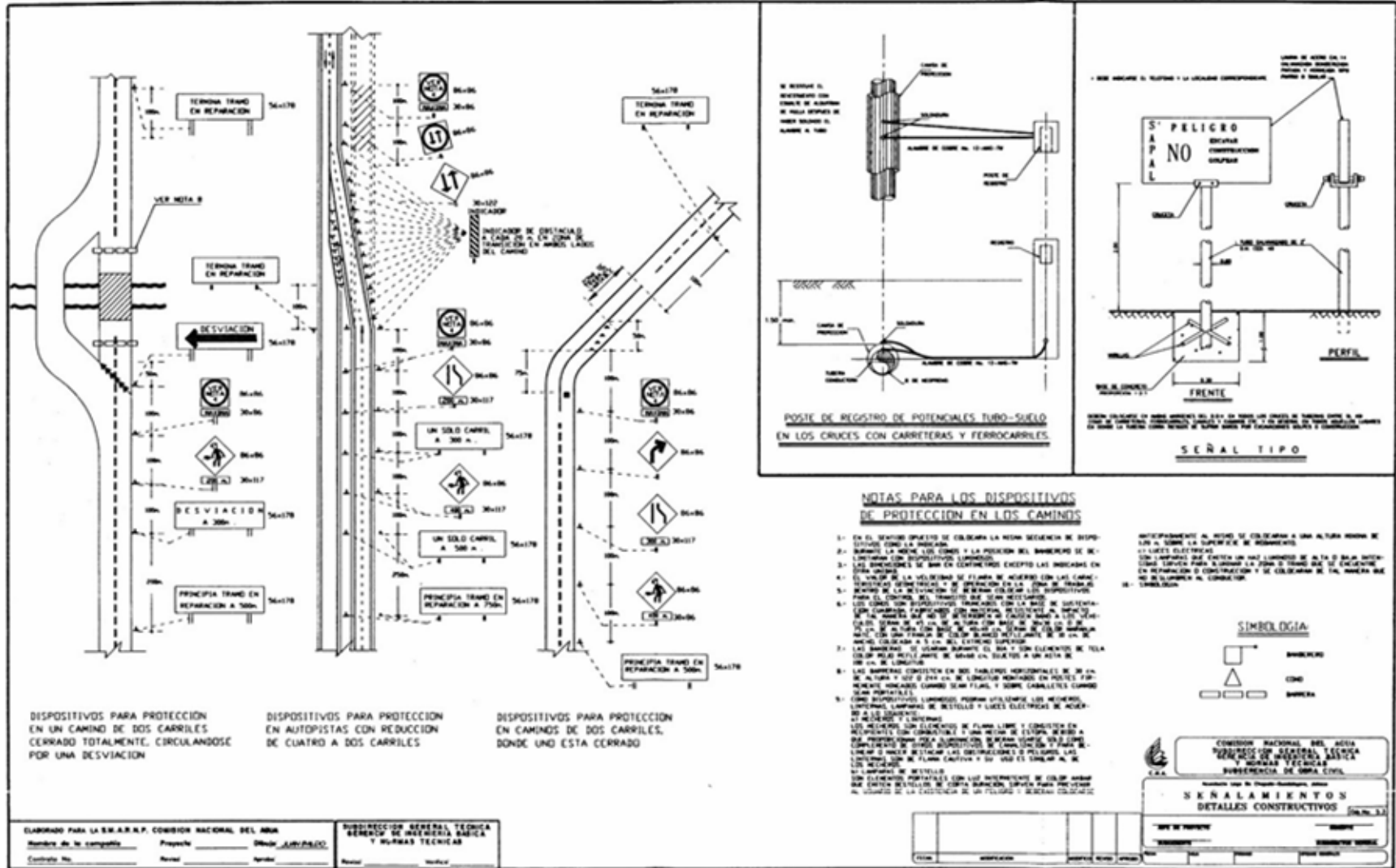
ANEXO B "PLANOS"



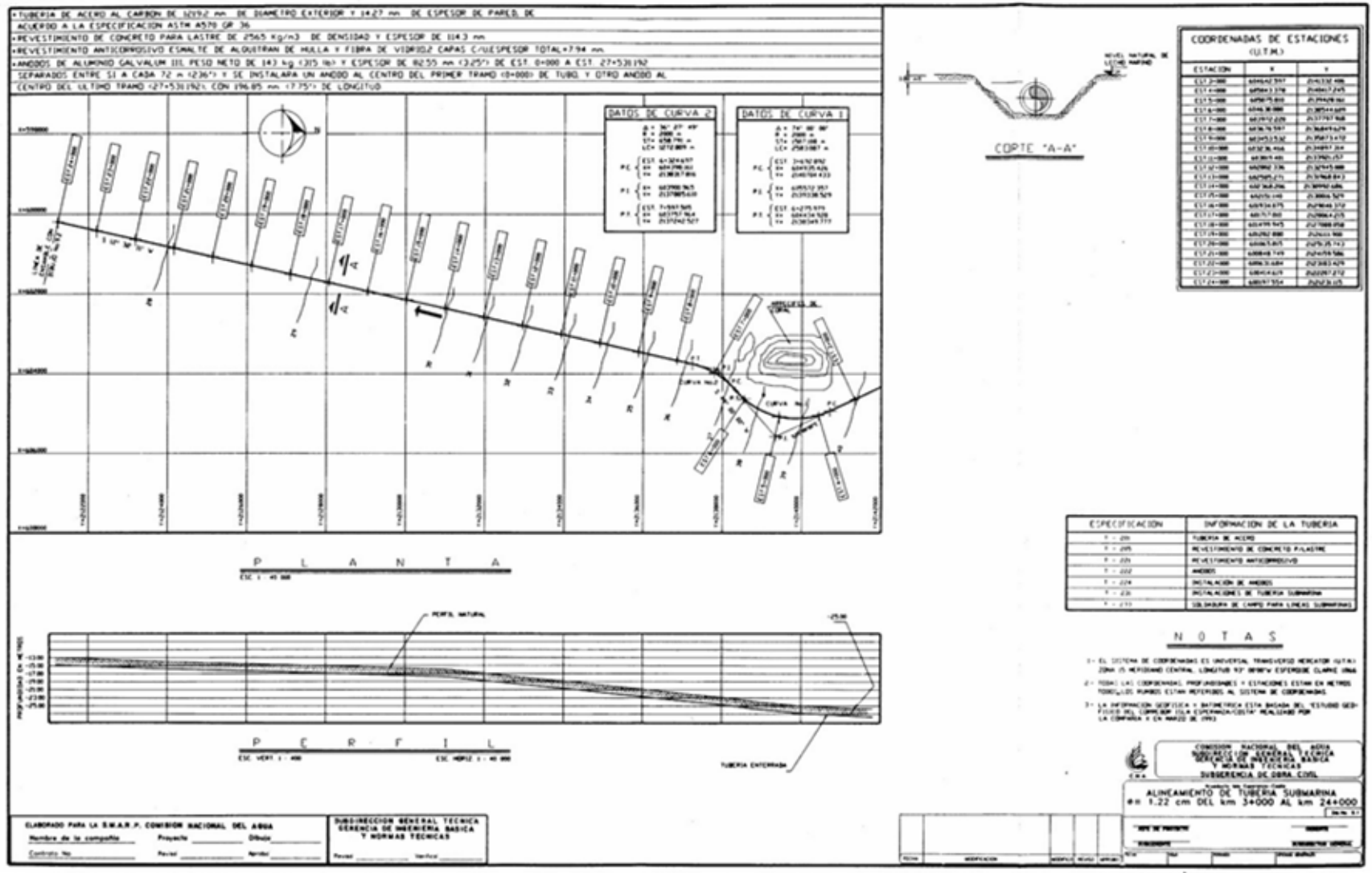
Dibujo Número 5.1



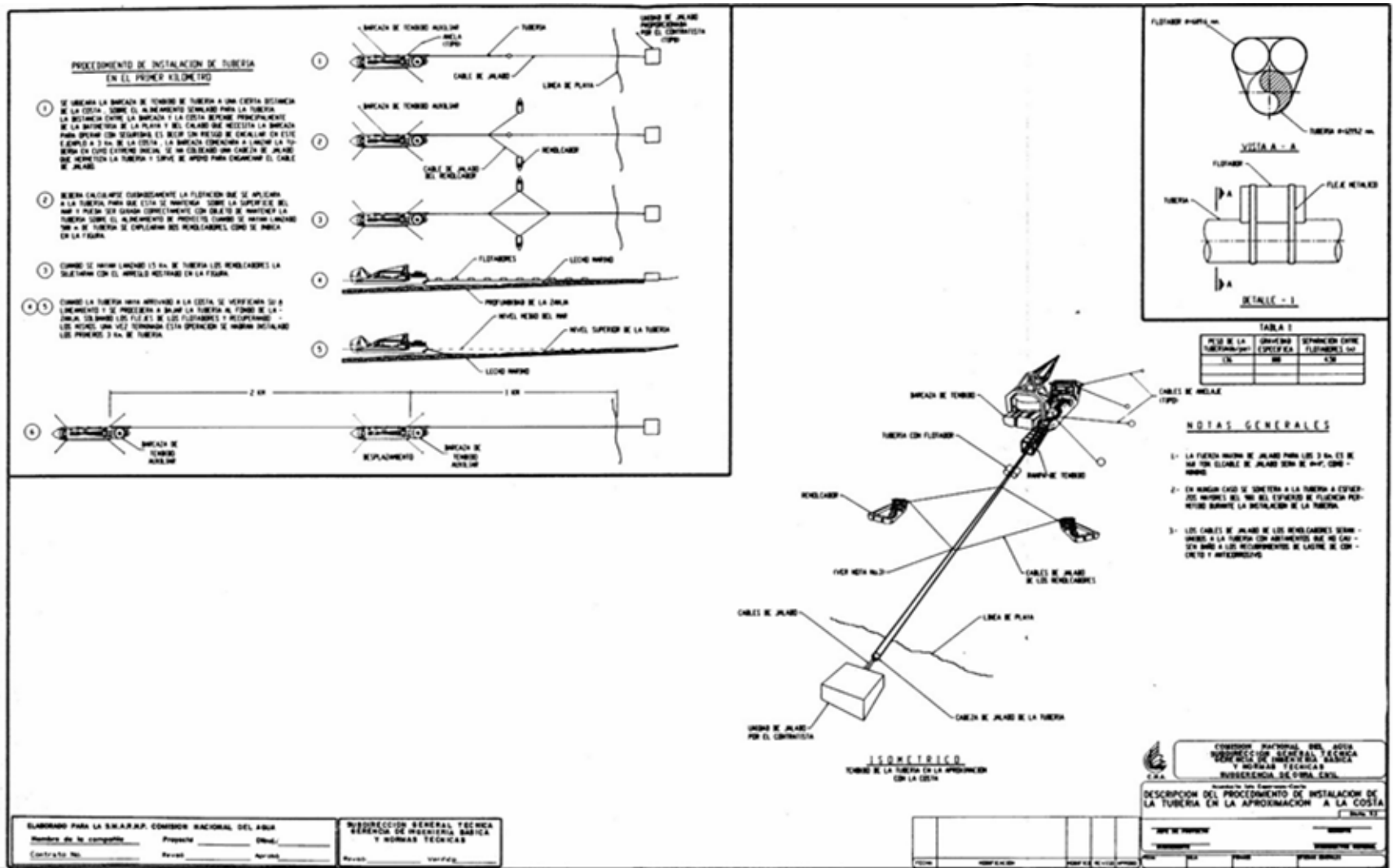
Dibujo Número 5.2



Dibujo Número 5.3



Dibujo Número 9.1



Dibujo Número 9.3

Tabla de conversión de unidades de medida al Sistema Internacional de Unidades (SI)

OTROS SISTEMAS DE UNIDADES		MULTIPLICADO POR	SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)	
UNIDAD	SÍMBOLO		SE CONVIERTE A	
			UNIDAD	SÍMBOLO
LONGITUD				
Pie	pie, ft.,'	0.3048	metro	m
Pulgada	plg., in, "	25.4	milímetro	mm
PRESIÓN/ ESFUERZO				
Kilogramo fuerza/cm ²	kg _f /cm ²	98,066.5	Pascal	Pa
Libra/pulgada ²	lb/ plg ² ,PSI	6,894.76	Pascal	Pa
Atmósfera	atm	98,066.5	Pascal	Pa
metro de agua	m H ₂ O (mca)	9,806.65	Pascal	Pa
Mm de mercurio	mm Hg	133.322	Pascal	Pa
Bar	bar	100,000	Pascal	Pa
FUERZA/ PESO				
Kilogramo fuerza	kg _f	9.8066	Newton	N
MASA				
Libra	lb	0.453592	kilogramo	kg
Onza	oz	28.30	gramo	g
PESO VOLUMÉTRICO				
Kilogramo fuerza/m ³	kg _f /m ³	9.8066	N/m ³	N/m ³
Libra /ft ³	lb/ft ³	157.18085	N/m ³	N/m ³
POTENCIA				
Caballo de potencia, Horse Power	CP, HP	745.699	Watt	W
Caballo de vapor	CV	735	Watt	W
VISCOSIDAD DINÁMICA				
Poise	μ	0.01	Mili Pascal segundo	MPa.s
VISCOSIDAD CINEMÁTICA				
Viscosidad cinemática	v	1	Stoke	m ² /s (St)
ENERGÍA/ CANTIDAD DE CALOR				
Caloría	cal	4.1868	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/s²