



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA EN TUBERÍAS PLÁSTICAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
KAREN ITZEL TOLENTINO GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL
DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. NOVIEMBRE 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Óscar Fuentes Mariles

Secretario: Dr. Ramón Domínguez Mora

Vocal: Dr. Óscar Pozos Estrada

1^{er}. Suplente: Dr. Adrián Pedrozo Acuña

2^{d o}. Suplente: Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

Lugar donde se realizó la tesis: CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA

FIRMA

ÍNDICE

1.	. CONDUCCIONES DE AGUA POTABLE	10
1.1	INTRODUCCIÓN	10
1.2	DESCRIPCIÓN DE LAS LÍNEAS DE CONDUCCIÓN	11
1.3	TIPOS DE CONDUCCIÓN	11
1.3.1	Conducción por bombeo	11
1.3.2	Conducción por gravedad	11
1.3.3	Conducción por bombeo-gravedad	12
1.4	MATERIALES	12
1.4.1	Tuberías rígidas	12
1.4.2	Tuberías flexibles	14
1.4.3	Tuberías de plástico	16
1.4.4	Termoplásticos	16
1.5	REVESTIMIENTO PARA TUBERÍAS RÍGIDAS Y FLEXIBLES	17
1.5.1	Sistemas de pintura	18
1.5.2	Mortero de cemento	19
1.5.3	Revestimiento de polietileno o polipropileno	20
1.6	SELECCIÓN DEL MATERIAL	21
1.7	COMPONENTES DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN	21
1.7.1	Piezas especiales	21
1.7.2	Válvulas	23
1.7.3	Medios para control de transitorios	30
2.	TUBERÍAS TERMOPLÁSTICAS	33
2.1	INTRODUCCIÓN	33
2.2	ANTECEDENTES	34
2.3	PARÁMETROS DE DISEÑO EN TUBERÍAS	34
2.3.1	Deflexión de tuberías	34
2.3.2	Rigidez de la tubería	35
2.4	NORMATIVIDAD	36
2.4.1	Normatividad mexicana	36
2.4.2	Normatividad internacional	36
2.4.3	Normas para tuberías plásticas	37
2.5	MATERIALES DE TUBERÍAS TERMOPLÁSTICAS	40
2.5.1	Cloruro de polivinilo (PVC)	40
2.5.2	Policloruro de vinilo clorado (CPVC)	41
2.5.3	Polietileno (PE)	42
2.5.4	Tuberías especiales de PE	43
2.5.5	Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)	44
2.5.6	Polibutileno (PB)	44
2.5.7	Polipropileno (PP)	45
2.6	ACCESORIOS PARA TUBERÍAS DE PLÁSTICO	46
2.7	SISTEMAS DE UNIÓN EN TUBERÍAS PLÁSTICAS	46
2.7.1	Uniones fijas	47
2.7.2	Uniones desmontables	49
2.8	APLICACIONES	51
2.9	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TUBERÍAS PLÁSTICAS	53
2.9.1	Ventajas	53
2.9.2	Desventajas	56
3.	MODOS Y MECANISMOS DE FALLA	58

3.1	INTRODUCCIÓN	58
3.2	MODOS DE FALLA	59
3.2.1	<i>Rotura circunferencial</i>	59
3.2.2	<i>Rotura longitudinal</i>	59
3.2.3	<i>Perforaciones</i>	60
3.2.4	<i>Voladuras</i>	61
3.2.5	<i>Desgarre</i>	61
3.2.6	<i>Roturas en la unión</i>	62
3.3	MECANISMOS DE FALLA.....	62
3.3.1	<i>Transitorios hidráulicos</i>	63
3.3.2	<i>Transitorios con aire atrapado</i>	64
4.	PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA EN TUBERÍAS PLÁSTICAS	67
4.1	INTRODUCCIÓN	67
4.2	ANTECEDENTES	68
4.3	PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA.....	68
4.3.1	<i>Casos de estudio de PRF</i>	69
4.3.2	<i>Mecánica de la fractura</i>	80
4.3.3	<i>Métodos de Ensayo para PRF</i>	81
4.3.4	<i>Presión Crítica Medida de PRF para PVC</i>	83
4.3.5	<i>Presión Crítica Medida de PRF para PE</i>	84
5.	CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA	87
5.1	INTRODUCCIÓN	87
5.2	INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA EL ANÁLISIS	92
5.2.1	<i>Consideraciones generales</i>	92
5.2.2	<i>Consideraciones de los gastos</i>	92
5.2.3	<i>Consideraciones en los tanques</i>	94
5.2.4	<i>Consideraciones en las válvulas de seccionamiento</i>	94
5.2.5	<i>Consideraciones en las válvulas de aire</i>	94
5.3	ANÁLISIS DE LOS TRANSITORIOS HIDRÁULICOS CON EL PROGRAMA TRANS.....	96
5.3.1	<i>Determinación del coeficiente de pérdida de carga</i>	98
5.3.2	<i>Comportamiento de la línea piezométrica</i>	99
5.3.3	<i>Determinación de la celeridad</i>	101
5.4	RESULTADOS DEL ANÁLISIS	102
5.4.1	<i>ANÁLISIS DEL ACUEDUCTO UTILIZANDO EL SOFTWARE TRANS</i>	102
5.5	ANÁLISIS DE LAS PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO	104
5.6	RESULTADOS PARA EL ESCENARIO 1.....	105
5.6.1	<i>Gasto de diseño, 1075 l/s</i>	105
5.6.2	<i>Gasto máximo julio, 972 l/s</i>	107
5.6.3	<i>Gasto mínimo julio, 677 l/s</i>	108
5.6.4	<i>Gasto máximo mayo, 1620 l/s</i>	109
5.6.5	<i>Gasto mínimo mayo, 542 l/s</i>	110
5.7	RESULTADOS PARA ESCENARIO 2	112
5.7.1	<i>Gasto de Diseño, 1075 l/s</i>	112
5.7.2	<i>Gasto máximo julio, 972 l/s</i>	113
5.7.3	<i>Gasto mínimo julio, 677 l/s</i>	114
5.7.4	<i>Gasto máximo mayo, 1620 l/s</i>	115
5.7.5	<i>Gasto mínimo mayo, 542 l/s</i>	116
6.	CONCLUSIONES	118

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE EN VALENCIA, ESPAÑA.....	11
FIGURA 1.2. CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE CONFORMADA CON DOS TUBERÍAS DE HIERRO.	13
FIGURA 1.3. CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE CON TUBERÍA DE ASBESTO-CEMENTO EN ECUADOR.	13
FIGURA 1.4. TUBERÍA DE CONCRETO CON JUNTA TIPO ESPIGA-CAMPANA.	14
FIGURA 1.5. TUBERÍA DE HIERRO DÚCTIL, EN LA CIUDAD DE BENGALA, INDIA.	15
FIGURA 1.6. TRAMO DE TUBERÍA DE ACERO EN LA CIUDAD DE FLORIDA, ESTADOS UNIDOS.....	15
FIGURA 1.7. TUBERÍAS DE PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO.	16
FIGURA 1.8. TUBERÍAS Y CONDUCCIÓN DE PVC.....	17
FIGURA 1.9. TUBERÍA Y CONDUCCIÓN DE PE.....	17
FIGURA 1.10. COLOCACIÓN DE REVESTIMIENTO EXTERNO A UNA TUBERÍA DE ACERO.	18
FIGURA 1.11. TUBERÍAS CON REVESTIMIENTO INTERNO DE MORTERO DE CEMENTO.	20
FIGURA 1.12. TUBERÍAS DE ACERO CON REVESTIMIENTO EXTERNO DE POLIETILENO.....	20
FIGURA 1.13. PIEZAS ESPECIALES DE DIFERENTES MATERIALES: A) JUNTA, B) CARRETE, C) EXTREMIDAD, D) BRIDA, E) CODO, F) CRUCE, G) AMPLIACIÓN, H) COPLE, I) NIPLE Y J) TEE.	23
FIGURA 1.14. VÁLVULA DE COMPUERTA.	24
FIGURA 1.15. VÁLVULA DE GLOBO.	24
FIGURA 1.16. VÁLVULA DE MARIPOSA.....	25
FIGURA 1.17. VÁLVULA DE DIAFRAGMA.....	25
FIGURA 1.18. VÁLVULA DE BOLA.	26
FIGURA 1.19. VÁLVULA DE RETENCIÓN (TIPO DE ELEVACIÓN).....	26
FIGURA 1.20. VÁLVULA DE DESAHOGO (ALIVIO).	27
FIGURA 1.21. VÁLVULA DE ADMISIÓN Y EXPULSIÓN DE AIRE (VAEA) (POZOS, ET AL., 2012).	28
FIGURA 1.22. VÁLVULA DE EXPULSIÓN DE AIRE (VEA) (POZOS, ET AL., 2012).	29
FIGURA 1.23. VALVULAS DE AIRE COMBINADAS (VAC) (POZOS, ET AL., 2012).....	29
FIGURA 2.1. DEFLEXIÓN Y SOBRE-DEFLEXIÓN EN TUBERÍAS PLÁSTICAS.	35
FIGURA 2.2. TUBERÍA DE PVC TIPO FUSIBLE.	41
FIGURA 2.3. TUBERÍA DE CPVC.....	42
FIGURA 2.4. TUBERÍA DE HDPE.	42
FIGURA 2.5. TUBERÍA DE HDPE COMO EMISOR SUBMARINO.	43
FIGURA 2.6. TUBERÍA DE POLIETILENO RETICULADO CON PARED INTERNA LISA.....	43
FIGURA 2.7. TUBERÍA DE ABS.....	44
FIGURA 2.8. TUBERÍAS DE PB PARA CONDUCCIONES DE GAS NATURAL.	45
FIGURA 2.9. TUBERÍA DE PP.	45
FIGURA 2.10. ACCESORIOS PLÁSTICOS PARA TUBERÍAS.	46
FIGURA 2.11. SOLDADURA A TOPE.	47
FIGURA 2.12. SOLDADURA TIPO SOCKET.	48
FIGURA 2.13. SOLDADURA DE SILLETA.....	48
FIGURA 2.14. SOLDADURA POR ELECTROFUSIÓN.....	49
FIGURA 2.15. CEMENTANTES PARA TUBERÍAS DE PVC Y ABS.	49
FIGURA 2.16. TIPOS DE BRIDAS UTILIZADAS COMÚNMENTE PARA UNIÓN DE TUBERÍAS.	50
FIGURA 2.17. ACOPLAMIENTO CON SISTEMA RANURADO.....	51
FIGURA 2.18. UNIÓN TIPO ESPIGA - EMPAQUE – CAMPANA.	51
FIGURA 3.1. A) ROTURA CIRCUNFERENCIAL EN UNA TUBERÍA DE HIERRO, B) ROTURA CIRCUNFERENCIAL EN UNA TUBERÍA DE COBRE.	59
FIGURA 3.2. A) ROTURA LONGITUDINAL EN UNA TUBERÍA ASBESTO-CEMENTO, B) ROTURA LONGITUDINAL EN UNA TUBERÍA DE HIERRO, C) ROTURA LONGITUDINAL EN UNA TUBERÍA DE PVC.....	60
FIGURA 3.3. A) PERFORACIÓN EN UNA TUBERÍA DE HIERRO DÚCTIL, B) PERFORACIÓN EN UNA TUBERÍA DE POLIETILENO.....	61
FIGURA 3.4. A) VOLADURA EN UNA TUBERÍA DE PVC, B) VOLADURA EN UNA TUBERÍA DE HIERRO DÚCTIL.	61
FIGURA 3.5. A) DESGARRE EN UNA TUBERÍA DE POLIESTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO, B) DESGARRE EN UNA TUBERÍA DE ACERO.	62
FIGURA 3.6. A) ROTURA EN LA UNIÓN DE UNA TUBERÍA DE ACERO, B) ROTURA EN LA UNIÓN DE UNA TUBERÍA DE PVC.....	62

FIGURA 4.1. DEFECTO MICROSCÓPICO EN UN TUBO DE PVC (BERNAL-LARA ET AL. 2004).	67
FIGURA 4.2. PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA EN UN TUBO DE PVC CON AIRE ATRAPADO (GREENSHIELDS & LEEVERS, 1996)	68
FIGURA 4.3. PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA EN UN TUBO DE PVC SIN AIRE ATRAPADO (GREENSHIELDS & LEEVERS, 1996).	68
FIGURA 4.4. ROTURA DEL TIPO PRF EN UN TUBO CON UNIÓN ESPIGA-CAMPANA.	69
FIGURA 4.5. ROTURA DEL TIPO PRF EN UNA TUBERÍA FUSIBLE DE PVC.	70
FIGURA 4.6. TUBERÍA DE PVC DE 20" CON RD 18 - DANVILLE, CA– FALLA TIPO PRF DE 120 METROS DE LONGITUD (PALERMO , 2010)	72
FIGURA 4.7. TUBERÍA DE PVC DE 20" CON RD 18 - JACKSONVILLE, CLAY COUNTY, FL– FALLA TIPO PRF DE 183 METROS DE LONGITUD (PALERMO , 2010)	73
FIGURA 4.8. TUBERÍA DE PVC DE 20" CON RD 18 - JACKSONVILLE, CLAY COUNTY, FL– FALLA TIPO PRF DE 500 METROS DE LONGITUD (PALERMO , 2010)	73
FIGURA 4.9. TUBERÍA DE PVC DE 20" CON RD 18 - XENIA, IA – FALLA TIPO PRF DE 400 METROS DE LONGITUD (PALERMO , 2010)	74
FIGURA 4.10. TUBERÍA DE PVC DE 8" CON RD 25 – TAMPA, FL – FALLA TIPO PRF DE 60 METROS DE LONGITUD (PALERMO , 2010)	74
FIGURA 4.11. TUBERÍA DE PVC DE 24" CON RD25 – BATON ROUGE, LA– FALLA TIPO PRF DE 260 METROS DE LONGITUD (PALERMO , 2010)	75
FIGURA 4.12. TUBERÍA DE PVC DE 30" CON RD 25 – NAPLES, COLLIER COUNTY, FL	76
FIGURA 4.13. TUBERÍA DE PVC DE 30" CON RD25 – CHATHAM, IL – FALLA TIPO PRF DE 260 METROS DE LONGITUD (PALERMO , 2010)	77
FIGURA 4.14. TUBERÍA DE PVC DE 16" CON RD 31 – SALT LAKE CITY, UT	78
FIGURA 4.15. TUBERÍA DE PVC DE 20" CON RD21 – DORCHESTER COUNTY, SC(PALERMO , 2010)– FALLA TIPO PRF DE 400 METROS DE LONGITUD	79
FIGURA 4.16. TUBERÍA DE PVC DE 16" CON RD21 – WATFORD, ND – FALLA TIPO PRF DE 400 METROS DE LONGITUD (PALERMO , 2010)	79
FIGURA 4.17. TUBERÍA DE PVC DE 12" CON RD18 – JACKSONVILLE, FL– FALLA TIPO PRF DE 6 METROS DE LONGITUD (PALERMO , 2010)	80
FIGURA 4.18. MÁQUINA S4 – BANCO DE PRUEBAS DE LABORATORIO DE CHEVRON PHILIPS CHEMICAL COMPANY, LLC (PALERMO, 2010).	82
FIGURA 5.1. PROYECTO CONEJOS MÉDANOS VISTA AÉREA (AVANCE DE PROYECTOS, JUNTA MUNICIPAL DE AGUA Y SANEAMIENTO, JMAS)	88
FIGURA 5.2. TRAMO A GRAVEDAD DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS VISTO EN PLANTA.	89
FIGURA 5.3. FALLAS OCURRIDAS A LO LARGO DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS.	89
FIGURA 5.4. ROTURA DEL TIPO PRF EN UN TUBO DE PVC SIN AIRE ATRAPADO OCURRIDO EN EL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS DE CIUDAD JUÁREZ CHIHUAHUA, MÉXICO.	91
FIGURA 5.5. ROTURA DEL TIPO PRF EN UN TUBO DE PVC CON PRESENCIA DE AIRE ATRAPADO OCURRIDO EN EL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS DE CIUDAD JUÁREZ CHIHUAHUA, MÉXICO.	91
FIGURA 5.6. VISTA EN PLANTA DE LA CONFIGURACIÓN DEL ACUEDUCTO.	93
FIGURA 5.7. VÁLVULAS TIPO COMPUERTA	94
FIGURA 5.8. PERFIL DEL ACUEDUCTO Y VÁLVULAS DE AIRE EXISTENTES.	96
FIGURA 5.9. PANTALLA DE INICIO DEL PROGRAMA TRANS.	97
FIGURA 5.10. CAPTURA DE DATOS DE PROYECTO	97
FIGURA 5.11. PIEZOMÉTRICA EN EL TRAMO A GRAVEDAD	99
FIGURA 5.12. CÁLCULO DE LA LÍNEA PIEZOMÉTRICA A PARTIR DEL CADENAMIENTO 5+040	100
FIGURA 5.13. PIEZOMÉTRICA EN EL TRAMO A GRAVEDAD CALCULADA DEL TANQUE P.E.C HACIA AGUAS ARRIBA.	101
FIGURA 5.14. ESQUEMA DE LA COLOCACIÓN DE LAS VÁLVULAS PARA INCREMENTAR LAS PÉRDIDAS	101
FIGURA 5.15. ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS, VÁLVULAS QUE SE CERRARON PARA GENERAR EL TRANSITORIO DEL PRIMER ESCENARIO.	103
FIGURA 5.16. ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS, VÁLVULAS QUE SE CERRARON PARA GENERAR EL TRANSITORIO DEL SEGUNDO ESCENARIO.	103
FIGURA 5.17. PRESIONES A FLUJO ESTABLECIDO Y TRANSITORIO REGISTRADAS EN CADA PUNTO DONDE OCURRIÓ UNA FALLA.	105
FIGURA 5.18. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 1075 L/S ESCENARIO 1.	106
FIGURA 5.19. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 972 L/S ESCENARIO 1.	107

FIGURA 5.20. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 677 L/S ESCENARIO 1.	108
FIGURA 5.21. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 1620 L/S ESCENARIO 1.	109
FIGURA 5.22. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 542 L/S ESCENARIO 1.	111
FIGURA 5.23. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 1075 L/S ESCENARIO 2.	112
FIGURA 5.24. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 972 L/S ESCENARIO 2.	113
FIGURA 5.25. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 677 L/S ESCENARIO 2.	114
FIGURA 5.26. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 1620 L/S ESCENARIO 2.	115
FIGURA 5.27. ENVOLVENTES MÁXIMAS Y MÍNIMAS PRODUCIDAS PARA UN GASTO DE 542 L/S ESCENARIO 2.	116

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. NORMAS MEXICANAS APLICABLES A TUBERÍAS PLÁSTICAS DE AGUA POTABLE.	38
TABLA 2.2. NORMAS ASTM PARA TUBERÍAS PLÁSTICAS.	39
TABLA 2.3. NORMAS AWWA PARA TUBERÍAS PLÁSTICAS.	40
TABLA 2.4. PROPIEDADES Y APLICACIONES.	52
TABLA 2.5. DENSIDAD DE ALGUNOS MATERIALES.	54
TABLA 2.6. RUGOSIDAD ABSOLUTA DE ALGUNOS MATERIALES.	55
TABLA 2.7. VALORES DE CELERIDAD DE ALGUNOS MATERIALES.	55
TABLA 4.1. RESUMEN DE FALLAS OCURRIDAS EN CASOS DE ESTUDIO DE ESTADOS UNIDOS ENTRE 2004 Y 2013.	70
TABLA 5.1. RESUMEN DE LAS FALLAS OCURRIDAS EN EL ACUEDUCTO CONEJOS – MÉDANOS.	90
TABLA 5.2. GASTOS REGISTRADOS POR LA JMAS EN EL ACUEDUCTO DURANTE EL AÑO 2012.	92
TABLA 5.3. GASTO DE DISEÑO REPARTIDO HACIA LOS DISTINTOS TANQUES DE ENTREGA, SEGÚN JMAS.	93
TABLA 5.4. VÁLVULAS DE AIRE EN EL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS.	95
TABLA 5.5. FACTORES DE FRICCIÓN (F).	98
TABLA 5.6. DISTRIBUCIÓN DE LOS GASTOS PARA LAS SIMULACIONES.	104
TABLA 5.7. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 1075 L/s).	106
TABLA 5.8. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 972 L/s).	107
TABLA 5.9. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 677 L/s).	108
TABLA 5.10. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 1620 L/s).	110
TABLA 5.11. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 542 L/s).	111
TABLA 5.12. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 1075 L/s).	112
TABLA 5.13. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 972 L/s).	113
TABLA 5.14. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 677 L/s).	114
TABLA 5.15. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 1620 L/s).	116
TABLA 5.16. FALLAS Y PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO (Q = 542 L/s).	117

CAPÍTULO 1

1. . CONDUCCIONES DE AGUA POTABLE

1.1 INTRODUCCIÓN

El agua es el principal y más importante componente de nuestro planeta. Sirvió de base para la conformación de la vida y hoy es esencial para la evolución humana. Bien podría decirse que es el recurso más precioso que la tierra provee a la humanidad. Sin embargo, la gente, no siempre ha respondido inteligentemente con respecto al uso y cuidado de este vital líquido. De hecho, el futuro de la especie humana y muchas otras, estaría en riesgo si no se logran mejoras significativas en la administración del agua.

La disponibilidad natural media per-cápita del agua se ha reducido drásticamente en los últimos años debido al crecimiento de la población, pasando de 18 mil metros cúbicos por habitante por año en 1950 a sólo 4,422 metros cúbicos por habitante por año en el 2010, considerándose esta última cifra como una cantidad baja (Comisión Nacional del Agua, 1997).

El país representa un desequilibrio entre disponibilidad hídrica y demanda, existen cuencas donde se utiliza un bajo porcentaje del agua total disponible, y otras en las que se utiliza el 100%. El 77% de la población nacional se concentra en las regiones donde se cuenta solo con el 31% del recurso natural medio (Comisión Nacional del Agua, 2011). De ahí la importancia de tomar conciencia del uso y la conservación del agua, así como de los esfuerzos que se realizan para que llegue a nuestros hogares.

En la actualidad, los diferentes servicios y productos en materia hídrica tienen que ser mejor administrados. Un uso eficiente del agua implica la utilización de mejores sistemas de extracción, conducción y almacenamiento de agua; además del cambio de la forma de pensar de los usuarios del recurso.

Este trabajo tiene como objetivo analizar las condiciones de falla ocasionadas por transitorios hidráulicos partiendo de la hipótesis de que éstas fueron generadas a partir del cierre de válvulas de seccionamiento ubicadas a lo largo del acueducto Conejos-Médanos en Ciudad Juárez, Chihuahua.

El capítulo 1 está conformado por la recopilación bibliográfica de los tipos de acueductos, componentes, características y accesorios. En el capítulo 2 se hace una descripción detallada de las tuberías termoplásticas, haciendo énfasis en sus usos, aplicaciones en las conducciones de agua, además de mencionar las ventajas y desventajas de cada tipo de tubería. En el capítulo 3 se aborda el tema de los modos y mecanismos de falla de las tuberías termoplásticas. En el capítulo 4 se analizan algunos casos históricos de fallas tipo “propagación rápida de falla” ocurridas en distintas ciudades de Estados Unidos, además se describe detalladamente qué es y cómo se produce la propagación rápida de falla en tuberías de PVC y de Polietileno, se muestran las ecuaciones obtenidas de los experimentos realizados por investigadores y se enlistan las condiciones para que se propicien este tipo de roturas. En el capítulo 5 se estudia la hipótesis de que las roturas del acueducto Conejos-Médanos fueron generadas por transitorios hidráulicos, para el análisis de los transitorios se utiliza el software TRANS, además se revisan los resultados obtenidos. En el capítulo 6 se describen las conclusiones del trabajo presentado.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LAS LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

Se le llama línea de conducción al grupo formado por tuberías, bombas y dispositivos de control que permiten trasladar agua desde la fuente de abastecimiento hasta el sitio donde será distribuida. Una línea de conducción debe seguir, en lo posible, el perfil del terreno y debe ubicarse de manera que pueda inspeccionarse fácilmente, ésta puede diseñarse para trabajar por bombeo o por gravedad y generalmente se proyecta para que funcione a presión. En la Figura 1.1 se muestra un acueducto de agua potable en la ciudad de Valencia, España.



Figura 1.1. Tuberías de conducción de agua potable en Valencia, España.

1.3 TIPOS DE CONDUCCIÓN

1.3.1 Conducción por bombeo

La conducción por bombeo es necesaria cuando se requiere adicionar energía para obtener la carga dinámica asociada con el gasto de diseño. Este tipo de conducción es usada comúnmente cuando la elevación en la fuente de abastecimiento es menor a la altura piezométrica requerida en el punto de entrega. El equipo de bombeo proporciona energía para lograr el transporte del agua.

En una línea de conducción por bombeo se hará el estudio para obtener el diámetro económico. Para ello se considerarán varias alternativas para el diámetro de la tubería. El diámetro económico será aquel que corresponde al valor mínimo de la suma de los conceptos siguientes, calculados a valor presente:

- Costo de la tubería y su colocación; y
- Costo de la energía para el bombeo.

1.3.2 Conducción por gravedad

Una conducción de este tipo se presenta cuando la fuente de abastecimiento es mayor en la altura piezométrica requerida o existente que en el punto de entrega del agua, el transporte del fluido se logra por la diferencia de energía disponible.

El diseño en este tipo de conducción consistirá en determinar el diámetro comercial del tubo, que conducirá el gasto deseado con una pérdida de carga en la conducción igual a la carga disponible.

1.3.3 Conducción por bombeo-gravedad

Si la topografía del terreno obliga al trazo de la conducción al cruzar por partes más altas que la elevación de la superficie del agua en el tanque de regularización conviene analizar la colocación intermedia en ese lugar donde la primer parte es por bombeo y la otra por gravedad.

1.4 MATERIALES

La enorme variedad de materiales usados industrialmente para un sistema de conducción de abastecimiento de agua potable pertenecen a un grupo bien clasificado. Estos materiales deben satisfacer especificaciones generales tanto para la fabricación de la tubería como para la construcción del acueducto.

Los materiales utilizados son variados, dentro de un mismo sistema suelen utilizarse diferentes materiales, cada material cuenta con fortalezas y debilidades particulares.

Cuando los materiales deben ser sometidos a alguna prueba, comúnmente se recurre a laboratorios privados, también a laboratorios de instituciones educativas o de las dependencias estatales que cuenten con la maquinaria correspondiente para la realización de las pruebas, éstas son realizadas principalmente para el control de los concretos y calidad de las tuberías.

Dado que los sistemas de tuberías suelen estar en servicio durante muchos años y ser objeto de ampliación y mejoras, es necesario comprender las propiedades de los materiales más antiguos o incluso históricos, por esta razón, los materiales aún deben ser estudiados ya que a menudo es necesario el re-análisis de los acueductos para poder adaptarlos a los cambios.

1.4.1 Tuberías rígidas

1.4.1.1 Hierro fundido

También conocido como hierro colado o hierro gris, es uno de los primeros materiales empleados para la elaboración de tuberías. Se tienen registros de que en el año de 1455, se instaló en Alemania, la primera tubería de hierro fundido en el Castillo Dillenberg (Ellis, 2008).

El hierro fundido contiene de 2.5 a 4% de carbono y de 1 a 3% de silicio. Una tubería de hierro fundido puede durar más de 100 años en servicio bajo condiciones normales de operación (previniendo corrosión), ya que la corrosión externa no representa problema debido a los espesores de pared relativamente grandes que se manejan. Aun así, la tubería se puede recubrir con polietileno para protegerla de ambientes desfavorables. El hierro fundido falla catastróficamente. En la Figura 1.2 se observa una tubería de hierro fundido en el desierto de Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos.



Figura 1.2. Conducción de agua potable conformada con dos tuberías de hierro.

1.4.1.2 Asbesto-Cemento

El asbesto-cemento fue inventado alrededor de 1930. Los tubos suelen fabricarse en diámetros de hasta 36". La tubería está hecha a base de cemento Portland, sílice y fibras de asbesto. El AC es susceptible al ataque por aguas y suelos blandos, suelos ácidos o con presencia de sulfatos. El AC es un material frágil que puede fallar catastróficamente. La presión que puede soportar una tubería de éste material está definida por clases, y el material puede soportar presiones de hasta 200 psi (1500 kN/m²).

Se ha demostrado que el asbesto es cancerígeno cuando las fibras son inhaladas, pero no hay evidencia contundente de que causen algún problema si son ingeridas. En la Figura 1.3 se muestra una tubería de asbesto-cemento en la ciudad de Machala, Ecuador.



Figura 1.3. Conducción de agua potable con tubería de asbesto-cemento en Ecuador.

1.4.1.3 Concreto

Comúnmente fabricada para proyectos específicos, así que sus diámetros especiales son relativamente fáciles de obtener, disponibles en tamaños de hasta 72" (1.83 m).

Esta tubería se usa comúnmente en líneas de alta presión, se elabora con un alma de acero para resistir tensión, por otra parte el refuerzo de acero se omite en la fabricación de tubería de baja presión. Esta tubería es fabricada para resistir presiones de hasta 400 psi (2700 kN/m²). En la Figura 1.4 se puede observar una conducción de agua potable de concreto.



Figura 1.4. Tubería de concreto con junta tipo espiga-campana.

1.4.2 Tuberías flexibles

1.4.2.1 Hierro dúctil

El hierro dúctil se desarrolló como una mejora del hierro fundido y está diseñado para funcionar como un tubo flexible, contiene 3.5% de carbono en forma de esferas o nódulos y tiene características de corrosión similares a los de hierro fundido.

El hierro dúctil es un material mucho más fuerte, más resistente, superior al hierro fundido en resistencia, en ductilidad, y en características de impacto por amplios márgenes. El hierro dúctil es más resistente al impacto que el hierro fundido y se puede probar mediante la prueba de impacto Charpy, una prueba que mide la resistencia al impacto mediante la aplicación de una carga de choque a una muestra.

Una tubería de hierro dúctil puede resistir un mínimo de 7 lb/ft de impacto y una tubería de hierro fundido sólo puede resistir hasta 2 lb/ft de impacto. En la Figura 1.5 se puede observar una conducción de agua potable utilizando hierro dúctil.

1.4.2.2 Acero

Los aceros son aleaciones de hierro-carbono, generalmente, el porcentaje de carbono no excede del 1.76%. Las tuberías de acero tienen una vida útil prolongada cuando se instalan, protegen y mantienen correctamente. Se recomienda su uso cuando se requieran de diámetros grandes y presiones elevadas.

Los daños estructurales debido a la corrosión son mayores que en hierro fundido ya que las paredes son más delgadas. El acero se expande $\frac{3}{4}$ " por cada 100 ft de largo cuando la temperatura se aproxima a los 40°C, por lo tanto, se requiere instalar juntas que permitan dicha expansión. En la Figura 1.6 se puede observar un tramo de una tubería de acero.



Figura 1.5. Tubería de hierro dúctil, en la ciudad de Bengala, India.



Figura 1.6. Tramo de tubería de acero en la ciudad de Florida, Estados Unidos.

1.4.3 Tuberías de plástico

Las tuberías de plástico representan un área de crecimiento importante en los últimos 20 años. Todos los plásticos son resistentes a la corrosión, además el plástico es dúctil e impermeable. Generalmente no se utilizan revestimientos interiores ni exteriores. Estos materiales se pueden subdividir en termoplásticos y plásticos termoestables reforzadas con fibra de vidrio. Ambas categorías están disponibles en una gama de materiales sintéticos, dando un amplio rango de resistencia química.

1.4.3.1 Los plásticos termoestables

Los plásticos termoestables son materiales formados por polímeros unidos mediante enlaces químicos adquiriendo una estructura reticulada.

La estructura altamente reticulada que poseen los materiales termoestables es la responsable directa de las altas resistencias mecánicas y físicas. En general, las tuberías termoestables tienen una mayor rigidez, los coeficientes de expansión térmica más bajos y pueden ser utilizados a temperaturas más altas que los termoplásticos. Por el contrario dicha estructura altamente reticulada es la que aporta una baja elasticidad, proporcionando a dichos materiales su característica fragilidad.

Los termoplásticos más conocidos son: tubos de fibra de vidrio y tubos de plástico reforzados con fibra de vidrio.

Para evitar que el material se agriete se recomienda un límite de tensión del 0.2%. Los tubos termoestables se suelen clasificar en términos de capacidad de resistencia a la presión de alrededor de 64 bar y rigidez anular (resistencia al aplastamiento) de entre 250 N / m² a 8000 N / m². En la Figura 1.7 se observa una conducción de tuberías de fibra de vidrio (Ellis, 2008).



Figura 1.7. Tuberías de plástico reforzado con fibra de vidrio.

1.4.4 Termoplásticos

Los termoplásticos son materiales que están formados por polímeros que se encuentran unidos mediante fuerzas intermoleculares formando estructuras lineales o ramificadas. La unión de las moléculas puede adoptar dos tipos diferentes de estructuras, estructuras amorfas o estructuras cristalinas, siendo posible la existencia de ambas estructuras en un mismo material termoplástico.

Si el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con estructuras amorfas, dicho material presentará una pobre resistencia frente a cargas pero una excelente elasticidad, por el

contrario, si el material termoplástico dispone de una alta concentración de polímeros con una estructura cristalina, el material presentará unas altas propiedades de resistencia frente a cargas y esfuerzos superando incluso a materiales termoestables, por otro lado presentará unas pobres propiedades elásticas aportándole fragilidad.

Las ventajas de este tipo de conducciones son ligeras, resistentes a la corrosión y al ataque químico, tienen poca rugosidad y son económicas. También son tubos con gran elasticidad y permiten una deformación plástica a altas temperaturas.

Los principales tipos de termoplásticos utilizados en la industria del agua son cloruro de polivinilo (PVC) y polietileno (PE), para tuberías de polietileno existen variantes como el de alta y baja densidad. En las Figura 1.8 y Figura 1.9 se observan tuberías y conducciones de PVC y PE respectivamente.



Figura 1.8. Tuberías y conducción de PVC.



Figura 1.9. Tubería y conducción de PE.

1.5 REVESTIMIENTO PARA TUBERÍAS RÍGIDAS Y FLEXIBLES

Para proteger las tuberías de la corrosión se encuentra una amplia variedad de revestimientos internos y externos, estos tienen ventajas y desventajas. Los tipos de revestimiento que existen son los sistemas de punturas de betún o bitumen, esmalte de alquitrán de hulla, resina epoxi, además del recubrimiento mortero de cemento y polietileno.

El revestimiento puede influir en el resultado de las investigaciones de sobrepresión en un número de aspectos. Por ejemplo, revestimiento de tuberías determina hasta cierto punto la resistencia al flujo experimentada y por lo tanto la relación de las pérdidas de carga para el sistema. Además, la resistencia

CAPÍTULO 1

del revestimiento puede reducir presiones admisibles, por ejemplo donde se utiliza un revestimiento de mortero de cemento.

1.5.1 Sistemas de pintura

La protección contra la corrosión en tuberías debe entenderse como un conjunto de medidas complementarias entre sí, se debe contar con recubrimientos de tubería funcionales tanto para uso interno como externo. Ambos tipos de protección son complementarios, formando un sistema integral de protección contra la corrosión.

Los sistemas de pintura pueden controlar la corrosión causada por el agua salada, el agua residual, el ambiente petroquímico y otros ambientes rigurosos, también pueden minimizar los daños durante la fabricación, transporte e instalación. En la Figura 1.10 se puede observar la aplicación del revestimiento externo de una tubería de acero.



Figura 1.10. Colocación de revestimiento externo a una tubería de acero.

1.5.1.1 Bitumen

El betún o bitumen es una mezcla de sustancias orgánicas altamente viscosa, negra, de alta densidad obtenida a partir de los procesos de generación del petróleo.

La pintura bituminosa es una de las mejores pinturas protectoras para evitar la oxidación del hierro, por su resistencia al agua, conservándose bien en ausencia de luz y enterradas. Previo a la aplicación de las capas definitivas de una pintura bituminosa debe ejecutarse una capa de preparación con betún fluido aplicado en frío, que penetre en los poros de la superficie a tratar y compense las desigualdades superficiales.

1.5.1.2 Esmalte de alquitrán de hulla

El alquitrán de hulla es un líquido marrón o negro de elevada viscosidad que huele a naftalina. Tiene diferentes aplicaciones, principalmente como recubrimiento o pintura especializada gracias a su resistencia a ácidos y corrosivos como el agua salada. El esmalte de alquitrán de hulla se utilizó hasta la década de 1960 como recubrimiento interior, pero su uso en la red de agua potable se suspendió por motivos de salud y de calidad de agua.

Para el revestimiento exterior existen manuales como el de AWWA C-203 para un mayor control del producto. La pintura de alquitrán de hulla se utiliza principalmente para estructuras y tuberías de acero y concreto con exposición a alta contaminación y en especial cuando están sujetas a inmersión o salpicaduras de agua y son excelentes para el exterior de ductos enterrados. También se utilizan para interiores de tanques de lastre o de almacenamiento de combustible en embarcaciones y en la industria química. Soportan temperaturas en servicios de inmersión de entre -70 °C y 60 °C, y de temperaturas entre -110 °C y 100 °C en calor seco.

1.5.1.3 Resina epoxi

Una resina epoxi o poliepóxida es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o «endurecedor». Los epoxis se usan mucho en capas de impresión, tanto para proteger de la corrosión como para mejorar la adherencia de las posteriores capas de pintura.

Las pinturas epóxicas son recubrimientos de alta resistencia a diferentes ataques, éstas son sistemas de dos componentes, ya que están constituidas en su mayoría por una parte que contiene la resina epoxi y en la otra parte el reactor o endurecedor que normalmente son a base de aminas o de poliamidas. Su secado se produce luego de la reacción química entre los 2 compuestos, después de evaporarse el disolvente.

Por su resistencia al agua, a la intemperie y a los contaminantes químicos, se usan como sistemas de protección de larga duración sobre acero estructural, y concreto. Las pinturas epóxicas presentan gran resistencia química, sin que les afecten los disolventes ni los aceites o grasas. Tienen gran resistencia a la abrasión y cuentan con excelente adherencia sobre el cemento.

Aunque presentan buena resistencia a los agentes atmosféricos, su color puede llegar a amarillarse o decolorarse debido al efecto de los rayos ultravioleta. El revestimiento de resina epóxica es más ligero que otros sistemas de revestimiento y puede ser utilizado en los cruces de tubería donde el peso es una consideración. Se pueden filtrar productos químicos en el agua potable por lo que su uso no es recomendable.

1.5.2 Mortero de cemento

El revestimiento interior del mortero de cemento para tubos de hierro y de acero dúctil y sus accesorios para servicio de agua se rige bajo la norma ISO 4179 y AWWA C104. El revestimiento de mortero de cemento también se suministra para servicio de drenaje y para otras aplicaciones distintas.

Se aplica un revestimiento a la tubería interior de mortero de cemento resistente a los sulfatos. El revestimiento interior es aplicado usando un proceso de centrifugado a alta velocidad. Usando este método se mantiene un excelente control de calidad del revestimiento interior de cemento. Después de aplicar el proceso, los revestimientos se curan en un ambiente controlado para prevenir la pérdida rápida de humedad en el mortero.

Cuando el revestimiento de mortero de cemento está sujeto a la presencia de agua muy blanda, el hidróxido de calcio, CA(OH)_2 , aparece como lechada. Estas aguas también atacan los hidratos de silicato de calcio, los que forman la mayor proporción de los hidratos de cemento. Aunque el hidrato de silicato de calcio es casi insoluble, las aguas blandas pueden hidrolizarlos regresivamente y transformarlos en sílice gel, que resulta en una superficie suave con baja resistencia mecánica.

Sin embargo, hay muy pocos países que tienen aguas lo suficientemente agresivas como para hacer necesario el uso de un sello del revestimiento. También, aguas tan agresivas pueden causar que los

metales tóxicos desprendan lechadas en las instalaciones caseras, dificultando que el agua pase los estándares de calidad requeridos para el suministro a los clientes. Entonces, los estándares de calidad del agua, que requieren de aguas más químicamente balanceadas pueden hacer que estas comunidades traten sus aguas para disminuir la necesidad del sello del revestimiento. Los revestimientos de mortero de cemento estándar se consideran adecuados para uso continuo con valores de pH entre 6 y 12.

Se trata de un material frágil que puede fallar catastróficamente. La deflexión máxima (cambio en el diámetro / diámetro original) se debe evitar por el riesgo de agrietamiento. En la Figura 1.11 se pueden observar tuberías con revestimiento interno de mortero de cemento.



Figura 1.11. Tuberías con revestimiento interno de mortero de cemento.

1.5.3 Revestimiento de polietileno o polipropileno

Las tuberías de acero, aún calientes, se sumergen en un baño de polietileno en polvo proporcionando así un revestimiento externo y un forro en una sola operación. Puede ser utilizado en las alcantarillas que llevan contenidos agresivos y también en baterías de pozos. El sistema de revestimiento con polipropileno asegura también el rendimiento a altas temperaturas.

Este sistema de revestimiento proporciona protección a los tubos en las siguientes temperaturas de operación, el revestimiento de polietileno es adecuado para temperaturas entre 40°C y 85°C y el polipropileno se utiliza para temperaturas entre -40°C y 110°C. En la Figura 1.12 se pueden observar tuberías con revestimiento externo de polietileno.



Figura 1.12. Tuberías de acero con revestimiento externo de polietileno.

1.6 SELECCIÓN DEL MATERIAL

La selección del material de la tubería deberá basarse en las especificaciones establecidas de material y estándares dimensionales. Se deberán considerar también los requerimientos de servicio, y parámetros tales como: gastos, presiones y velocidades de diseño, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, facilidad de instalación, costo de operación y mantenimiento, calidad de agua, tipo de suelo, diámetros disponibles, y vida útil. El criterio económico estará determinado por el tipo de tubería, su diámetro y el espesor (Comisión Nacional del Agua, 1997).

Se deberá tener especial atención en la línea de gradiente hidráulico, ya que mientras más cercana esté la conducción a esta línea, la presión en los tubos será menor; esta condición puede traer como consecuencia un ahorro en el costo de la tubería.

En general, se tienen ciertas recomendaciones para la selección de tuberías:

- La tubería de acero es muy resistente y se recomienda su uso cuando las presiones de diseño sean altas. Sin embargo, su costo y el de las piezas especiales son elevados y esto elevaría mucho el costo del proyecto.
- Las tuberías de asbesto-cemento son resistentes a la corrosión y ligeras. Estas requieren cuidado especial en su transporte, manejo y almacenaje. El asbesto-cemento debe considerarse para diámetros intermedios de hasta 0.6 m.
- Las tuberías de plástico son ligeras y de instalación rápida, además de ser resistentes a la corrosión y tener bajos coeficientes de rugosidad y tienen resistencia a presiones de diseño altas, se recomienda su uso para diámetros menores a 1.50 m.
- Cuando se requiera mayor resistencia a presiones o posibles asentamientos del terreno entonces se recomienda el hierro galvanizado o bien acero para diámetros mayores.

1.7 COMPONENTES DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN

1.7.1 Piezas especiales

Son elementos de unión entre los componentes de una conducción de agua, se utilizan para efectuar intersecciones de conductos, variación de diámetros, cambios de dirección, conexiones con válvulas y equipos de bombeo, etc. Este grupo es constituido por juntas, carretes, extremidades, tees, cruces, codos y reducciones, entre otros (Comisión Nacional del Agua, 1997).

1.7.1.1 Juntas

Las juntas pueden ser de varios tipos como la junta Dresser o la junta Gibault. Se utilizan para unir dos tramos de tuberías. Son utilizadas para:

- Absorber movimientos diferenciales de la tubería (ocurrencia de sismo).
- Para absorber movimientos por efectos de temperatura en la tubería.
- Para unir tuberías del mismo o de diferente material y diámetro.
- Para unir tuberías con accesorios y válvulas.

CAPÍTULO 1

1.7.1.2 Carretes

Son tramos de tubería de pequeña longitud con bridas o roscas en los extremos para facilitar la unión a otros tramos de tubería. Se fabrican de hierro fundido y acero con longitudes de 25, 50 y 75 cm.

1.7.1.3 Extremidades

Son tramos de tubería de pequeña longitud que se colocan sobre alguna descarga por medio de una brida en uno de sus extremos. Se fabrican en longitudes de 40, 50 y 75 cm. Para materiales de PVC, acero y hierro fundido.

1.7.1.4 Tees

Se utilizan para unir tres tramos de tubería, los extremos de una tee pueden ser del mismo diámetro. En el caso de que alguno de los extremos sea de diferente diámetro se le llama tee de ampliación o reducción.

1.7.1.5 Cruces

Se utilizan para unir cuatro tramos de tubería, tienen forma de cruz. Los cuatro extremos de las uniones pueden ser del mismo diámetro, dos mayores de igual diámetro o dos menores de igual diámetro. En este caso las cruces tendrían el nombre de cruz de reducción o cruz de ampliación.

1.7.1.6 Codos

Estos accesorios tienen la función de unir dos tramos de tubería del mismo diámetro en un cambio de dirección ya sea horizontal o vertical. Los codos pueden tener deflexiones de 22.5°, 45° y 90°. Se fabrican para materiales como el PVC, hierro fundido, concreto y acero.

1.7.1.7 Reducciones-Ampliaciones

Estos accesorios tienen forma cónica, se colocan en zonas de transición para unir dos tramos de tubería de diferente diámetro. Se fabrican en materiales como PVC o hierro fundido.

1.7.1.8 Coples

Son pequeños tramos de tubo que se utilizan para unir dos conductos del mismo diámetro. También son utilizados para reparación de la tubería, ellos se pueden deslizar libremente por la misma. Los coples se pueden fabricar de PVC, concreto y acero.

1.7.1.9 Niples

Son pequeños tubos de PVC, acero soldable o galvanizado que se usan para unir dos tramos de tubería por medio de rosca.

1.7.1.10 Tapones y Tapas

Estos accesorios se colocan en los extremos de un conducto con la función de evitar la salida de flujo. En materiales como el PVC, es costumbre llamarlos tapones pudiendo ser en forma de campana o de espiga. En materiales de hierro fundido, se acostumbra llamarlos tapas ciegas.

1.7.1.11 Bidas

Son accesorios usados en las uniones de tubos, ya sea de PVC, acero o fierro, su característica principal es que dicha unión se realiza por medio de tornillos colocados en los orificios que se tiene en esta pieza, esta misma puede unirse a la tubería por medio de rosca, soldadura o forjado a la misma pieza de tubería.

En la Figura 1.13 se muestran algunos ejemplos de las piezas especiales antes mencionadas.



Figura 1.13. Piezas especiales de diferentes materiales: a) Junta, b) Carrete, c) Extremidad, d) Brida, e) Codo, f) Cruce, g) Ampliación, h) Cople, i) Niple y j) Tee.

1.7.2 Válvulas

Las válvulas son aditamentos o dispositivos que realizan la función de seccionar, admitir flujo en un solo sentido, permitir el paso de aire o agua, evitar incrementos constantes y bruscos de presión, medir gasto y limpiar la conducción de impurezas.

1.7.2.1 Válvulas de seccionamiento

Permiten aislar tramos de tubería en una línea de conducción, este tipo de válvulas se utilizan para dar mantenimiento sin tener que vaciar todo el acueducto. Existe una amplia gama de válvulas de seccionamiento como las de tipo compuerta, de flotador y mariposa.

Válvulas de compuerta

Su funcionamiento se basa en un volantín con una manija y un tornillo que al girar baja o sube una compuerta que impide que pase el flujo de agua. Se usan para conducciones que manejan altas presiones. En la Figura 1.14 se muestran una válvula de compuerta.

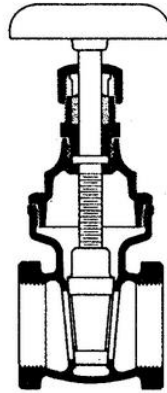


Figura 1.14. Válvula de compuerta.

Este tipo de válvulas se recomiendan para servicio con apertura total o cierre total, sin estrangulación. No se recomienda para su uso frecuente. Además tienen cierre hermético y son de bajo costo. Se pueden encontrar en diferentes materiales como bronce, hierro fundido, hierro dúctil, acero y PVC.

Válvulas de esfera o globo

Una válvula de globo es de vueltas múltiples, en la cual el cierre se logra por medio de un disco o tapón que sierra o corta el paso del fluido en un asiento que suele estar paralelo con la circulación en la tubería. En la Figura 1.15 se puede observar un ejemplo de una válvula de globo.

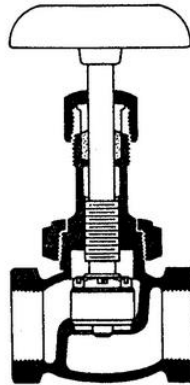


Figura 1.15. Válvula de globo.

Este tipo de válvulas se recomiendan para estrangulación o regulación de circulación y son de accionamiento frecuente. Además tienen una estrangulación eficiente con estiramiento o erosión mínimos del disco o asiento y se necesitan pocas vueltas para accionarlas, lo cual reduce el tiempo y desgaste en el vástago y el bonete. Se pueden encontrar en diferentes materiales como bronce, hierro fundido, hierro dúctil y acero.

Válvulas de Mariposa

Su funcionamiento es más simple, se basa en una perilla que al girarla para cerrar el paso del agua, es de $\frac{1}{4}$ de vuelta y controla la circulación por medio de un disco circular, con el eje de su orificio en ángulos rectos con el sentido de la circulación. Se utilizan para conducciones que trabajan a bajas presiones. En la Figura 1.16 se muestra un ejemplo de válvula de mariposa.



Figura 1.16. Válvula de mariposa.

Este tipo de válvulas se recomiendan para estrangulación o regulación de circulación y son de accionamiento frecuente. Además tienen una estrangulación eficiente con estiramiento o erosión mínimos del disco o asiento y se necesitan pocas vueltas para accionarlas, lo cual reduce el tiempo y desgaste en el vástago y el bonete. Disponible con orificios múltiples. Se puede encontrar en diferentes materiales como bronce, hierro fundido, hierro dúctil y acero.

Válvulas de diafragma

Las válvulas de diafragma son de vueltas múltiples y efectúan el cierre por medio de un diafragma flexible sujeto a un compresor. Cuando el vástago de la válvula hace descender el compresor, el diafragma produce sellamiento y corta la circulación (ver Figura 1.17).

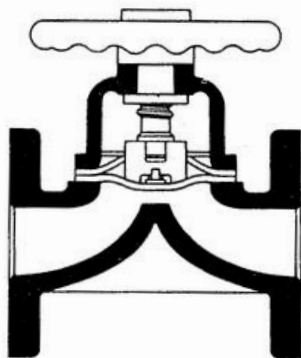


Figura 1.17. Válvula de diafragma.

Este tipo de válvulas se recomiendan para servicio con apertura total o cierre total. También se puede utilizar para servicio de estrangulación. Se puede usar con bajas presiones de operación. Es inmune a los problemas de obstrucción, corrosión o formación de gomas en los productos que circulan.

Válvulas de bola

Las válvulas de bola son de $\frac{1}{4}$ de vuelta, en las cuales una bola taladrada gira entre asientos elásticos, lo cual permite la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando se gira la bola 90° y cierra el conducto (ver Figura 1.18).

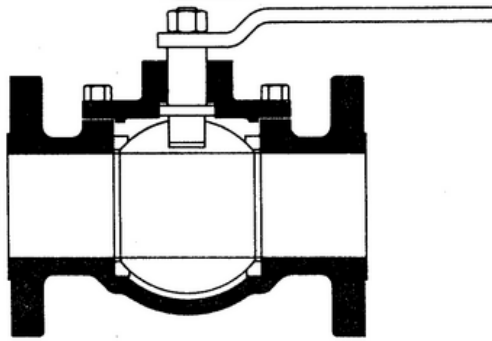


Figura 1.18. Válvula de bola.

Este tipo de válvulas se recomiendan para servicio de conducción y corte, sin estrangulación. También es confiable cuando se requiere apertura rápida. Requiere poco mantenimiento. Es propensa a la cavitación y susceptible al desgaste de sellos o empaquetaduras. Se puede encontrar en diferentes materiales como bronce, hierro fundido, hierro dúctil, aluminio, acero, PVC y PE.

Válvulas de Retención (Check) y de Desahogo (Alivio)

Hay dos categorías de válvulas y son para servicio general: válvulas de retención (check) y válvulas de desahogo (alivio). Al contrario de los otros tipos descritos, son válvulas de accionamiento automático, funcionan sin controles externos y dependen para su funcionamiento de sentido de circulación o de las presiones en el sistema de tubería.

Válvula de retención (Check)

La válvula de retención está destinada a impedir una inversión de la circulación. La circulación del líquido en el sentido deseado abre la válvula; al invertirse la circulación, se cierra. Hay tres tipos básicos de válvulas de retención: 1) válvulas de retención de columpio, 2) de elevación (ver Figura 1.19) y 3) de mariposa.

Éste tipo de válvulas son comúnmente utilizadas en el caso donde ocurre una suspensión en el suministro de energía eléctrica, sea programado o imprevisto, esto provoca un paro en el trabajo realizado por los sistemas de bombeo y ocasiona que el flujo de la masa de agua descienda presentándose fenómenos transitorios que actúan en contra de dicho equipo produciendo daños severos a éste.

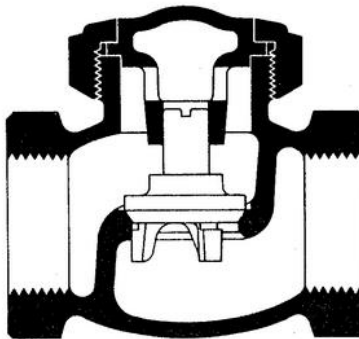


Figura 1.19. Válvula de retención (tipo de elevación).

Válvulas de desahogo (Alivio)

Una válvula de desahogo (ver Figura 1.20) es de acción automática para tener regulación automática de la presión. Este tipo de válvula descarga la presión excesiva ocasionada por gases o líquidos comprimibles, abriéndose con rapidez con un "salto" para regular la presión.

El tamaño de las válvulas de desahogo es muy importante y se determina mediante fórmulas específicas.

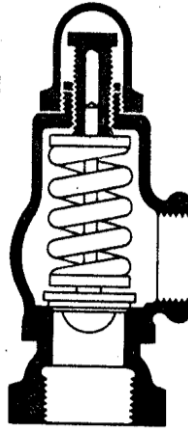


Figura 1.20. Válvula de desahogo (alivio).

Este tipo de válvulas se recomiendan en sistemas en donde se necesita una gama predeterminada de presiones. Son válvulas de bajo costo. Se pueden encontrar en diferentes materiales como bronce, hierro fundido, hierro dúctil, aluminio y acero.

1.7.2.2 Válvulas de aire

La función de las válvulas de aire es expulsar y/o admitir el aire automáticamente sin asistencia del personal de operación. Existen muchos fabricantes que ofrecen una amplia gama de válvulas para un amplio intervalo de aplicaciones.

Su mal funcionamiento o su falla total pueden llevar a la acumulación de aire, ya que las válvulas no serán capaces de interceptarlo y expulsarlo. Por tanto, es muy importante el correcto dimensionamiento y la colocación adecuada de las válvulas a todo lo largo de las conducciones. Esto también permitirá que las válvulas funcionen adecuadamente durante los transitorios, evitando así problemas relacionados con la separación de la columna líquida (Pozos, et al., 2012).

Por lo general las válvulas de aire se dividen en tres tipos:

- válvulas de admisión y expulsión de aire
- válvulas de expulsión de aire
- válvulas combinadas.

Válvula de Admisión y Expulsión de Aire (VAEA)

Estas válvulas se usan para expulsar el aire durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo y al llenar la conducción. La evacuación del aire se debe hacer lentamente para evitar el golpe de ariete o algún otro fenómeno transitorio. Por otra parte, las VAEA admiten grandes volúmenes de aire, para evitar posibles daños a las tuberías que pueden ocurrir por separación de columna o al drenar la línea.

Al ser removido el aire de la línea, el agua eleva el flotador de la válvula para sellar el orificio. La velocidad de expulsión del aire es función de la presión ejercida hacia el centro del orificio de la válvula.

Durante el paro de los equipos de bombeo, vaciado de la línea, ruptura de tubos o separación de la columna líquida, el flotador de la VAEA permitirá la entrada de aire a la tubería, para prevenir una presión de vacío y así proteger al acueducto de un colapso.

Debido a que el tamaño de la válvula dicta el grado de vacío, su correcto dimensionamiento es muy importante.

Después de las situaciones antes mencionadas, el aire será removido para que el acueducto vuelva a su estado normal de funcionamiento. El flotador va a sellar el orificio de la VAEA. Sin embargo, bajo condiciones normales de operación el aire acumulado en los acueductos no va a ser expulsado. Para este propósito se necesitan las válvulas expulsoras de aire (VEA). En la Figura 1.21 se muestra el esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire.

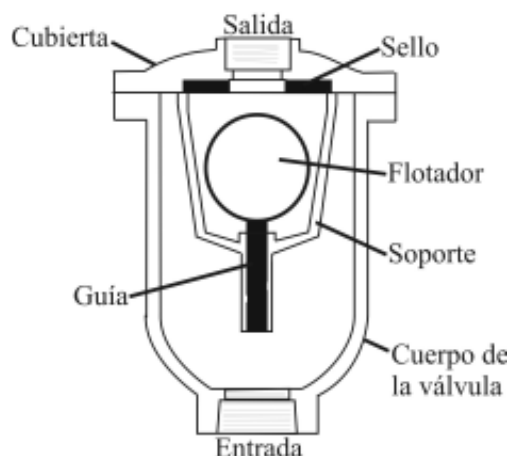


Figura 1.21. Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA) (Pozos, et al., 2012).

Válvulas de Expulsión de Aire (VEA)

Las válvulas de expulsión de aire tienen un pequeño orificio para expulsar a la atmósfera el aire acumulado en los puntos altos de los acueductos, mientras estos operan normalmente. Las VEA tienen un flotador hidromecánico que detecta la presencia del aire en las líneas de conducción, y permite su expulsión cuando estas trabajan a presiones mayores que la atmosférica.

Durante la operación de un acueducto, pequeñas cantidades de aire se introducen en el cuerpo de la VEA (ver Figura 1.22). Este aire va a desplazar el mismo volumen de líquido dentro de la válvula, produciendo que el flotador se mueva hacia abajo para permitir la expulsión del aire que, cuando es removido, hace que el flotador regrese a su posición original, moviendo el tapón para que este selle el orificio de la válvula. Este proceso se repite si una nueva cantidad de aire se concentra en la VEA.

Las VEA tienen una capacidad limitada para expulsar y admitir aire, por tanto, este tipo de válvulas no es recomendable para evacuar grandes cantidades de aire durante el llenado de acueductos de grandes diámetros, ni para la protección contra presiones menores que la atmosférica, porque su orificio es muy pequeño, generalmente menor de 1.27 cm. Para este propósito es necesario utilizar una válvula combinada. La Figura 1.22 presenta un esquema de válvula de expulsión de aire.

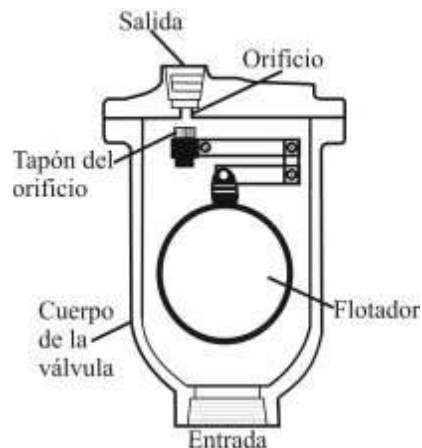


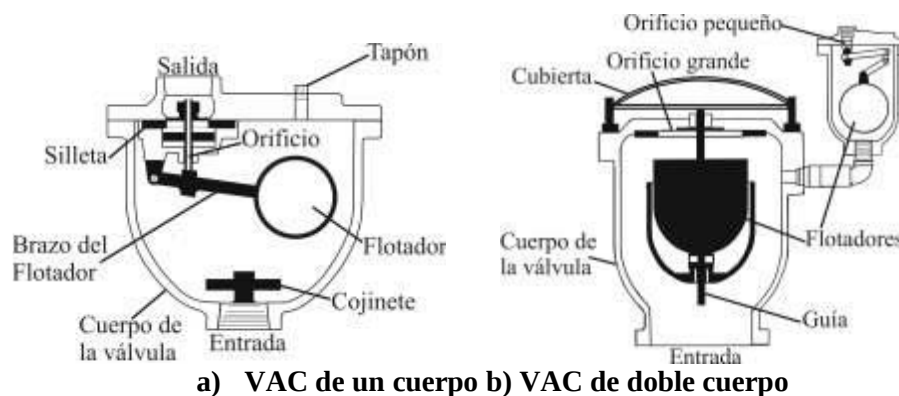
Figura 1.22. Válvula de expulsión de aire (VEA) (Pozos, et al., 2012).

Válvulas de Aire Combinadas (VAC)

Las válvulas de aire combinadas o de doble orificio cuentan con un orificio grande y uno pequeño ensamblados en el mismo cuerpo de la válvula. Este tipo de dispositivos son instalados en todos los puntos altos a lo largo del acueducto, donde se requieren válvulas de expulsión para evacuar el aire acumulado, y las válvulas de admisión y expulsión son necesarias para proteger a la tubería de fallas por aplastamiento.

Generalmente, existen dos tipos de diseños de VAC disponibles en el mercado: VAC de un cuerpo y VAC de doble cuerpo. Las válvulas de un cuerpo tienen las ventajas de ser más compactas y normalmente menos costosas. Las VAC de doble cuerpo tienen la ventaja de que se puede utilizar una variedad de VEA con un amplio intervalo de orificios. Además, durante el mantenimiento, la VAEA se encuentra en operación mientras la VEA puede ser aislada para reparación. Algunos ingenieros prefieren la utilización de VAC en los acueductos, para no dejarlos desprotegidos por errores de instalación en campo o para protección en caso de que el sistema opere incorrectamente.

Los dos tipos de válvulas de aire combinadas se pueden observar en la Figura 1.23.



a) VAC de un cuerpo b) VAC de doble cuerpo

Figura 1.23. Válvulas de aire combinadas (VAC) (Pozos, et al., 2012).

1.7.3 Medios para control de transitorios

1.7.3.1 Torre de oscilación

La torre de oscilación es una estructura a menudo de forma circular en contacto con la atmósfera por la parte superior, cuyo diámetro es por lo general mayor que el de la conducción.

Para evitar los derrames de agua cuando la conducción se encuentra funcionando, la elevación de la corona de la torre de oscilación debe ser mayor al nivel del agua del punto de descarga y además al nivel piezométrico máximo en el punto de conexión con la conducción; y para impedir que salga agua cuando el gasto de la conducción es igual a cero, el nivel de la corona debe ser mayor a los niveles del agua de cualquier depósito conectado a la conducción.

La torre de oscilación es de las estructuras más confiables para el control de los transitorios, sin riesgos de funcionamiento al no tener elementos de operación (Comisión Nacional del Agua, 1997).

1.7.3.2 Tanque unidireccional

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

La elevación de la corona es menor a la carga piezométrica del punto de conexión del tanque con la conducción. Su función es aliviar fundamentalmente las depresiones causadas por un fenómeno transitorio, provocado por un paro repentino de la bomba.

Se recomienda colocar un tanque unidireccional cuando las cargas piezométricas en flujo establecido de los posibles lugares de colocación del dispositivo de control, son muy grandes y resulta inadecuado colocar una torre de oscilación demasiado alta. Dependiendo del perfil de la conducción a menudo se requieren varios tanques para controlar las depresiones de la línea. Para evitar el vaciado del tanque cuando el gasto de la conducción es igual a cero, la elevación de la corona debe ser menor al nivel mínimo del agua en los depósitos conectados a la conducción.

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

1.7.3.3 Válvulas reguladoras de presión

La válvula aliviadora de presión o contra golpe de ariete se usa para proteger al equipo de bombeo, tubería y otros accesorios de la onda de sobrepresión generada por la suspensión repentina del bombeo, o bien, en el arranque del mismo. Actúa cuando la presión dentro de la tubería es mayor a la prevista para trabajar normalmente, una vez que sobrepasa dicha presión el flujo es liberado a la atmósfera.

La válvula está constituida por un pistón que regula el funcionamiento de dicha válvula y que trabaja con una presión establecida por un dispositivo piloto que se controla por una válvula de aguja de precisión para pequeños flujos. Sus dimensiones se determinan en función del gasto de la tubería a la que está conectada.

Su ubicación se recomienda después del múltiple de descarga de la bomba entre la check y la de seccionamiento mediante una tee de hierro fundido. Se recomienda colocar este tipo de elemento, en

conducciones con diámetros pequeños, sin embargo, no debe olvidarse que las presiones negativas tendrán que resolverse con algún otro dispositivo.

1.7.3.4 Cámara de aire

La cámara de aire es un depósito conectado con la conducción, por lo general es metálica y cerrada en cuyo interior, en la parte baja contiene un volumen de agua y la superior un volumen de aire. Se coloca normalmente al nivel del terreno natural, en las cercanías de una planta de bombeo.

Se recomienda colocar para flujo establecido, cuando son muy grandes las cargas piezométricas de los posibles lugares de colocación del dispositivo de control, evitando así la colocación de una torre de oscilación demasiado alta o un tanque unidireccional muy elevado.

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

CAPÍTULO 2

2. TUBERÍAS TERMOPLÁSTICAS

2.1 INTRODUCCIÓN

La industria de los materiales plásticos se ha desarrollado por alrededor de 100 años y comenzaron a ser utilizadas hace 50 años en Europa y Norteamérica para drenaje y manejo de agua potable.

Los tubos termoplásticos tienen la más amplia gama de aplicaciones que las de otro tipo de material, ya que entre éstas existen diferentes compuestos que las hacen diferentes significativamente en sus características y usos. Actualmente, las tuberías termoplásticas han sustituido en gran medida a otros materiales con los que por años se han compuesto los acueductos en todo el mundo. Este cambio se debe, entre otras cosas, a las mejoras económicas que estos representan ya que generan un importante ahorro en los costos de instalación, mano de obra y equipo, en comparación con los materiales de tuberías tradicionales. Aunado a esto, los termoplásticos tienen el potencial de reducir los gastos de mantenimiento y tienen una mayor vida útil por lo que los tubos de plástico son un producto muy competitivo. Sus usos y aplicaciones se han extendido, así como sus diámetros, por lo que han jugado un papel importante en el crecimiento de la industria.

En el 2008 realizó una encuesta en los Estados Unidos (Fuente: Revista *Trenchless Technology*, 2010) sobre el tipo de tuberías empleadas para la construcción de sistemas de alcantarillado y agua potable, al encuestar a los usuarios se trató de obtener cuales son los materiales que se utilizan actualmente y que características son las que determinan la selección del material de la tubería.

Los resultados arrojaron que el factor más importante para seleccionar el material de la tubería fue la durabilidad de la misma con un 90% de votantes, el segundo criterio más importante fue la normatividad con la que cuenta la tubería con 85% de aceptación entre los encuestados. Los criterios menos importantes, según los usuarios, fueron el precio y la facilidad de instalación con tan sólo el 38% de respuestas.

También se obtuvieron resultados para determinar cuál es el tipo de material más utilizado por los usuarios, se encontró que el 90% de las personas encuestadas han utilizado tuberías de cloruro de polivinilo (PVC) a lo largo de su vida laboral, el 57 % ha utilizado el polietileno de alta densidad (HDPE) y sólo el 17 % fibra de vidrio. Además, el 66 % de los encuestados mencionó que el PVC es el material con el más fácil mantenimiento.

Con ayuda de estos resultados podemos observar que hasta el día de hoy, las tuberías plásticas son las más utilizadas para la realización de acueductos por tal motivo es de gran importancia para el desarrollo del presente trabajo proporcionar información precisa y confiable sobre la aplicación y las características de las tuberías termoplásticas para sistemas de agua.

En México el empleo de tuberías plásticas, ha sido limitado a aplicaciones en las cuales las exigencias de trabajo no son grandes. Sin embargo, en los últimos años se ha visto una creciente tendencia a emplear tuberías de PE y PVC en sistemas de agua potable, gas y drenaje. Las ventajas de las tuberías plásticas son las que han motivado su uso masivo y entre los factores que han favorecido su empleo en aplicaciones para drenajes, destaca la facilidad con la que son acoplados los tramos de las mismas mediante los diversos sistemas de unión que se emplean.

Debido al uso frecuente del polietileno y del cloruro de polivinilo, este trabajo se centrará principalmente en estos tipos de tubos termoplásticos. Se introducirán otros ejemplos de tubos de plástico y sus aplicaciones para proporcionar diversos usos posibles del material.

2.2 ANTECEDENTES

Tanto el polietileno (PE) y el cloruro de polivinilo (PVC) fueron producto de la segunda guerra mundial, ya que durante este periodo se desarrolló el uso de productos de plástico, en gran parte debido a la escasez de otros materiales, los esfuerzos finalmente dieron como resultado termoplásticos para el mundo moderno.

El cloruro de polivinilo (PVC) fue descubierto a finales del siglo XIX. Los científicos de la época encontraron el nuevo material plástico inusual ya que el elemento era resistente al cambio, y se concluyó que el material no podía ser fácilmente deformado o transformado en aplicaciones utilizables.

En la década de 1920, en todo el mundo y en particular en Alemania, se desarrolló lentamente el uso de PVC en su forma rígida. A mediados de los 1930s, los científicos e ingenieros alemanes desarrollaron y produjeron cantidades limitadas de tubería de PVC. Algunos tubos de PVC instalado en ese momento siguen prestando servicio satisfactorio hoy (AWWA, 2002).

Por otro lado, al trabajar con etileno a altas presiones, los químicos británicos Eric Fawcett y Reginald Gibson crearon una forma sólida de polietileno en 1935. Su primera aplicación comercial se produjo durante la Segunda Guerra Mundial, cuando los británicos lo utilizaron para aislar los cables de radar. En 1953, Karl Ziegler y Erhard Holzkamp inventaron el polietileno de alta densidad (HDPE).

El proceso incluye el uso de catalizadores y baja presión, que es la base para la formulación de muchas variedades de compuestos de polietileno. Dos años más tarde, en 1955, el HDPE se utilizó para fabricar tuberías. Por su éxito en la invención del HDPE, Ziegler fue galardonado con el Premio Nobel de Química en 1963.

2.3 PARÁMETROS DE DISEÑO EN TUBERÍAS

Los valores que realmente gobiernan el tiempo en el que trabajará eficientemente una tubería, son el esfuerzo de fluencia a la compresión y el módulo elástico, esto debido a que el esfuerzo de compresión es el de mayor magnitud y el módulo elástico junto con el momento de inercia de la sección del tubo determinan la llamada rigidez del anillo.

Cualquier discusión acerca de la vida de servicio de una tubería enterrada, no puede ignorar la calidad de su instalación y la práctica en ello. Todas las estructuras enterradas, independientemente del material, interactúan entre sí para soportar las cargas requeridas.

2.3.1 Deflexión de tuberías

La deflexión es el cambio de diámetro interior que se produce cuando se aplica una carga a un tubo flexible (ver Figura 2.1 a). Cuando las deflexiones son pequeñas, como en la mayoría de las instalaciones de tuberías, la reducción en el diámetro vertical es aproximadamente el mismo que el aumento en el diámetro horizontal. En el diseño de una tubería, la dimensión vertical es por lo general de mayor preocupación.

CAPÍTULO 2

La deflexión vertical se limita usualmente a 7.5% de la base del diámetro interior; la base del diámetro interior es el diámetro nominal con menos tolerancias de fabricación y fuera de redondez inherentes al proceso de fabricación. Este parámetro ha sido incorporado en las especificaciones de varios productos. Para obtenerlo es necesario utilizar la ecuación (2.1), conocida como la fórmula de Iowa modificada.

$$\Delta y = \frac{1000 K (D_L W_c + W_L)}{0.149 PS + 0.061 E'} \quad (2.1)$$

Donde:

Δy Deflexión (cm)

K Constante de encamado

D_L Factor de retardo de deflexión

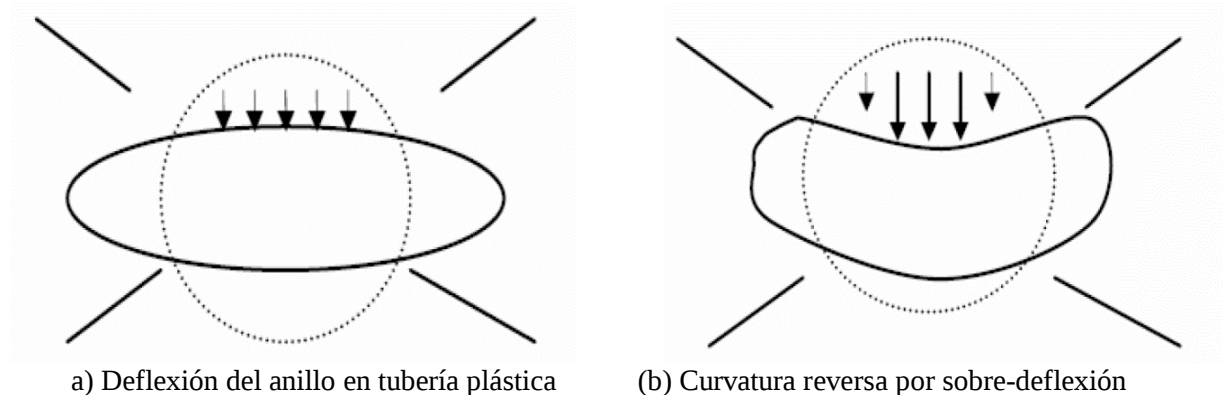
W_c Carga de la columna de material de confinamiento (kg/cm)

W_L Cargas vivas (kg/cm)

PS Rigidez de la tubería

E' Módulo de reacción del material de confinamiento (kg/cm²)

Los límites de deflexión son determinados para evitar una curvatura reversa (Figura 2.1 b), un exceso de deformación, y prevenir así el aplastamiento del tubo, ya que esto puede provocar una reducción en la capacidad del flujo en la tubería y/o fugas en las juntas. Esto se logra aumentando la rigidez de la tubería, la cual es una medición de laboratorio que determina la fuerza necesaria para flexionar una tubería flexible al 5% de su diámetro interior.



a) Deflexión del anillo en tubería plástica

(b) Curvatura reversa por sobre-deflexión

Figura 2.1. Deflexión y sobre-deflexión en tuberías plásticas.

2.3.2 Rigidez de la tubería

El diseño de una tubería depende de muchos factores, como son las propiedades del material con que es fabricada, las condiciones de instalación, las cargas externas, las condiciones de trabajo, etc. Es mediante el manejo de estos factores que se puede encontrar el diseño adecuado para las condiciones requeridas. Un elemento más que se puede manejar es la geometría de la tubería. La modificación de la geometría de una tubería es aplicada principalmente a tuberías flexibles que trabajan por gravedad, ya que al estructurar la pared de la tubería, la interacción que se presenta entre ésta y el material con que es confinada se afecta.

Como se puede observar en la ecuación (2.1), la deflexión se ve afectada por varios parámetros, de los cuales es conveniente resaltar la rigidez de la tubería PS, la cual a su vez depende de varios elementos. Este parámetro se define con la ecuación (2.2).

$$PS = \frac{F}{\Delta y} = B \frac{EI}{Dm^3} \quad (2.2)$$

Donde:

PS Rigidez de la tubería (kN/m²)

F Fuerza vertical

D_m Diámetro medio (m)

E Modulo de elasticidad de la tubería (N/m²)

I Momento de inercia de la sección transversal de la tubería (m⁴/m)

Δy Deflexión que sufre el anillo en la dirección vertical

B Constante con valor de 53.77

Como se puede observar en la ecuación (2.2), la rigidez varia directamente proporcional al momento de inercia del área transversal, por lo tanto es claro que para incrementar la rigidez de una tubería cuyo módulo elástico es bajo como es el caso de las tuberías plásticas, se debe incrementar el momento de inercia (I) de la sección transversal de la tubería. Es por esto que se diseñan tuberías corrugadas con perfil abierto y/o cerrado las cuales, proporcionan estructura a la pared del tubo para incrementar su rigidez. No obstante, hace más propensos a los tubos corrugados de diámetros grandes (36, 42, 48 y 60 in.) a presentar fisuras si no se asegura el confinamiento de la tubería instalada.

2.4 NORMATIVIDAD

Es importante que las empresas tengan normas para asegurar la calidad, sanidad y homogeneidad de los productos y servicios que ofrecen.

Las normas más utilizadas en hidráulica son las producidas por la ASTM (American Society for Testing and Material), AWWA (American Water Works Association), CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), además cada entidad federativa cuenta con legislaciones propias, es decir, cada estado emite un reglamento de construcciones en donde se señalan las normas técnicas complementarias y demás disposiciones legales y reglamentarias aplicables a cualquier tipo de obra pública o privada.

2.4.1 Normatividad mexicana

Existen, según la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, dos tipos de normas: Las Normas Oficiales Mexicanas, llamadas Normas NOM que son de uso obligatorio en su alcance y las Normas Mexicanas, expresan una recomendación de parámetros o procedimientos, aunque, en caso de ser mencionadas como parte de una NOM como de uso obligatorio, su observancia será entonces obligatoria.

2.4.2 Normatividad internacional

Las normas internacionales son de aplicación voluntaria, se usan o no se usan en función de los objetivos de producción y mercado. Su condición de voluntarias trata de no poner condicionamientos a la innovación. Sin embargo, estas normas de aplicación voluntaria acaban convirtiéndose en normas de obligado cumplimiento cuando así lo establecen las regulaciones dictadas por las administraciones públicas, cuando lo exigen los clientes o los procesos de diseño internos o cuando se hacen imprescindibles para la operatividad entre fabricantes.

CAPÍTULO 2

Las normas se consideran voluntarias porque sirven como guía, pero en sí mismas no tienen fuerza de ley. Por ejemplo en Estados Unidos, la ASME (American society of mechanicals engineers) no puede obligar a ningún fabricante, inspector o instalador para seguir las normas ASME. Su uso es voluntario.

Las normas se hacen obligatorias cuando han sido incorporadas en un contrato comercial o en los reglamentos gubernamentales que así lo dicten.

2.4.2.1 Organismos internacionales

Algunos organismos internacionales dedicados a la elaboración de normas son los siguientes:

ISO – Organización Internacional de Normalización, www.iso.org

IEC – Comisión electrotécnica Internacional, www.iec.ch

ITU – Unión Internacional de Telecomunicaciones, www.itu.int

2.4.2.2 Organismos nacionales

Los organismos nacionales tienen diferentes comités técnicos que crean, estudian, adaptan y vigilan el cumplimiento de estos estándares, los organismos más importantes se muestran a continuación:

Aenor (España), www.aenor.es

Afnor (Francia), www.afnor.fr

Din (Alemani), www.din.de

BSI (Reino Unido), www.bsi.org.uk

ANSI (Estados Unidos), www.ansi.org

ANCE (México), www.ance.org.mx

CSA (Canadá), <http://www.csagroup.org>

2.4.2.3 Organizaciones norte americanas

Estas organizaciones son las formadas por sociedades profesionales, asociaciones industriales, etc.

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, www.ieee.org

ASTM – American Society for Testing and Materials, www.astm.org

ASME – American society or mechanicals engineers, <https://www.asme.org>

API – American Petroleum Institute, <http://www.api.org>

ASCE – American Society of Civil Engineers, <http://www.asce.org>

AWWA – American Water Works Association, <http://www.awwa.org>

AASHTO – American association of state highway and transportation officials,
<http://www.transportation.org>

NSF – The Public Health and Safety Organization, <http://www.nsf.org>

2.4.3 Normas para tuberías plásticas

Existe una gran cantidad de organismos internacionales que regulan desde los materiales con que son fabricados los elementos de una tubería, hasta las condiciones de trabajo que deben cumplir mediante normas, en las cuales se especifican pruebas que deben ser realizadas y a su vez acreditadas bajo los parámetros especificados, para asegurar que el producto tenga un buen desempeño de acuerdo a los elementos normalizados. Es debido a lo anterior, que una cantidad considerable de normas son utilizadas para estandarizar el uso de las tuberías.

2.4.3.1 Normas mexicanas

NOM-001-CONAGUA-2011

Esta norma lleva por título “Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba.” En el Artículo 5. de la norma antes descrita, se especifica que para los productos que integran los sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario, deben estar certificados ante un organismo de regulación de producto en los términos que estipula la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, y cumplir con las especificaciones establecidas en las normas mexicanas correspondientes, cuando tales normas mexicanas hayan tomado como base las normas internacionales, en caso contrario, deberán cumplir con las normas internacionales correspondientes.

Es decir, que todo material utilizado para los sistemas de conducciones de agua potable y alcantarillado que se construyan en el país deben estar normadas ya sea por estándares mexicanos (si fueron fabricadas en México) o por los estándares internacionales correspondientes. En la Tabla 2.1 se encuentran las principales NMX que se aplican a los productos de tuberías plásticas utilizadas en sistemas de agua potable.

2.4.3.2 Normas americanas

La ASTM establece la mayoría de las normas utilizadas en la fabricación de productos de tubería de plástico, ya que desarrolla y publica normas voluntarias relativas a las características y prestaciones de los materiales, productos y servicios. La Tabla 2.2 enumera principales normas de la ASTM que se aplican a los productos de tuberías termoplásticas utilizadas en sistemas de agua potable.

La AWWA publica normas para tuberías y accesorios utilizados en los sistemas de agua. Estas normas se utilizan en tuberías de gran diámetro que no están cubiertas por otras normas. La Tabla 2.3 enumera las principales normas de la AWWA que se aplican en tuberías termoplásticas utilizadas en los sistemas de agua potable.

Tabla 2.1. Normas mexicanas aplicables a tuberías plásticas de agua potable.

Aplicable	Característica de desempeño	Conducciones de Tuberías Plásticas Requerimiento	Norma Vigente
Conducciones a presión	Tubos de polietileno de alta densidad (PEAD)	Especificaciones y métodos de ensayo	NMX-E-018-CNCP-2012
	Tubos de policloruro de vinilo (PVC)	Especificaciones	NMX-E-143/1-SCFI-2002
	Tubos de polietileno (PE)	Especificaciones	NMX-E-144-1991
	Tubos de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV)	Especificaciones y métodos de ensayo	NMX-E-254/1-CNCP-2007
	Tubos de policloruro de vinilo (PVC), cédulas 40, 80 y 120	Especificaciones	NMX-E-224-CNCP-2006
	Tubos de policloruro de vinilo (PVC) sin plastificante	Especificaciones	NMX-E-145/1-SCFI-2002

	Tubos de polietileno reticulado (PE-X) para la conducción de agua fría y caliente	Especificaciones	NMX-E-228-SCFI-2003
Riego	Tubos de policloruro de vinilo (PVC) a baja presión para riego	Especificaciones	NMX-E-234-SCFI-2001
Conducciones a gravedad	Tubos de policloruro de vinilo (PVC) de pared estructurada para conducción a gravedad	Especificaciones	NMX-E-229-SCFI-1999
Uniones y conexiones	Cementos disolventes de policloruro de vinilo (PVC) para unión de tubos y conexiones de PVC	Especificaciones y métodos de ensayo	NMX-E-030-SCFI-2002
	Conexiones de policloruro de vinilo (PVC) sin plastificante con unión espiga-campana	Especificaciones	NMX-E-231-SCFI-1999

Tabla 2.2. Normas ASTM para tuberías plásticas.

Material	Especificaciones	Norma Vigente
Polibutileno PB	Tuberías de gran diámetro para tubos de PB	F809
	Accesorios de plástico para tubería de PB	F845
	Diámetros nominales para tuberías de PB	D2662
	Tuberías de PB	D2666
Polietileno PE	Accesorios de PE soldados por termofusión a tope para tubería de PE	D3261
	Tubería corrugada de PE y accesorios	F405
	Tubo de PE, cédulas 40 y 80 sobre la base de diámetro exterior	D2447
	Tubo de PE corrugado con interior suave y accesorios	F892
	Sistemas de distribución de agua fría y caliente con tubos de PE (PEX) de plástico reticulado	F877
	Tubo de plástico de PE	D2737
Policloruro de vinilo PVC	Tubos de PVC corrugado y accesorios compatibles	F800
	Accesorios de tubería de plástico de PVC, cédula 40	D2466
	Tuberías de PVC con cédulas de 40, 80, y 120	D1785
	Tubos de PVC	D2740

Material	Especificaciones	Norma Vigente
	Tubería de PVC de pared lisa y accesorios para instalaciones subterráneas	F512
	Junta tipo socket para tubería de PVC, cédula 80	D2467
	Junta tipo roscada para tubería de PVC, cédula 80	D2464

Tabla 2.3. Normas AWWA para tuberías plásticas.

Material	Especificaciones	Norma Vigente
Polibutileno PB	Tubería de PB para el servicio de agua	C902
Polietileno PE	Tubería de PE para el servicio de agua	C901
	Tubo de PE para la distribución de agua y tuberías de gran diámetro	C906
Policloruro de vinilo PVC	Tubos de PVC para la distribución de agua	C900
	Tubos de PVC para la distribución de agua para diámetros mayores	C905

2.5 MATERIALES DE TUBERÍAS TERMOPLÁSTICAS

Los plásticos son compuestos constituidos por resinas (polímeros) y aditivos. Los aditivos se utilizan para obtener efectos específicos en el material plástico durante la fabricación o el uso, acelerar el proceso, aumentar ciertas propiedades, proporcionar color, y suministrar la protección necesaria durante la fabricación y el uso. Algunos de los aditivos clave utilizados en las tuberías termoplásticas son estabilizadores térmicos, antioxidantes, pantallas de ultravioleta, lubricantes, pigmentos, modificadores de las propiedades, y rellenos.

Las tuberías y accesorios plásticos están disponibles en una amplia variedad de materiales, diseños y diámetros. Los diversos diseños ofrecen materiales con diferentes características, muchos fabricantes de tuberías de plástico ofrecen catálogos de productos y manuales que proporcionan excelente información relativa al diseño y el uso de sus materiales.

Los materiales de tuberías termoplásticas, como muchos otros materiales, se ven afectados por el desgaste, que es un término general que se utiliza para cubrir todo el rango de condiciones ambientales exteriores. Los sistemas de tuberías de plástico que están destinados para uso en exteriores deben tener una composición de materiales que proporcionen resistencia a la intemperie para las condiciones específicas involucradas. La mayoría de las tuberías termoplásticas tienen aditivos que ayudan a la absorción de los rayos ultravioleta y antitoxinas, que previenen al tubo de la degradación de la intemperie.

2.5.1 Cloruro de polivinilo (PVC)

Este plástico tiene la más amplia gama de aplicaciones en los sistemas de tuberías y su uso ha crecido más rápidamente que la de otros plásticos. El PVC tiene buena resistencia química a una gran variedad de fluidos corrosivos. Los dos tipos principales de PVC utilizados en la fabricación de tuberías y accesorios son de tipo I y tipo II (Willoughby, 2007).

Tipo I, también llamado PVC no plastificado o rígido, tiene máxima resistencia a la tensión y a la flexión, mayor módulo de elasticidad y tiene gran resistencia química. Es más frágil, sin embargo, y tiene una temperatura máxima de servicio de alrededor de 66 ° C, tiene menor expansión térmica que la del tipo II, y no soporta la combustión.

El tipo II, está modificado con hule para que sea menos rígido y más resistente, también se le llama de alto impacto, flexible, o no rígido. Tiene baja resistencia a la tensión y a la flexión, menor módulo de elasticidad, menor estabilidad al calor, y menor resistencia química que el tipo I.

Con la estabilización ultravioleta (UV), la tubería de PVC ofrece un buen servicio a largo plazo al aire libre. La capacidad del material para resistir la intemperie depende del tipo de estabilización UV y la cantidad de exposición UV.

Las mejoras realizadas a través de la investigación y la disponibilidad de las normas de los productos para usos especiales han aumentado la aceptación de PVC por diseñadores y constructores. La aplicación de más rápido crecimiento es para sistemas de agua y alcantarillado. La tubería de PVC también se utiliza para aislar el cableado (tanto eléctrico como de comunicaciones). En la Figura 2.2 se puede observar una tubería de PVC para abastecimiento de agua potable.

2.5.2 Policloruro de vinilo clorado (CPVC)

La resina básica en este plástico se hace por post-cloración de PVC. El CPVC (ver Figura 2.3) tiene esencialmente las mismas propiedades que el material PVC tipo I, pero tiene la ventaja añadida de soportar temperaturas de hasta 100°C. Aunque es adecuado para las mismas aplicaciones de tuberías de PVC como tipo I, el costo de CPVC es mayor y se restringe su uso para la trasportación de fluidos calientes. La tubería de CPVC se puede utilizar en las líneas de distribución de agua a presión de hasta 100 psi a una temperatura de 80°C. Como resultado de los rangos de presión y temperatura, la tubería de CPVC ahora sustituye a la tubería de cobre en muchas zonas de Europa y Estados Unidos.



Figura 2.2. Tubería de PVC tipo fusible.



Figura 2.3. Tubería de CPVC.

2.5.3 Polietileno (PE)

Las tuberías de PE (ver Figura 2.4) son menos fuertes y rígidas que las tuberías de PVC a temperatura ambiente. Los tubos de PE son los segundos más utilizados debido a su flexibilidad, ductilidad y resistencia. El tubo de PE tiene una resistencia mecánica relativamente baja, pero presenta una buena resistencia química, en general es conveniente para usarse a temperaturas por debajo de los 50°C. La limitación de la temperatura, sin embargo, se compensa con una buena flexibilidad para temperaturas bajo 20°C. La tubería de polietileno se clasifican en tres tipos basándose en la densidad: de baja densidad (tipo I), de densidad media (tipo II) y de alta densidad (tipo III). Los más populares son los tipos II y III. La resistencia mecánica y la resistencia química y la temperatura aumentan con la densidad, mientras que la fluencia disminuye a medida que aumenta la densidad.



Figura 2.4. Tubería de HDPE.

Al igual que el PVC, la tubería de PE cuenta con estabilización de luz ultravioleta (UV) que proporciona un buen servicio a largo plazo en sistemas al aire libre. La capacidad del PE para soportar la intemperie depende del tipo de estabilización UV y la cantidad de exposición UV.

Sus principales aplicaciones son en sistemas de irrigación, drenaje, transporte químico, la tubería de distribución de gas y sistemas de conductos eléctricos. Se muestra en la Figura 2.5 una tubería de PE utilizada como emisario submarino.



Figura 2.5. Tubería de HDPE como emisor submarino.

2.5.4 Tuberías especiales de PE

Un desarrollo relativamente nuevo en la tubería de PE y las tuberías de plástico de PE reticulado es la introducción de peso molecular ultra alto (UHMW). El UHMW PE tiene considerablemente mayor resistencia a la fisuración bajo tensión, pero es más costoso que el material de tubería PE convencional. Ofrece un margen extra de seguridad, cuando se utiliza en condiciones de presión constante en comparación con la tubería hecha de resina de bajo peso molecular. Es adecuado para ciertas aplicaciones en la industria química, donde la rotura por tensión ha sido un factor limitante para la tubería de PE convencional.

La tubería de PE reticulado, cuando se compara con tubo de PE ordinario, muestra una mayor fuerza, mayor rigidez, y resistencia mejorada a la abrasión y a la mayoría de los productos químicos y disolventes a temperaturas elevadas de hasta 95°C. El tubo reticulado de PE también tiene alta resistencia al impacto, incluso a temperaturas bajo cero. Se utiliza en sistemas demasiado severos para la tubería de PE ordinaria. Se observa en la Figura 2.6 una tubería de PE reticulada con pared interna lisa utilizada para alcantarillado.



Figura 2.6. Tubería de polietileno reticulado con pared interna lisa.

2.5.5 Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)

El plástico ABS (ver Figura 2.7) es un copolímero a partir de los tres monómeros de acrilonitrilo (al menos 15 por ciento), butadieno, y estireno. Es un plástico rígido con buena resistencia al impacto a temperaturas de -40°C y hasta 80°C . Las aplicaciones más comunes de la tubería de ABS son:

- Alcantarillado
- Acueductos de agua potable a gravedad
- Sistemas por bombeo

Al igual que otros materiales de tuberías de plástico, el ABS es de 70 % a 90 % más ligero que el acero y se puede instalar sin equipos pesados. Ofrece una excelente resistencia a la mayoría de los productos químicos y tiene una superficie interior lisa que evita la acumulación de minerales. La soldadura o roscado se pueden utilizar para la unión de los tubos de manera eficiente. La tubería de ABS también se puede conectar a otras tuberías de diferente material con acoplamientos o bridas. La tubería de ABS por lo general contiene carbono para proporcionar una protección a la luz solar, por lo tanto sin carbono, no está recomendado para uso en exteriores.

2.5.6 Polibutileno (PB)

Las tuberías de polibutileno no presentan ninguna deformación y tienen una excelente resistencia a la fisuración bajo tensión. Es flexible, y en muchos aspectos similar al tipo III del polietileno, sin embargo, la tubería de PB es más resistente. Las tuberías de plástico de polibutileno son relativamente nuevas, y hasta el momento su uso se ha limitado a la conducción de gas natural y a los sistemas de distribución de agua. Puede resistir temperaturas de 105°C a 110°C . En la Figura 2.8 se muestran tuberías de polibutileno utilizadas para la conducción de gas natural.



Figura 2.7. Tubería de ABS.



Figura 2.8. Tuberías de PB para conducciones de gas natural.

2.5.7 Polipropileno (PP)

El polipropileno (PP) es un material económico que ofrece una combinación excepcional física, química, mecánica y con propiedades térmicas que no se encuentran en otros termoplásticos (ver Figura 2.9). Comparado con el PE de alta y baja densidad, el PP tiene una resistencia menor al impacto, pero la temperatura de trabajo es superior y tiene mejor resistencia a la tensión. El PP es un material duro, resistente al calor, es un material semi- rígido ideal para la transferencia de líquidos calientes o gases. Las tuberías a base de polipropileno son también ultra ligeras y generalmente tiene mejor resistencia química que otros plásticos. El PP se utiliza en sistemas de tuberías de presión, pero su uso principal es en líneas de baja presión. El tubo de plástico de polipropileno se utiliza para los sistemas químicos de drenaje de residuos, generalmente en el transporte de fluidos ácidos, y gas natural.

Con la estabilización ultravioleta (UV), el material de tubería de PP ofrece un buen servicio a largo plazo en conducciones al aire libre. La capacidad del material para resistir la intemperie depende del tipo de estabilización UV y la cantidad de exposición a los rayos UV.

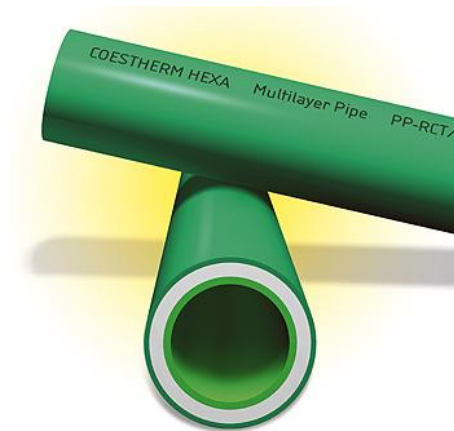


Figura 2.9. Tubería de PP.

2.6 ACCESORIOS PARA TUBERÍAS DE PLÁSTICO

Muchos de los accesorios plásticos están disponibles comercialmente y la lista continúa creciendo. Al considerar un montaje con accesorios o válvulas, los catálogos de los fabricantes son una fuente valiosa de lo que está disponible. Muchos de los fabricantes tienen sitios web y catálogos en línea de su equipo.

Los accesorios termoplásticos generalmente se moldean por inyección. Estos accesorios moldeados por lo general cuestan menos y tienen rangos de presión más altos que los accesorios fabricados. La mayoría de los accesorios de plástico se moldean en tamaños de hasta ocho pulgadas; la mayoría de 10 pulgadas y superiores se fabrican.

Las válvulas de plástico caen en las mismas categorías generales como válvulas de metal y tienen las mismas partes básicas, tales como tallos o ejes, asientos, sellos, volantes y palancas. Las válvulas de plástico son más ligeras, por lo general tienen mejor resistencia química, y tienen menos pérdida por fricción a través de la válvula. Las válvulas de plástico pueden ser especificadas para cumplir con el nivel de presión del tubo de plástico que se utiliza (Willoughby, 2007). En la Figura 2.10 se pueden observar distintos accesorios plásticos, están incluidas bridas, ampliaciones, tees, cruces, codos y válvulas.



Figura 2.10. Accesorios plásticos para tuberías.

2.7 SISTEMAS DE UNIÓN EN TUBERÍAS PLÁSTICAS

Los sistemas de unión son las piezas encargadas de lograr que una determinada cantidad de tubos se comporte como una sola tubería y que ésta, a su vez, responda a las necesidades de operación propias de cada proyecto en particular. La elección del sistema de unión depende de una gran diversidad de factores internos y de condiciones externas en que operarán los sistemas de tuberías, así como de las características del fluido que van a conducir y del diámetro requerido.

Las tuberías se pueden unir mediante dos sistemas: Uniones fijas y uniones desmontables.

2.7.1 Uniones fijas

Las uniones fijas son aquellas uniones cuyos elementos de unión son imposibles de separar sin producir algún desperfecto o rotura en alguno de ellos. Las uniones fijas más comunes hoy en día son las uniones fijas soldadas por termofusión y mediante adhesivos.

2.7.1.1 Uniones por termofusión

En el procedimiento de termofusión, las superficies a unir se disponen con el fin de ser fundidas simultáneamente con un calentador de plancha; una vez fundidas se retira el calentador y se ensamblan ambas piezas manteniéndolas unidas bajo presión. Cuando el material derretido enfría y solidifica, se forma una junta monolítica y permanente. Estos procedimientos requieren de herramienta y equipo específicos según el tipo de fusión, los tamaños de la tubería y partes a ensamblar.

Entre los métodos de termofusión más usados, encontramos:

Soldadura a tope (butt fusion)

Es usada para hacer uniones de extremo a extremo entre tubos y partes de extremo liso o "raso" que tienen el mismo diámetro externo y un grosor de pared similar, como se muestra en la Figura 2.11.

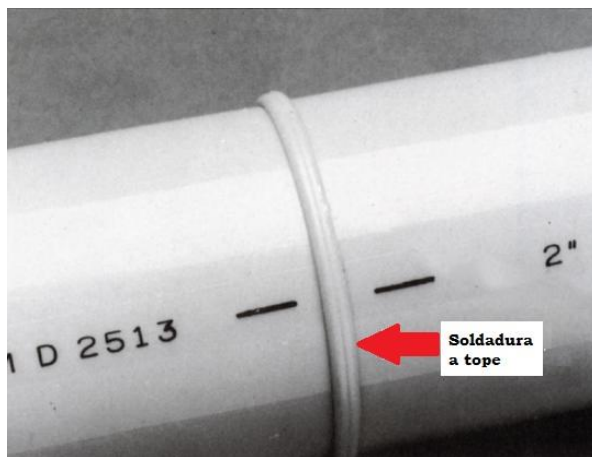


Figura 2.11. Soldadura a tope.

Soldadura tipo socket (socket fusion)

Se utiliza para unir tuberías de hasta 4 pulgadas o tubos más pequeños. Los sockets están disponibles para materiales como el PE y el PVC. En la Figura 2.12 se observa una tubería con soldadura tipo socket.

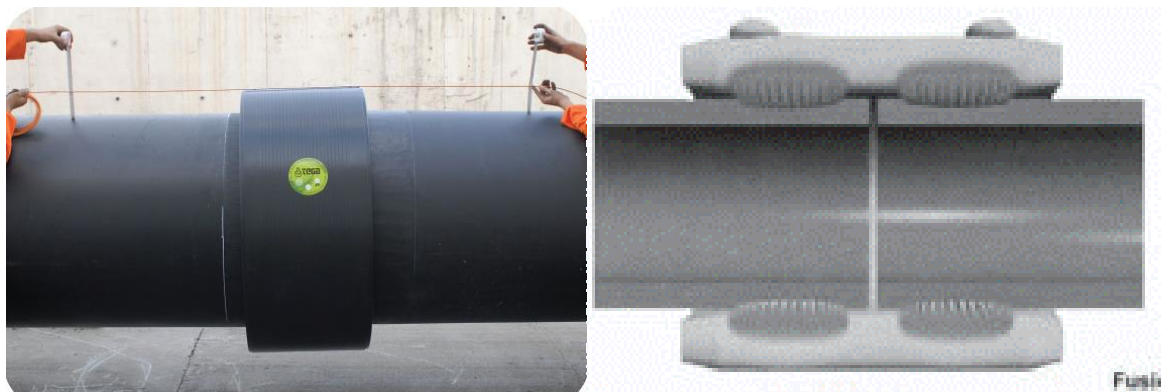


Figura 2.12. Soldadura tipo socket.

Soldadura de silleta

Se utiliza para instalar una ramificación sea en el remate o sea en el costado de un tubo principal. Los accesorios en forma de T se instalan comúnmente en el remate de la línea y las silletas se instalan a un costado de la línea. Después de que la conexión se ha enfriado, la pared del tubo principal se perfora para permitir el flujo hacia el ramal. La "Tuerca Caliente" es una fusión de silleta en una línea presurizada o "viva". Se muestra en la Figura 2.13 una soldadura tipo silleta en una tubería de PE.



Figura 2.13. Soldadura de silleta.

Soldadura por electrofusión

Consiste en la unión de tuberías y/o accesorios mediante el empleo de accesorios electrosoldables. Estos accesorios tienen incorporado en su interior un filamento eléctrico, el cual, conectado a una tensión eléctrica durante un tiempo determinado, genera un calentamiento a una temperatura que provoca su fusión y permite que los elementos al unir queden soldados. En la Figura 2.14 se observa una tubería con soldadura por electrofusión.

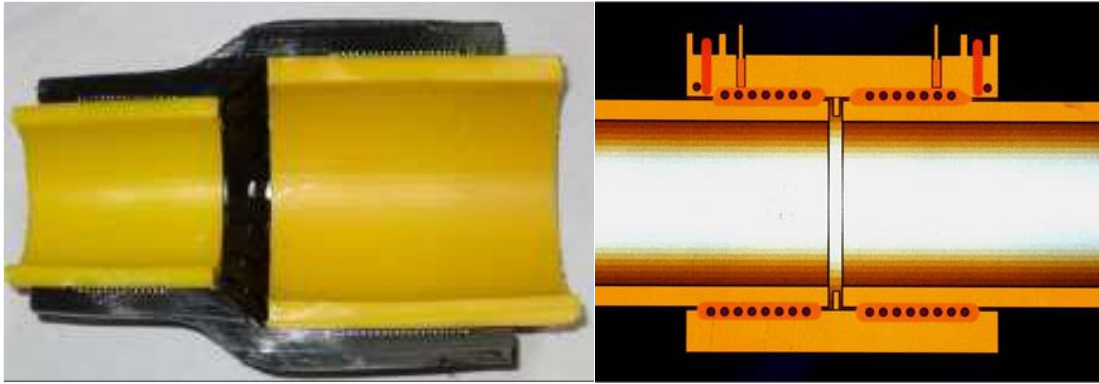


Figura 2.14. Soldadura por electrofusión.

2.7.1.2 Uniones por cementantes

Las uniones por cementantes, también llamados adhesivos, se llevan a cabo mediante la formación de una junta adhesiva entre las dos superficies o sustratos a ensamblar. Los cementantes son puentes entre las superficies de los sustratos para el mismo o distinto material.

Se pueden distinguir dos grandes grupos de adhesivos. Los cementantes prepolimerizados, es decir, aquéllos cuyo polímero ya existía antes de ser aplicado el adhesivo sobre la unión, y cementantes reactivos. Estos últimos se caracterizan porque el adhesivo en estado líquido, viscoso, gel, etc., se halla constituido por monómeros que polimerizan o se entrecruzan durante el proceso de polimerización que ocurre cuando tal adhesivo se ubica entre los sustratos a unir. En la Figura 2.15 se pueden observar latas de cementantes para PVC y ABS respectivamente.



Figura 2.15. Cementantes para tuberías de PVC y ABS.

2.7.2 Uniones desmontables

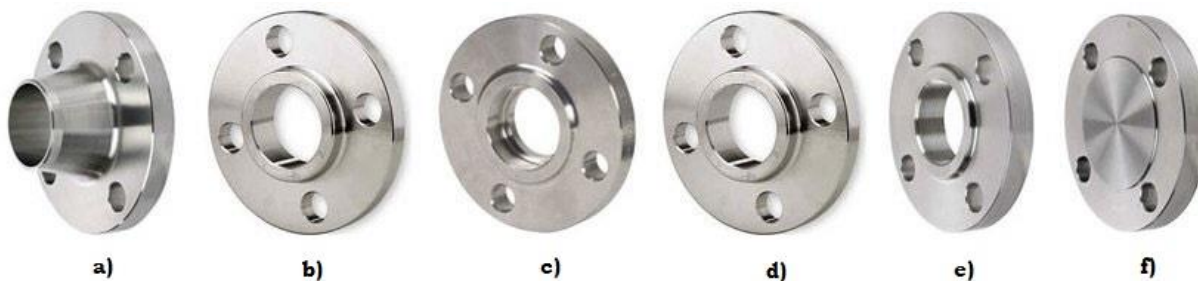
Las uniones desmontables se utilizan cuando estamos seguros que se va a realizar un desmontaje posterior de sistema de tuberías, normalmente se utilizan cuando la unión entre los dos elementos no debe soportar esfuerzos mecánicos importantes.

Las tuberías plásticas se pueden unir también con piezas especiales como juntas, abrazaderas, acoplamientos o sifones.

2.7.2.1 Unión mediante bridas

Esta unión es de tipo mecánica y consiste en anillos barrenados montados a los extremos de cada una de las piezas que se quieran unir. Existen distintas maneras para montar las bridas a los elementos a unir. También existen diferentes tipos de bridas como las mostradas en la Figura 2.16.

El material de la brida depende de la tubería sobre la cual será montada, así como de las características que se busquen en la junta. Los extremos de los tubos deben ser biselados, para adosar las bridas por medio de soldadura.



a) Brida con cuello para soldar, b) Brida deslizante, c) Brida con asiento para soldar, d) Brida para junta con solapa, e) Brida roscada y f) Brida ciega.

Figura 2.16. Tipos de bridas utilizadas comúnmente para unión de tuberías.

Las bridas montadas sobre las piezas que se desean unir son acopladas mecánicamente entre sí mediante pernos y tuercas, con lo que se logra la continuidad en el flujo. Para cumplir el parámetro de hermeticidad, este tipo de junta se auxilia de otros elementos como pueden ser empaques, los cuales son insertados entre las caras de contacto de las bridas, y al ser comprimidos por la acción mecánica de los pernos y tuercas, fluyen a la menor imperfección de maquinado en las caras de las bridas.

2.7.2.2 Unión con sistema ranurado

Al final de la tubería ranurada una junta es extendida sobre el mismo. Los segmentos de unión se colocan entonces encima de la junta y los tornillos pasadores y tuercas son apretados obteniendo como resultado una unión segura y sin fugas.

Los acoplamientos ranurados mecánicos (ver Figura 2.17) están disponibles en modelos rígidos y flexibles. Para ser considerado como rígido un acoplamiento, este debe permitir menos de un grado de desviación o de movimiento angular. Las uniones flexibles son aptas para aplicaciones tales como diseños curvos o con deflexión.

Los acoplamientos ranurados se vuelven menos flexibles a medida que aumenta el tamaño del tubo. Los diámetros mayores a 18" están muy limitados en su movimiento angular. Los acoplamientos ranurados están sujetos a presiones internas y las fuerzas de flexión durante el servicio exterior.



Figura 2.17. Acoplamiento con sistema ranurado.

2.7.2.3 Unión espiga-empaque-campana

El sistema de unión tipo espiga-empaque-campana, también llamado tipo Anger, consiste en tres elementos:

- Una campana en un extremo del tubo
- Una espiga que se desliza al interior de la campana
- Un empaque circular fabricado en un material elastomérico.

En muchos casos el empaque va montado fijamente en la espiga y se inserta el conjunto en la campana, de tal manera que la interferencia mecánica que se genera entre el empaque, la espiga y la campana induce un sello hermético.

En particular, en las juntas tipo espiga-empaque-campana, se ha observado que la fuga se presenta cuando los elementos que conforman la junta ya sea espiga o campana sufren desplazamientos perimetrales de magnitud tal que se pierde contacto entre éstas superficies y el empaque, es decir, se pierde la interferencia mecánica. Se muestra en la Figura 2.18 el sistema de unión de espiga-empaque-campana.

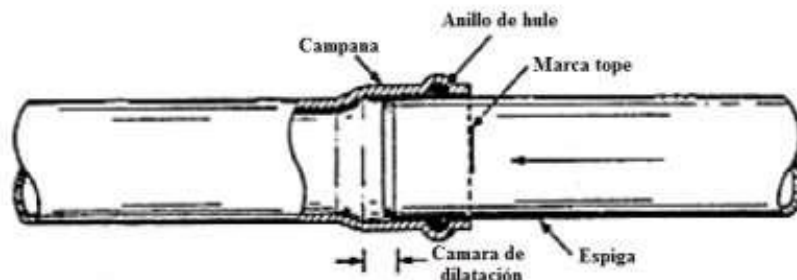


Figura 2.18. Unión tipo espiga - empaque – campana.

2.8 APLICACIONES

En los últimos 25 a 30 años, los productos de tuberías de plástico se han convertido en los materiales de tubería predominantes en muchos mercados. Como resultado de la alta demanda, la disponibilidad y tipos de productos de tubería de plástico en muchos materiales y tamaños se han incrementado significativamente.

El cloruro de polivinilo constituye la mayor parte del mercado de la tubería termoplástica; el polietileno es el segundo más popular. Los termoplásticos difieren significativamente en sus propiedades y su idoneidad dependiendo del uso. Para utilizar correctamente los materiales de tuberías termoplásticas, el usuario debe tener una buena comprensión de los diferentes materiales termoplásticos y sus aplicaciones apropiadas.

Las tuberías termoplásticas son un material popular principalmente debido a su bajo costo, facilidad de fabricación (por lo general por extrusión), y durabilidad. Esta popularidad ha aumentado la experiencia de su uso y ha ayudado a desarrollar una gran cantidad de conocimientos y datos técnicos. El aumento del conocimiento ha dado lugar a recomendaciones sobre el diseño, instalación, uso, limitaciones y propiedades de los materiales de tuberías termoplásticas. En la Tabla 2.4 se enumeran algunas de las propiedades típicas importantes y aplicaciones de los materiales de tuberías termoplásticas más populares.

Tabla 2.4. Propiedades y aplicaciones.

Material	Propiedades	Temperatura límite, °C	Método de unión	Aplicaciones
PVC	Gran resistencia a los fluidos corrosivos. Ofrece mayor rigidez y fuerza que la mayoría de los otros termoplásticos.	70	Cementante Tipo rosca Fusión térmica Tipo bridas Tipo Anger	Drenaje de desechos y respiraderos. Alcantarillado, agua potable, procesos químicos y revestimiento de pozos.
CPVC	Tiene las mismas propiedades que el PVC pero puede ser utilizado para transportar fluidos a altas temperaturas.	100	Lo mismo que el PVC	Usos principalmente a altas temperaturas.
PE	Ofrece una relativamente baja fuerza mecánica pero tienen una buena resistencia química y es flexible a altas temperaturas.	60	Fusión térmica Tipo Anger	Agua potable, irrigación, aspersión, emisarios submarinos, transporte de corrosivos, distribución de gas y conducciones eléctricas.
ABS	Ésta tubería es rígida y tiene resistencia al alto impacto bajo temperaturas de hasta - 40°C.	70	Cementante Tipo rosca Dispositivos de cierre mecánico	Drenaje de desechos y respiraderos. Alcantarillado, agua potable y plantas de tratamiento
PP	Tiene muy buenas propiedades a altas temperaturas y tiene excelente resistencia química.	90	Tipo rosca Fusión térmica	Desechos químicos, gas natural y transporte del petróleo.

2.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TUBERÍAS PLÁSTICAS

2.9.1 Ventajas

Las tuberías de plástico varían mucho en sus características y propiedades. Estas diferencias benefician al consumidor a través de un diseño adecuado, cada materia prima de plástico puede ser utilizada y controlada por normas, ya que existe un mercado competitivo dentro de la industria de tubos de plástico.

Los tubos de plástico están diseñados y seleccionados para satisfacer los requisitos de la aplicación para la que se van a utilizar. Cuando se utilizan en sistemas de tuberías, los materiales de plástico deben resistir fuertes tensiones. Los fabricantes de tubos de plástico prueban sus productos para corto y largo plazo. Estas pruebas proporcionan al usuario la información requerida en la selección de un material para una aplicación particular.

Los productos termoplásticos son soluciones rentables para una gran variedad de tuberías y ofrecen muchas ventajas en comparación con los materiales de las tuberías de metal tradicionales. Algunas de estas características han estimulado la aceptación generalizada de las tuberías plásticas. Muchas de sus aplicaciones son las siguientes:

2.9.1.1 Resistencia a la corrosión

La pared lisa del tubo de plástico hace que el transporte de los desechos y el agua sean de manera más eficiente y eficaz. Las tuberías termoplásticas no se oxidan ni se corroen, y resisten a los ataques químicos de los suelos corrosivos. Los tubos de PVC, PE, y PP están diseñados para una vida útil superior a los 50 años.

2.9.1.2 Flexibilidad

La mayoría de los materiales de las tuberías termoplásticas son flexibles, lo cual es una característica importante para aplicaciones subterráneas. Su flexibilidad le permite su perfecta adaptación al terreno absorbiendo pequeños asentamientos diferenciales.

El tubo puede seguir los contornos y las transiciones naturales alrededor de obstáculos, lo que reduce el número de accesorios necesarios en la mayoría de aplicaciones de tuberías. Debido a sus excelentes características de flexibilidad, los materiales de tuberías de plástico funcionan bien en condiciones climáticas adversas.

2.9.1.3 Inocuidad

Las tuberías plásticas son inocuas, no transmitiendo al agua ningún olor, color o sabor. Su empleo para conducción de agua potable está autorizado por todas las administraciones públicas y demás organismos sanitarios competentes.

2.9.1.4 Facilidad de manejo

Los materiales de tuberías plásticas son mucho más ligeros que la mayoría de los otros materiales de tubería y por lo tanto no requieren de equipos de manipulación pesada. Las tuberías plásticas tienen una densidad muy inferior a las tuberías de materiales tradicionales.

El corte, la unión, el transporte, el acarreo y la instalación de tuberías de plástico son mucho más simples que los mismos procedimientos para otros materiales especialmente para diámetros inferiores a 1000 mm, por lo que no es necesario el empleo de medios auxiliares. Al ritmo de trabajo de hoy, el aumento de la productividad es vital para el costo de todo el sistema.

En la Tabla 2.5 se presenta la densidad típica de algunos materiales usados en la fabricación de tuberías.

Tabla 2.5. Densidad de algunos materiales.

Material	Densidad g/cm³
PP	0.90
PE	0.95
PVC	1.40
Poliéster	1.95
Concreto	2.3
Hierro	7.05
Acero	7.85

2.9.1.5 Variedad de métodos de unión

Muchos métodos de unión están disponibles para tubos de plástico. Puede ser roscado, con bridas, cementado, fusionado al calor y compresión equipada. Los muchos métodos de unión hacen del tubo de plástico adaptable a la mayoría de las aplicaciones de campo.

2.9.1.6 Bajo costo

Las redes de tuberías plásticas instaladas son de fácil mantenimiento y reparación, debido a la gran gama de accesorios existentes y a su simplicidad de manipulación, permitiendo realizar operaciones de una forma rápida y segura.

Mantienen sus características hidráulicas prácticamente iguales en toda su vida útil, superior a 50 años, sin pérdidas significativas de capacidad de transporte, debido a su baja rugosidad y a la ausencia de incrustaciones en sus paredes.

2.9.1.7 Excelente sistema hidráulico

La superficie interior sumamente lisa de las tuberías plásticas (menor rugosidad interna) junto con la ausencia de incrustaciones en estos materiales permitiendo una reducción de las pérdidas de carga, y por lo tanto, a igualdad de diámetro interior, un mayor caudal transportable con la misma energía.

Es de destacar, además, que debido a su menor adherencia, permiten que la sección hidráulica del tubo se mantenga constante a lo largo de toda su vida útil.

Durante la circulación del agua (u otro fluido) se producen rozamientos entre las partículas de ésta y las paredes interiores de la tubería. Este rozamiento está definido por su coeficiente λ , depende de la rugosidad interior de la tubería. La rugosidad absoluta K es la máxima de las asperezas de su superficie interior.

Se adjunta una tabla comparativa de los valores de rugosidad absoluta para distintos tipos de tuberías (ver Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Rugosidad absoluta de algunos materiales

Material	k (mm)
PVC, PE, PP	0.007
PRFV	0.0015
Acero	0.09
Hierro	0.15
Cemento	0.40

2.9.1.8 Durabilidad

La vida de servicio de cualquier material de la tubería es importante. Millones de instalaciones de tuberías plásticas han estado en servicio durante más de un cuarto de siglo y siguen funcionando bien. En la mayoría de las condiciones, no hay fin en la vida de un sistema de tuberías de plástico.

2.9.1.9 Menor efecto de golpe de ariete

En los tubos de materiales plásticos la celeridad de onda "a" es más pequeña y en consecuencia los efectos del golpe de ariete son del orden de 2 o 3 veces menores que en los restantes materiales, se muestra en la Tabla 2.7 el valor de la celeridad de onda para diferentes tipos de tubos de DN 500 mm.

Tabla 2.7. Valores de celeridad de algunos materiales

Material	Espesor (mm)	a (m/s)
Fundición	9	1100
Acero	5	1011
Concreto	40	1044
PVC	24	363
PE	24	214
PRFV	7	492

2.9.1.10 Beneficios ambientales

El ahorro energético de fabricación de los tubos plásticos es superior a los de materiales tradicionales. Un tubo plástico requiere menos energía para ser fabricado que otro tipo de tubería, incluyendo en esta consideración la extracción, importación de crudos de petróleo y subsiguiente refinación para la obtención de la materia prima, contribuyendo al ahorro energético, en magnitudes importantes.

Los kilos equivalentes de petróleo utilizados para la fabricación de 100 metros de tubería de 110 mm de diámetro son:

Hierro:	1970 Kg Equivalente de petróleo
Policloruro de vinilo (PVC):	154 Kg Equivalente de petróleo

Según un estudio del organismo austriaco GUA, que analiza el consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero de plásticos y materiales alternativos en distintas aplicaciones, el ahorro de energía de la tubería plástica en todo su ciclo de vida con respecto a la de materiales tradicionales es de un 32%. Tratándose de tubería plástica para gas, el ahorro alcanza el 70% y en el caso de tuberías para saneamiento el 14%. Las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen en un 61% en promedio para todas las aplicaciones cuando las tuberías son plásticas (Mora Rodríguez, 2011).

2.9.2 Desventajas

Las limitaciones principales de los termoplásticos provienen de su relativamente baja resistencia mecánica y rigidez, además de su sensibilidad a las altas y bajas temperaturas. También cuentan con altos coeficientes de expansión térmica. Debido a estas limitaciones, los materiales de tuberías termoplásticas se han utilizado principalmente en aplicaciones a pequeñas presiones con temperatura bajas. Incluso con estas restricciones, los materiales termoplásticos cumplen los requisitos de diseño para una amplia gama de aplicaciones.

CAPÍTULO 3

3. MODOS Y MECANISMOS DE FALLA

3.1 INTRODUCCIÓN

La *falla* es una condición no deseada que hace que la tubería no desempeñe la función para la cual existe. Una falla no necesariamente produce colapso o catástrofe, sin embargo, dependiendo del tipo de falla, puede llegar a causar pérdidas económicas importantes e impactos sociales donde las poblaciones son las más vulnerables al prescindir de los servicios que se proporcionaban antes de que ocurriera una falla.

Un factor fundamental para que se presenten fallas en las conducciones es el tiempo de servicio de las mismas. Las tuberías de hierro fundido fueron usadas desde principios del siglo pasado hasta que las tuberías de hierro dúctil se introdujeron entre la década de los sesentas y setentas. Las tuberías de fibrocemento han sido instaladas de manera considerable en América, Europa y Australia desde finales de la década de los veinte hasta principios de los ochentas, y continúan siendo un componente significativo de las redes de distribución de muchas ciudades. Posteriormente, las tuberías de hierro dúctil y de PVC comenzaron a entrar en el mercado y a ser mayoritariamente usadas. En la década de los noventas el polietileno de media densidad (MDPE) y HDPE fueron los materiales alternativos para la renovación de conducciones (Mora Rodríguez, 2011).

El deterioro de las tuberías se clasifica en dos categorías. La primera es el deterioro estructural, donde se disminuye la resistencia y habilidades para soportar los distintos tipos de tensiones o cargas impuestos sobre ella. La segunda es el deterioro sobre la superficie interior resultando en la disminución de la capacidad hidráulica, degradación de la calidad del agua y reduciendo la resistencia elástica en caso de corrosión severa interna. Diferentes factores químicos y/o físicos pueden coincidir para originar deterioros en las conducciones, los defectos de fabricación también causan deterioro de las tuberías.

Los factores químicos que provocan corrosión interna y externa son suelos o aguas agresivos, microbios, corrientes eléctricas, gradientes de aireación y conexiones de distinto tipo de material metálico. La aparición de biopelícula es inadecuada, algunas bacterias atacan los materiales de las conducciones favoreciendo la aparición de corrosión y daños en sus componentes. Otra causa de corrosión son las aguas enriquecidas en cloruros y sulfatos, esta corrosión se puede identificar por la coloración, siempre y cuando esta coloración no provenga de la planta de tratamiento o por la acción microbiana (Mora Rodríguez, 2011).

Entre los factores físicos, se encuentran daños generados durante la instalación: el transporte, descarga y/o almacenamiento. Daños generados en la operación: cargas por hundimiento diferencial, por socavación debida a las propias fugas, por sequía, por arcillas expansivas y deslizamiento de tierra. Además de cargas puntuales, se presentan cargas internas radiales debidas a fluctuaciones en la presión del agua, cargas axiales por actividad sísmica, movimiento de suelos y transitorios hidráulicos. Por estrés térmico por diferencias de temperatura entre el agua, la tubería y el suelo. Por expansión del agua y carga de suelos en temperaturas extremadamente bajas. Daños por equipos de excavación que causan o aceleran los fallos. Daños a las capas externas o revestimiento interno que propicia la aceleración de la corrosión.

Desde 1970 numerosas investigaciones se han dedicado a evaluar la funcionalidad de las tuberías corroídas para proporcionar criterios confiables para considerar su mantenimiento, reparación o cambio.

Es importante mencionar, que a diferencia de las tuberías metálicas el mecanismo de deterioro a largo plazo de las tuberías de PVC no está bien documentado, principalmente porque estos mecanismos son típicamente más lentos.

3.2 MODOS DE FALLA

Llamamos *modo de falla* a la configuración **geométrica** que adopta el elemento estructural cuando falla. En este sentido, los modos de falla que en general pueden afectar a una tubería son los siguientes:

3.2.1 Rotura circunferencial

En la rotura circunferencial, una grieta se extiende de forma parcial o completa alrededor de la circunferencia de la tubería. Este tipo de rotura es causada por tensión longitudinal y ocurre principalmente en tuberías de hierro fundido y cobre (ver Figura 3.1).



Figura 3.1. a) Rotura circunferencial en una tubería de hierro, b) Rotura circunferencial en una tubería de cobre.

3.2.2 Rotura longitudinal

En la rotura longitudinal, una grieta se extiende a lo largo del eje de la tubería. La longitud puede variar desde unos pocos milímetros a la longitud total de la tubería. Este tipo de rotura es causada por tensión transversal (radial) y ocurre en tubos de concreto, metal y plástico, tal como se muestra en la Figura 3.2.

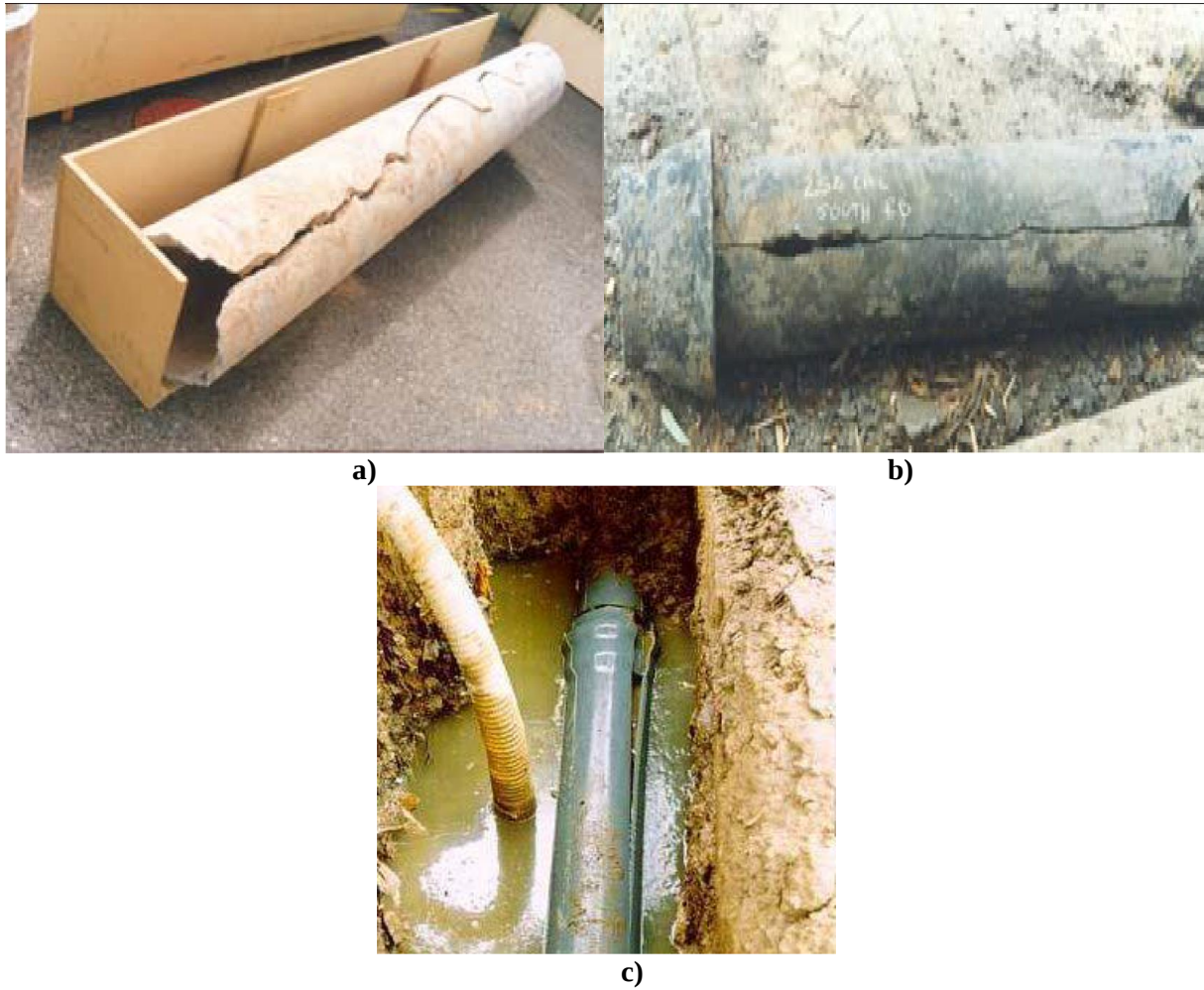


Figura 3.2. a) Rotura longitudinal en una tubería asbesto-cemento, b) Rotura longitudinal en una tubería de hierro, c) Rotura longitudinal en una tubería de PVC.

3.2.3 Perforaciones

Son pequeños agujeros por lo general menores de 10 mm², que ocurren en tubos metálicos y plásticos, ver Figura 3.3.

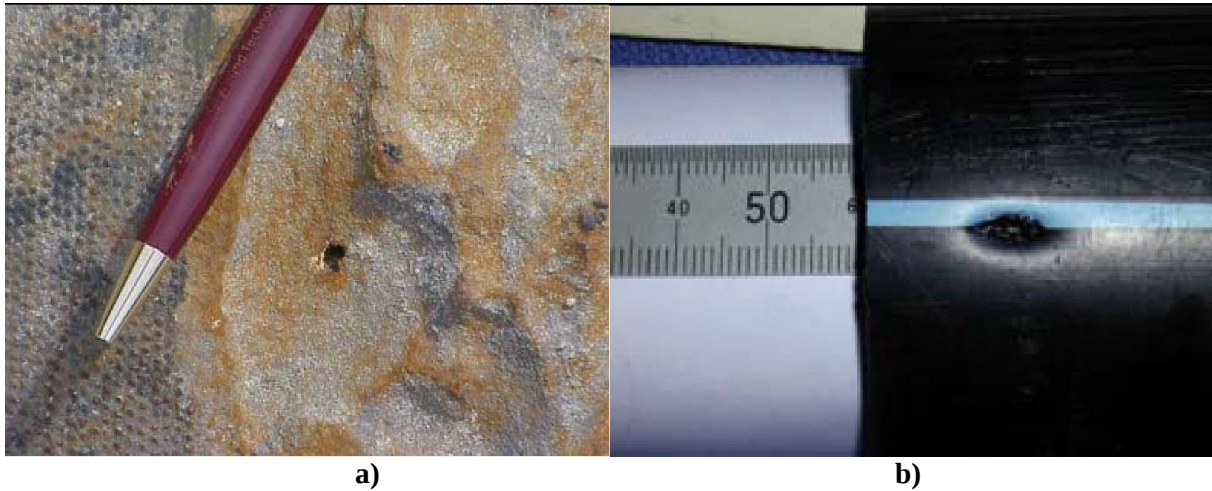


Figura 3.3. a) Perforación en una tubería de hierro dúctil, b) Perforación en una tubería de polietileno.

3.2.4 Voladuras

La voladura es el desprendimiento de un trozo de pared de la tubería. El tamaño puede variar en función del material, pero en general es mayor a 100 cm². Este tipo de falla puede ocurrir en tubos plásticos y de metal, como se muestra en la Figura 3.4



Figura 3.4. a) Voladura en una tubería de PVC, b) Voladura en una tubería de hierro dúctil.

3.2.5 Desgarre

Un desgarre es una rotura en la pared del tubo donde se crea una abertura sin desprenderse totalmente el material. Esto ocurre en tubos de acero, así como en aquellos de materiales compuestos como los tubos de poliéster con refuerzo de fibra de vidrio, tal como se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5. a) Desgarre en una tubería de políester reforzado con fibra de vidrio, b) Desgarre en una tubería de acero.

3.2.6 Roturas en la unión

Es una rotura que se presenta en la unión de la tubería y es causada por tensión transversal en la junta de la tubería.

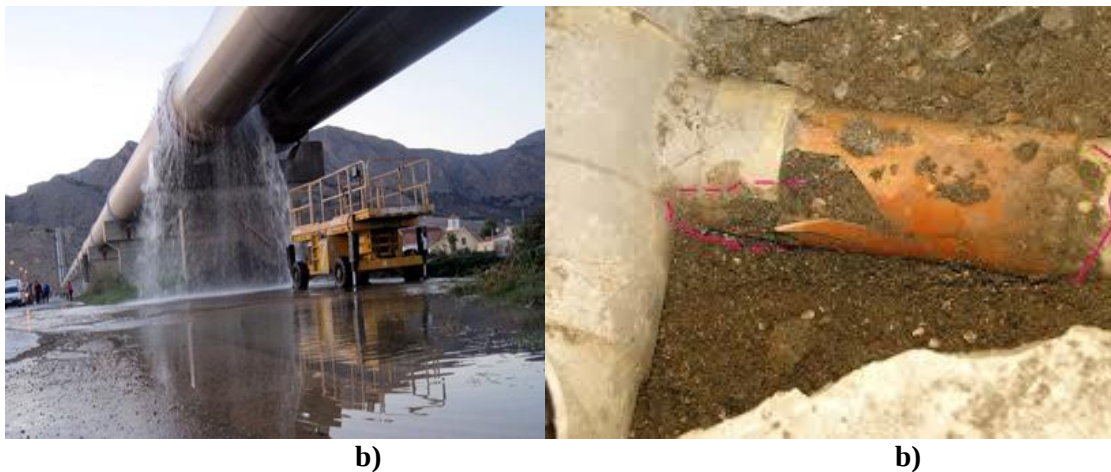


Figura 3.6. a) Rotura en la unión de una tubería de acero, b) Rotura en la unión de una tubería de PVC.

3.3 MECANISMOS DE FALLA

Llamamos *mecanismo de falla* al proceso o secuencia responsable del evento o condición de falla. Puede haber un mecanismo de falla o varios que se acoplan. Para que se genere una falla en la tubería se consideran tres aspectos principales:

- Propiedad estructural, en el que se incluye tipo de material, interacción entre el suelo y la tubería, la calidad de la instalación y la calidad de la fabricación.
- Cargas internas y externas; debidas a la presión de operación y a sobrecargas del suelo, transitorios hidráulicos, y por injerencia de terceros.
- Deterioro del material debido en gran parte a factores químicos internos y externos, ambientes bioquímicos y electroquímicos.

3.3.1 Transitorios hidráulicos

En esta tesis se presenta un caso de estudio de un acueducto, en el cual ocurrieron 20 roturas entre los años 2011 y 2013. La hipótesis que se maneja, es que los mecanismos de falla que generaron las fracturas en los tubos fueron los transitorios hidráulicos. Por lo tanto, este mecanismo es el único que se describe con detalle en esta tesis.

Habitualmente en el análisis y el diseño de los acueductos se considera su comportamiento en condiciones estacionarias donde las magnitudes hidráulicas del sistema (gastos y presiones) permanecen constantes en el tiempo, al ser también invariables las condiciones de funcionamiento de la instalación: Condiciones de frontera (consumos y alturas de los depósitos) y el estado de sus elementos (grado de apertura de las válvulas y velocidad de giro de las turbomáquinas).

Sin embargo, la realidad de una instalación hidráulica es un sistema dinámico y jamás se halla en estado estacionario, ya que las condiciones de funcionamiento que determinan las variables hidráulicas varían en el tiempo con una mayor o menor rapidez. Debido a esto, el análisis o el diseño adecuados de una instalación pasa por conocer la respuesta temporal de las variables hidráulicas de la instalación con el fin de evitar situaciones indeseables como:

- Presiones excesivamente altas o excesivamente bajas.
- Flujo inverso.
- Movimiento y vibraciones de las tuberías.
- Velocidades excesivamente bajas.

Los resultados de estas situaciones pueden variar desde lo ligeramente inconveniente hasta lo desastroso. Ejemplos de lo primero podrían ser la interrupción momentánea del abastecimiento o una caída de la presión en los nudos de consumo y de lo segundo la falla de una estación de bombeo, un desastre medioambiental, una explosión o un incendio. El comportamiento dinámico de la instalación, denominado transitorio, es aquel que tiene lugar entre dos situaciones estacionarias de la instalación, puede estar producido por diferentes causas que suelen además determinar la naturaleza del transitorio. Dichas causas pueden ser:

- Una maniobra del operador.
- La mala selección de un componente.
- Un acontecimiento externo a la instalación.
- Problemas que se generan lentamente o de manera inadvertida.

Sobre algunas de las causas anteriores el diseñador o el operador pueden tener cierto control, como por ejemplo el arranque o parada controlados de las turbomáquinas (bombas o turbinas) y el cierre o apertura de las válvulas. Por el contrario, existen causas sobre las que no existe control alguno tales como el corte del suministro eléctrico o la rotura de una tubería. El hecho de que existan en la producción de transitorios causas de naturaleza incontrolada, no exonera a los diseñadores y operadores de prever el riesgo de que éstas puedan tener lugar y deben dotar a la instalación, en la medida de lo posible, de los elementos que eliminen o minimicen los efectos indeseados de los transitorios.

Se conoce con el nombre de “transitorios” a los fenómenos de variación de presiones en las conducciones a presión, motivadas en variaciones proporcionales en las velocidades.

Un flujo es estacionario o permanente cuando sus parámetros característicos (presión y velocidad) no varían en el tiempo. Si las condiciones del flujo varían en el tiempo, éste es no estacionario, no permanente o transitorio.

Comúnmente en los acueductos se distinguen 2 tipos de transitorios hidráulicos (Wylie, 2004):

1) Transitorio lento u oscilación de masa, que se relaciona ante todo con el movimiento de la masa de agua en la conducción, semejante a la oscilación en dos vasos comunicantes. Los cambios de las variables en este tipo de transitorio son significativos pero no tanto como para tomar en consideración las propiedades elásticas del fluido y de las tuberías. El período de un transitorio de este tipo normalmente es de varios minutos a varias horas, y es suficiente un modelo que considere solamente el movimiento y la inercia del volumen de agua en las tuberías.

La oscilación de masa representa un caso particular de transitorio rápido en que los efectos de elasticidad son pequeños, gracias a lo cual los modelos que pueden simular transitorios rápidos simulan implícitamente también este fenómeno.

2) Transitorio rápido o golpe de ariete, generado por cambios bruscos de la velocidad en la tubería derivados de maniobras rápidas como la parada repentina de una bomba o el cierre rápido de una válvula. Los cambios rápidos en la velocidad se acompañan de cambios bruscos en la presión que se propagan por la tubería, generando ondas de presión de período muy corto (apenas varios segundos). Las variaciones de presión en un transitorio de este tipo son importantes, por lo que resulta necesario considerar los efectos elásticos de la tubería y del líquido.

En los transitorios hidráulicos rápidos pueden llegar a producirse presiones muy altas o muy bajas, debido a lo cual es necesario considerarlos en el diseño de cualquier conducción.

3.3.2 Transitorios con aire atrapado

El análisis de los transitorios hidráulicos se hace generalmente asumiendo que no hay aire atrapado en los acueductos. Sin embargo, en muchos de estos sistemas el aire puede ser introducido a través de los vórtices que se forman en la succión de las bombas (entre un 5% y 10% de aire por volumen de aire). Asimismo, cuando se presenta una presión menor a la atmosférica en la línea, el aire se puede introducir por los sellos defectuosos de las juntas y las válvulas. También es sabido que el agua contiene aproximadamente un 2% de aire disuelto, si la presión baja o la temperatura se incrementa el aire escapa de la solución y puede formar pequeñas bolsas de aire que pueden migrar a los puntos altos o intermedios del acueducto, y unirse al aire que pudo haber quedado acumulado por un mal purgado de la línea.

El efecto del aire atrapado en acueductos a bombeo puede ser perjudicial o benéfico, esto dependerá de la cantidad del aire, su localización, así como de la configuración del sistema y de las causas del transitorio, (Martin, 1976) y (Martin, 1996), (Stephenson, 1997) y (Thorley, 2004) comentan que la formación de grandes bolsas de aire en los acueductos puede causar una serie de problemas. Sin embargo, éstas pueden ayudar a reducir el valor de las sobrepresiones causadas por la ocurrencia de transitorios hidráulicos.

En las décadas pasadas han sido reportados varios accidentes, debido a la rápida apertura de las válvulas al poner en marcha los equipos de bombeo. Esto se debe a que no existe un criterio práctico para remover el aire atrapado de los acueductos. Una consideración muy importante, que debe tomarse en cuenta durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo, es que el aire atrapado debe ser expulsado lentamente a través de las válvulas de aire para evitar una súbita compresión del mismo, y así evitar sobrepresiones importantes que puedan provocar la ruptura de la tubería.

(Qiu & Borrows, 1996) comentan que el volumen de las bolsas de aire localizadas en puntos altos de los acueductos es incuantificable, por lo tanto sus efectos potenciales en transitorios hidráulicos no son tomados en cuenta, ya sea en la etapa de diseño o en un análisis posterior a una falla.

En el siguiente capítulo se presenta el fenómeno conocido como propagación rápida de falla, que genera roturas en tuberías plásticas de manera súbita sin que los tubos presenten grietas o deformaciones aparentes, que permitan tomar medidas para impedir la falla de la línea.

Es importante mencionar, que tipo de fallos pueden producirse por presiones menores a las nominales que soporta la tubería, y también por sobrepresiones generadas por transitorios hidráulicos con y sin aire atrapado.

CAPÍTULO 4

4. PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA EN TUBERÍAS PLÁSTICAS

4.1 INTRODUCCIÓN

La Propagación Rápida de Falla (PRF) es un fenómeno que se produce de manera totalmente sorpresiva y progresa a muy alta velocidad, en general se produce bajo cargas normales de servicio, muchas veces inferiores a las de diseño. Por tal motivo, la propagación rápida de falla no es precedida por deformaciones macroscópicas que permitan tomar medidas para evitarla o para reducir la gravedad de sus consecuencias. Una vez iniciada la falla, la grieta se extiende a lo largo de la tubería llegando a propagarse por varios cientos de metros.

El origen de la PRF, tiene muchas razones, entre las más comunes se encuentran los transitorios hidráulicos, los diseños inefficientes, falta de calidad en la construcción de los sistemas, etc. Sin embargo, este tipo de fallas también se debe a factores ajenos al diseño del sistema como las deformaciones microscópicas formadas durante la fabricación de los tubos, estas imperfecciones pueden no ser detectadas como factores potenciales de riesgo por los fabricantes, ni por los responsables de la construcción de un acueducto, pero suelen ser clave para promover la propagación rápida de falla.

En la Figura 4.1 se observa un defecto microscópico en un tubo de PVC, que puede provocar la propagación rápida de falla (Bernal-Lara, et al., 2004).

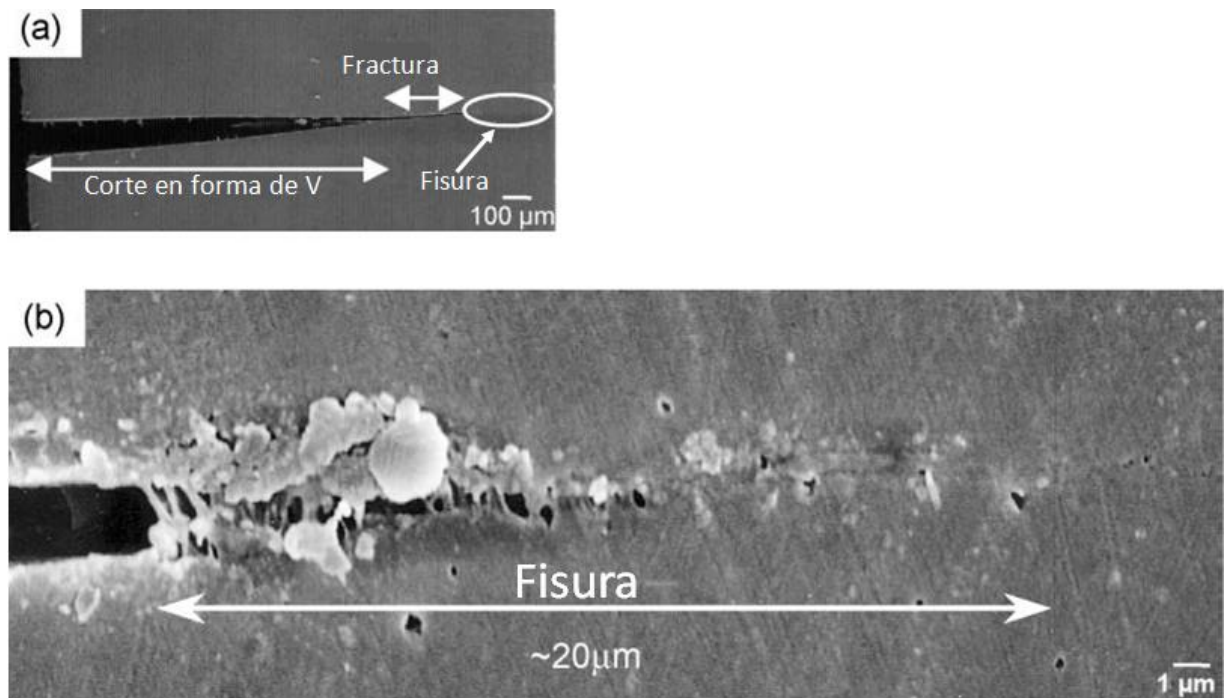


Figura 4.1. Defecto microscópico en un tubo de PVC (Bernal-Lara et al. 2004).

4.2 ANTECEDENTES

Greenshields & Leever, 1995 y Greenshields, et al., 1997 han reportado que la forma de la PRF por aire atrapado dentro de una tubería plástica tiene una apariencia senoidal, tal como se muestra en la Figura 4.2



Figura 4.2. Propagación rápida de falla en un tubo de PVC con aire atrapado (Greenshields & Leever, 1996)

Por otra parte, la propagación rápida de falla cuando la tubería está completamente llena de agua (sin aire en su interior) progresa longitudinalmente, tal como se observa en la Figura 4.3.



Figura 4.3. Propagación rápida de falla en un tubo de PVC sin aire atrapado (Greenshields & Leever, 1996).

4.3 PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

La Propagación Rápida de Falla es un fenómeno en el cual una grieta se propaga a gran velocidad en un elemento estructural. Un ejemplo de PRF es el rompimiento de placas de vidrio o del agua congelada en la superficie de los lagos. Las tuberías de hierro fundido y plástico, bajo ciertas condiciones, pueden experimentar este fenómeno. Con base en los resultados reportados en la literatura, se pueden hacer las siguientes observaciones generales sobre PRF en tuberías plásticas (Farshad, 2006).

- Bajo ciertas condiciones térmicas y de servicio, las velocidades de la PRF varían desde 70 m/s a 600 m/s. La presión crítica para que la PRF ocurra depende de la temperatura, dimensiones de la tubería, las propiedades del material, las tensiones a la que es sometida la tubería, el tiempo de servicio, las condiciones de servicio y, finalmente, las reparaciones y el mantenimiento a la que fue sometida la tubería.
- Al parecer, por debajo de la presión crítica, las grietas de la PRF desaceleran y recorren una distancia relativamente corta.
- Existe un llamado espesor crítico; es decir, un cierto límite de espesor de tubería para el cual la PRF no puede ocurrir.
- La Propagación Rápida de Falla progresa longitudinalmente. En algunas tuberías, bajo ciertas circunstancias, la grieta puede ramificarse en dos o varios caminos.
- Dependiendo de la cantidad de aire atrapado que contenga, la trayectoria de la grieta puede ser recta o de forma parecida a una senoide.

4.3.1 Casos de estudio de PRF

La Propagación Rápida de Falla, no es un modo de falla común en las tuberías plásticas, éste fenómeno ha ocurrido en casos aislados en algunos tubos plásticos utilizados para la distribución de agua y gas. El número de incidentes de PRF en tuberías termoplásticas ha sido muy bajo, sin embargo los daños ocurridos en las tuberías afectadas han sido muy importantes ya que se formaron largas grietas, llegando a inhabilitar el sistema. Este fenómeno se ha estudiado por varios años para diversos materiales de tuberías de plástico y se ha encontrado que la Propagación Rápida de Falla es más probable para diámetros de tuberías grandes y presiones internas altas (Palermo, 2010).

En Europa, la PRF se ha producido principalmente en las tuberías de hierro fundido y también en los tubos de PVC. El PVC es un material termoplástico amorfo que está por debajo de su temperatura de transición vítrea, y por lo tanto está en un estado "vítrea" o "frágil". En Estados Unidos como en Europa han ocurrido numerosas fallas del tipo PRF en tuberías de PVC. Durante la construcción de un acueducto, si el tubo de PVC es maltratado puede romperse fácilmente (Greenshields & Leever, 1996).

Por otro lado, el Polietileno es un material plástico semi-cristalino que se encuentra muy por encima de su temperatura de transición vítrea, y no es muy susceptible a la Propagación Rápida de Falla debido a su resistencia. Existen muy pocas roturas por PRF en tuberías de PE empleadas para la distribución de agua en los Estados Unidos.

En una tubería de PVC con sistema de unión espiga-campana, la Propagación Rápida de Falla se limita a una sola sección de tubería, ya que la grieta termina cuando llega a una discontinuidad, en este caso la unión, tal como se muestra en la Figura 4.4.



Figura 4.4. Rotura del tipo PRF en un tubo con unión espiga-campana.

En el mismo sentido, es importante mencionar que recientemente se han producido varios incidentes de PRF en tubos fusible de PVC que se han unido por el método de fusión. Cuando la grieta se inicia en la tubería fusible de PVC, ésta continúa viajando a través de las uniones y puede prolongarse por varios cientos de metros. En la Figura 4.5 se presenta un ejemplo de PRF en una tubería tipo fusible de PVC.



Figura 4.5. Rotura del tipo PRF en una tubería fusible de PVC.

(Palermo, 2010) presenta un importante número de casos de estudio en los Estados Unidos, donde las tuberías de PVC con unión tipo fusión a tope han fallado por Propagación Rápida de Falla. En la Tabla 4.1 se muestra un resumen de las fallas ocurridas entre 2004 y 2013.

Tabla 4.1. Resumen de fallas ocurridas en casos de estudio de Estados Unidos entre 2004 y 2013.

	Localización de la Falla	Año de la Falla	Diámetro y RD de la Tubería	Longitud de la Falla (m)	Uniones por Termofusión
1	Winter Park, FL	2004	8" RD 18	60 m	Sí
2	Danville, CA	2006	20" RD 18	120 m	Sí
3	Casselberry, FL*	2006	6" RD 18	15 m	Sí
4	Collier County, FL	2007	30" RD 25	340 m	Sí
5	Greencastle, IN	2007	10" RD 21	240 m	Sí
6	Greencastle, IN (2)	2007	10" RD 21	15 m	Sí
7	Pittsburgh, PA	2007	24" RD 25	50 m	Sí
8	Clay County, FL	2008	20" RD 18	180 m	Sí
9	Clay County, FL	2008	20" RD 18	500 m	Sí
10	Xenia, IA	2008	20" RD 18	400 m	Sí
11	Tampa, FL	2009	8" RD 25	60 m	Sí
12	Baton Rouge, LA	2009	24" RD 25	260 m	Sí
13	Collier County, FL*	2009	30" RD 25	230 m	Sí
14	Chatham, IL	2011	18" RD 25	260 m	Sí
15	Fremont, CA	2011	12" RD 25	600 m	Sí
16	Green Bay, WI	2011	16" RD 18	90 m	Sí
17	Salt Lake City, UT	2012	16" RD 31	110 m	Sí
18	Salt Lake City, UT	2012	16" RD 31	1000 m	Sí

19	Dorchester County, SC	2012	20" RD 21	670 m	Sí
20	Watford City, ND*	2013	16" RD 21	260 m	Sí
21	Watford City, ND	2013	16" RD 21	400 m	Sí
22	Watford City, ND*	2013	16" RD 21	260 m	Sí
23	Jacksonville, FL	2013	12" RD 18	6 m	Sí
24	Murfreesboro, TN	2013	10" RD 18	140 m	Sí

Como se observa en la Tabla 4.1, se han producido numerosas fallas de PRF en tuberías de PVC en los Estados Unidos para diversos tamaños de tuberías y de RD, con grietas de varios metros de largo. Estas fallas representan sólo algunas de las fallas de PRF conocidas que han ocurrido en conducciones de PVC con unión tipo fusión a tope. Este tipo de fallas en campo son bajas. De estas 24 roturas, 20 ocurrieron durante la construcción o la prueba de presión hidrostática antes de que la tubería se pusiera en servicio. Cuatro de estas fallas se produjeron después de que la tubería había sido puesta en servicio y están marcadas con un asterisco (*).

A continuación se muestra un resumen de cada una de las fallas observadas en la Tabla 4.1, los registros históricos de obtuvieron de (Palermo, 2010)

1. 2004 - Winter Park, FL

Su nombre se debe a que ocurrió en Winter Park, FL, la primera rotura por PRF conocida en una tubería de PVC unida con fusión a tope. La tubería es de 8" y RD 18. Durante la prueba de presión hidrostática, la tubería se fisuró y la grieta recorrió toda la línea (aprox. 60 m.). Posteriormente, un experto determinó que el tubo de PVC en la producción se extruyó incorrectamente.

2. 2006 - Danville, CA

La siguiente rotura por PRF se produjo en una tubería de PVC con sistema de unión por fusión a tope de 20" y RD 18 (ver Figura 4.6). Mientras se hacía una derivación de 4" en una conducción de agua a presión, la tubería de PVC se rompió y la grieta corrió aguas abajo a unos 120 metros. Tiempo después se determinó que el tubo de PVC en la producción se extruyó incorrectamente.



Figura 4.6. Tubería de PVC de 20" con RD 18 - Danville, CA– Falla tipo PRF de 120 metros de longitud (Palermo , 2010)

3. 2006 - Casselberry, FL

En Casselberry, FL se instaló una tubería de PVC de 6" y RD 18 con sistema de unión tipo fusión a tope en 2006. Primero se realizó la prueba de presión hidrostática en la tubería a 10.54 kg/cm^2 (10.34 bar), después la línea comenzó a operar a su presión normal de funcionamiento que era de 4.22 kg/cm^2 (4.14 bar). Un día después, la tubería se fisuró y la grieta tenía una longitud de 15 metros. Se sustituyó toda la tubería de PVC por tubería de HDPE para evitar cualquier fenómeno de PRF. Ésta fue la primera falla conocida "en servicio".

4. 2007 - Condado de Collier, FL

Una rotura por PRF ocurrió en una tubería de PVC en el Condado de Collier, Florida en 2007. Esta fisura se produjo cuando en una tubería de 30" y RD 25 se realizaba la prueba de presión hidrostática. Se originó una fisura durante la prueba de presión, y la grieta viajó 340 metros aguas abajo. Se determinó que existían grandes volúmenes de aire dentro de la línea, ya que no se colocaron correctamente los accesorios para realizar la prueba de presión hidrostática.

5 y 6. 2007 - Greencastle, IN

Dos roturas por PRF ocurrieron en una tubería de 10" con RD 21 en Greencastle, IN - una viajó 240 m aguas abajo y la otra 15 m. Esta tubería falló durante la realización de las derivaciones. Se concluyó que la tubería fue llevada al límite de su capacidad de diseño.

7. 2007 - Pittsburgh, PA

Una tubería de PVC unida por el sistema de fusión a tope de 24" y RD 25 falló durante la instalación de las tuberías ya que se flexionó el tubo por arriba de su radio de curvatura mínimo permitido. La rotura por PRF se prolongó por 100 metros.

8 y 9. 2008 - Clay County, FL

Ocurrieron dos roturas por PRF en una tubería de PVC de 20" y RD 18 en Jacksonville, Clay County, FL en 2008. La primera fisura se produjo cuando se cortó un tubo que servía para vaciar agua. La tubería de PVC quedó dividida longitudinalmente (ver Figura 4.7). La segunda rotura por PRF se creó durante

la prueba de presión hidrostática, se determinó que existían grandes cantidades de aire en la tubería durante la prueba. Esta grieta viajó hacia aguas abajo por casi 500 m, como se muestra en la Figura 4.8.



Figura 4.7. Tubería de PVC de 20" con RD 18 - Jacksonville, Clay County, FL– Falla tipo PRF de 183 metros de longitud (Palermo , 2010)



Figura 4.8. Tubería de PVC de 20" con RD 18 - Jacksonville, Clay County, FL– Falla tipo PRF de 500 metros de longitud (Palermo , 2010)

10. 2008 - Xenia, IA

Una rotura por Propagación Rápida de Falla se produjo en Xenia, IA en 2008 con una tubería de PVC de 20" y RD 18. El fenómeno ocurrió durante las pruebas de presión hidrostática. La falla se debió a errores en la instalación. Esta grieta viajó casi 400 metros (ver Figura 4.9).



Figura 4.9. Tubería de PVC de 20" con RD 18 - Xenia, IA – Falla tipo PRF de 400 metros de longitud (Palermo , 2010)

11. 2009 - Tampa, FL

Una falla de PRF ocurrió en una tubería de PVC de 8" y RD 25 en Tampa, FL (ver Figura 4.10). La grieta tenía una longitud de 60 metros de largo.



Figura 4.10. Tubería de PVC de 8" con RD 25 – Tampa, FL – Falla tipo PRF de 60 metros de longitud (Palermo , 2010)

12. 2009 - Baton Rouge, LA

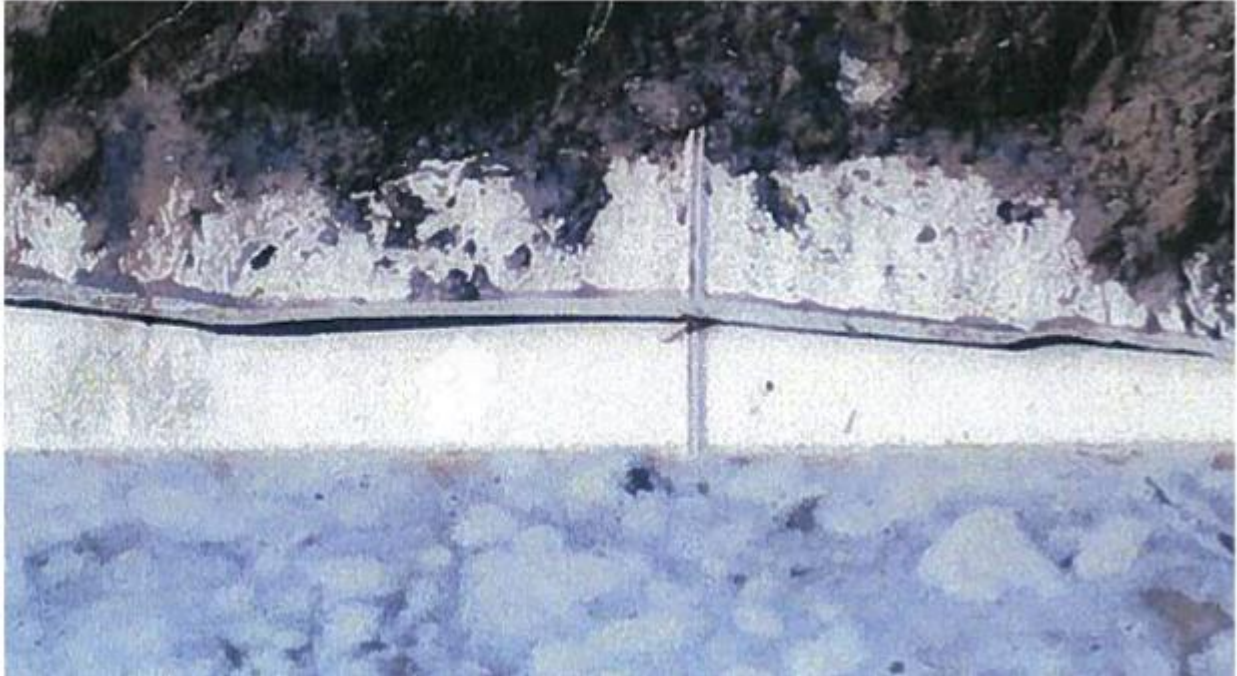
En la ciudad de Baton Rouge, LA en 2009 se produjo una falla en una tubería de PVC de 24" y RD 25 con unión tipo fusión a tope. La grieta se originó cuando el tubo fue dañado en cada extremo de la instalación, la tubería no estaba bajo presión. La Figura 4.11 muestra la grieta de PRF al pasar por una de las uniones de fusión a tope.



Figura 4.11. Tubería de PVC de 24" con RD25 – Baton Rouge, LA– Falla tipo PRF de 260 metros de longitud (Palermo , 2010)

14. 2010 - Condado de Collier, FL

Una segunda rotura por PRF ocurrió en Naples, Collier County, FL en el mismo oleoducto de 30" y RD 25 que en 2010. Esta falla es interesante porque es la segunda conocida en una línea en servicio. De acuerdo con el informe, el tubo de PVC falló debido a que le cayó una roca. La grieta viajó en ambas direcciones una longitud de 230 metros (ver Figura 4.12). El informe también concluyó que el motivo de la PRF se debió a errores en la construcción y en el diseño.



**Figura 4.12. Tubería de PVC de 30" con RD 25 – Naples, Collier County, FL
– Falla tipo PRF de 230 metros de longitud (Palermo , 2010)**

14. 2011 - Chatham, IL

En una tubería de PVC de 18" y RD 25 en Chatham, IL en 2011, se produjo una falla cuando la línea se mantuvo a una presión de 4.22 kg/cm^2 (4.14 bar) durante dos días, para la prueba de presión hidrostática se incrementó la presión y alcanzó 7 kg/cm^2 (6.89 bar), como resultado se originó una fisura que se propagó 260 m (ver Figura 4.13). Después de esta falla se volvió a instalar una tubería de 18" pero la tubería volvió a agrietarse, por lo que se intentó por tercera ocasión con el mismo resultado. Después de tres intentos fallidos para instalar tubería de PVC, finalmente se optó por utilizar tubos de HDPE y no se volvió a producir el fenómeno de PRF.



Figura 4.13. Tubería de PVC de 30" con RD25 – Chatham, IL – Falla tipo PRF de 260 metros de longitud (Palermo , 2010)

15. 2011 - Fremont, CA

En una tubería de PVC de 12" y RD 25 en Fremont, CA ocurrió una falla en donde la fisura tuvo una longitud de 90 metros. Se determinó que la rotura fue a causa de un exceso de aire en la tubería durante una prueba de presión hidrostática.

16. 2011 - Green Bay, WI

Una tubería de PVC de 16" y RD 18 en Green Bay, Wisconsin fue dañada cuando se transportaba una pila de un puente en construcción sobre una carretera donde pasaba una línea de conducción, el resultado fue una grieta por PRF.

17 y 18. 2012 - Salt Lake City, UT

Dos fallas de PRF se produjeron en una tubería de 16" y RD 31 en Salt Lake City, UT en 2012. En el primer caso, una sección de la tubería era probada para la prueba de presión hidrostática y la grieta viajó 110 metros. En el segundo caso, la línea estaba en mantenimiento y se formó una fisura de PRF con una longitud de 1 km (ver Figura 4.14). El operador informó que toda esta sección de la tubería terminó en una explosión violenta. Se reemplazaron 2 km de tubería de PVC por tubería de HDPE.



**Figura 4.14. Tubería de PVC de 16" con RD 31 – Salt Lake City, UT
– Falla tipo PRF de 1kilómetro de longitud (Palermo , 2010)**

19. 2012 - Condado de Dorchester, Carolina del Sur

Una fisura ocurrió en el condado de Dorchester, Carolina del Sur en 2012, con una tubería de 20" y RD 21. El tubo se mantuvo a una presión de 4.22 kg/cm^2 (4.14 bar) para después aumentarla a 6.33 kg/cm^2 (6.21 bar) durante unos días. Posteriormente, se incrementó la presión para la prueba de presión hidrostática. Cuando la presión alcanzó 7.73 kg/cm^3 (7.58 bar), se inició una Propagación Rápida de Falla que viajó 400 metros (ver Figura 4.15). Posteriormente se informó que la tubería había sido instalada dos veces la profundidad recomendada.

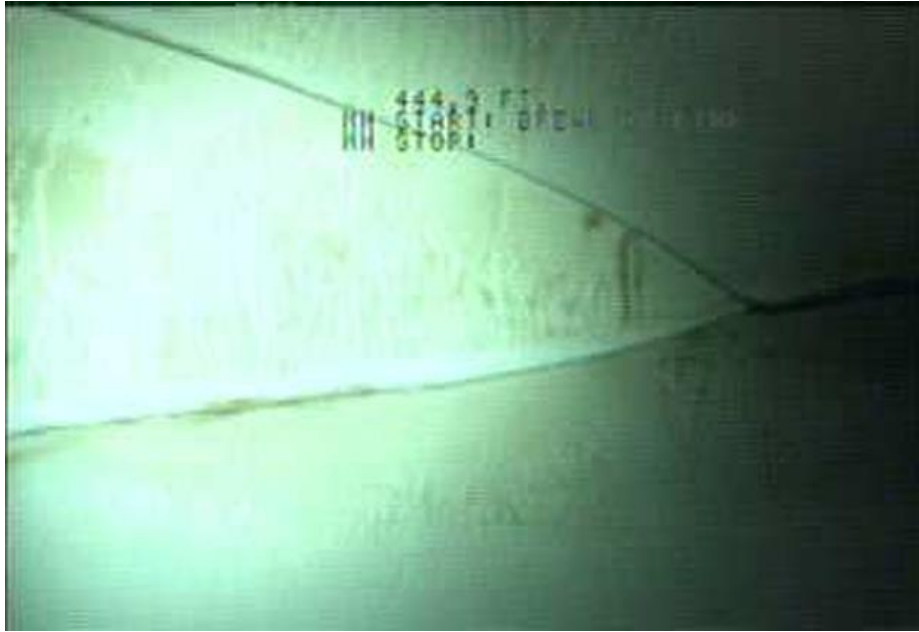


Figura 4.15. Tubería de PVC de 20" con RD21 – Dorchester County, SC(Palermo , 2010)– Falla tipo PRF de 400 metros de longitud

20, 21 y 22. 2013 - Watford City, Dakota del Norte

Una tubería de PVC de 16" y RD 21 falló después de que había estado en servicio durante sólo unos meses (ver Figura 4.16). La grieta tuvo una longitud de 250 m. Ésta es la tercera falla conocida en servicio. Se informó que la flexión del tubo superó en gran medida el radio de curvatura mínimo permitido. La tubería de PVC unida por fusión a tope se volvió a instalar, esta vez correctamente, y después de seis meses de servicio se produjo una nueva falla de la misma longitud. En un incidente independiente, ocurrió una falla en Watford City con una tubería de 16" y RD 21 con una longitud de grieta de 400 metros.



Figura 4.16. Tubería de PVC de 16" con RD21 – Watford, ND – Falla tipo PRF de 400 metros de longitud (Palermo , 2010)

23. 2013 - Jacksonville, FL

En Clay County, FL ocurrió otra Propagación Rápida de Falla en una tubería de PVC de 20" y RD 18. Esta grieta viajó 6 metros (ver Figura 4.17).



Figura 4.17. Tubería de PVC de 12" con RD18 – Jacksonville, FL– Falla tipo PRF de 6 metros de longitud (Palermo , 2010)

De acuerdo con los datos recabados para la Propagación Rápida de Falla, el número de fallas tipo PRF en tuberías de PVC unidas por el método de fusión a tope no es común, sin embargo produce pérdidas económicas importantes.

4.3.2 Mecánica de la fractura

En la Propagación Rápida de Falla una grieta continuará propagándose siempre y cuando la fuerza sobre la grieta (G) sea mayor que la resistencia a la fractura dinámica (GD). La fuerza de impulsión de la grieta, que es básicamente la energía disponible para conducir la grieta en un tubo de plástico, depende de la presión interna, el módulo de elasticidad y el diámetro de la tubería. La resistencia a la fractura dinámica es la capacidad de la tubería para resistir el agrietamiento, y depende de la resistencia a la fractura del tipo de plástico utilizado para producir la tubería y de la temperatura.

Cuando $G > GD$, entonces la grieta se propagará, en general, al final de la tubería, o hasta donde G sea menor que GD .

Por lo general se producen en sistemas presurizados con suficiente energía almacenada para conducir la grieta cuando se libera la energía. Sobre la base de varios años de investigación, la probabilidad de una rotura del tipo PRF en tubos de plástico depende de los siguientes factores, que a su vez afectan a G y GD :

- Diámetro de la tubería
- Presión interna o la tensión
- Temperatura
- Resistencia a la fractura del material plástico

Un aspecto de importancia en el comportamiento dinámico de las tuberías plásticas es la influencia del método de fabricación. Dependiendo del esquema de producción, el comportamiento de fractura dinámica puede variar. Por tal motivo, el campo de tensión residual causada por el modo de la fabricación practicado, puede parecer un factor influyente para que ocurra la PRF.

Diversos materiales de tuberías se comportan de manera diferente cuando se produce un evento de PRF. Para algunos materiales dúctiles, como el polietileno PE, la grieta viaja unos metros y se detiene, debido a la dureza del material; mientras que, para otros materiales, que son más frágiles, la grieta puede viajar por cientos de metros, como se muestra en la Tabla 4.1. Cualquiera que sea el tipo de material, se puede diseñar un sistema de tuberías para evitar la aparición de una falla de tipo PRF (Palermo , 2010).

4.3.3 Métodos de Ensayo para PRF

Existen dos métodos de prueba desarrollados para medir la presión crítica que desencadena la Propagación Rápida de Falla en una tubería plástica. El método a escala real FS (Full Scale) y el método a escala reducida S4 (Small Scale Steady State).

El método a escala real FS es considerado como el método más confiable, se describe en la norma ISO 13478, este método requiere de al menos 15 metros de tubería de plástico para cada prueba y otros 30 metros de tubería de metal para la alimentación del depósito de presión, además emplea pruebas para tuberías de hasta 500 mm de diámetro. Se requiere de múltiples muestras, es muy costosa y lleva mucho tiempo realizarla.

Debido a los altos costos para la prueba FS, fue desarrollado el método a escala reducida S4 como alternativa para minimizar los costos de inversión del método FS y poder establecer una correlación con éste. Utiliza muestras de tubos mucho más pequeñas y una serie de deflectores, descritos en la norma ISO 13477. Debido a estos deflectores, los datos de presión de la prueba S4 deben ser convertidos a las presiones FS utilizando un factor de correlación. El costo de la realización de la prueba S4 sigue teniendo costos altos, pero menores que los del método FS. En la Figura 4.18. se muestra una foto de una típica instalación de prueba S4.



Figura 4.18. Máquina S4 – Banco de pruebas de laboratorio de Chevron Philips Chemical Compani, LLC (Palermo, 2010).

Ya sea utilizando las pruebas FS o S4, el resultado es la obtención de la presión crítica o la tensión crítica de las tuberías plásticas que desencadenan una Propagación Rápida de Falla, esto se define como la mayor presión medida a la que la grieta fue sometida.

Si la presión interna está por encima de la presión crítica para la PRF, entonces este fenómeno puede ocurrir. Si la presión interna está por debajo de la presión crítica, la grieta será detenida y no ocurrirá PRF; ya que no habrá suficiente fuerza para la propagación de la grieta (G). Desde el punto de vista del diseño, se necesita que la presión interna esté por debajo de la presión crítica para PRF, de esta manera se asegura que no se produzca propagación rápida de falla.

La presión crítica se obtiene mediante la realización de una serie de pruebas FS o S4 a temperatura constante a 0 ° C y variando la presión interna. A bajas presiones, donde no hay energía suficiente para conducir la grieta, la fisura inicia y se detiene de inmediato. A presiones más altas, la grieta se propaga hasta el final de la tubería.

Es importante mencionar, que la presión crítica obtenida con el método de ensayo S4 debe ser corregida para correlacionarla con la presión crítica de la prueba FS. Con base en investigaciones realizadas se ha obtenido la ecuación 4.1, que es la fórmula de correlación para convertir la presión crítica S4 ($P_c, S4$) a la presión crítica FS (P_c, FS):

$$(P_c, FS) = 3.6 (P_c, S4) + 2.6 \text{ (bar)} \quad (4.1)$$

Esta fórmula de correlación se basa en principios bien establecidos para las tuberías de plástico y por lo tanto es aplicable a diversos materiales de tuberías termoplásticas, tales como PE y PVC.

Para ejemplificar la aplicación de la ecuación 4.1, se considera una presión crítica para la prueba S4 de 10 bar, entonces se obtiene una presión crítica para el método FS de 38.6 bar.

$$(P_{c,FS}) = 3.6 (10 \text{ bar}) + 2.6 \text{ bar} = 38.6 \text{ bar} = 40 \text{ kg/cm}^2$$

Esto significa que para esta tubería con una presión crítica FS de 38.6 bar (40 kg/cm²) a 0°C, la Propagación Rápida de Falla no puede ocurrir cuando se tiene una presión interna menor que 38.6 bar. Ya que se requiere una presión interna mayor de G para que la grieta se siga propagando.

4.3.4 Presión Crítica Medida de PRF para PVC

Con base en el análisis realizado, el uso de tubería de PVC es un potencial riesgo para la Propagación Rápida de Falla. Si existe aire atrapado en las tuberías el riesgo de PRF es mucho mayor. Las tuberías de PE son menos susceptibles a este riesgo (Greenshields & Leever, 1996).

En los estudios realizados por (Leever, 1989) se determinó que para tuberías de PVC la presión crítica para que se genere la Propagación Rápida de Falla debe ser muy alta para un tubo con 100% de agua en su interior, sin embargo concluyó que la presión crítica para un tubo de PVC disminuye a medida que el contenido de aire en la tubería aumenta. Esto quiere decir que el aire atrapado en la tubería aumenta la fuerza de la conducción de la grieta, G. Si G es mayor que GD, entonces es posible que ocurra la PRF.

Los resultados de las pruebas realizadas por (Leever, 1989) se llevaron a cabo en tubos de PVC con un RD 19 a 3°C. Cuando el volumen de aire dentro de la tubería es de 10% o superior la presión crítica para que se propague la grieta es de 1.6 bar o 1.6 kg/cm². Esto significa que la presión crítica con 100% de agua no es la misma que la presión crítica con 10% de aire en el interior.

Esto es significativo porque la mayoría de los laboratorios realizan la prueba S4 o FS con 100% de aire dentro de la tubería. En un caso ideal la tubería sólo tendría agua en el interior sin aire atrapado, y la propagación rápida de falla raramente podría ocurrir debido a que la presión crítica es mucho mayor que la presión interna. La presión crítica con 10% de aire en la tubería es útil porque representa situaciones de campo reales donde las bolsas de aire se encuentran típicamente en las conducciones.

La norma ISO 13477 establece que la ecuación de correlación entre las pruebas S4 y FS es independiente del material de la tubería. Por lo tanto, el uso de la ecuación 4.1 es estándar para relacionar la presión crítica S4 con la de FS, en el siguiente ejemplo, se obtendrá la presión crítica de FS para una tubería de PVC de RD 19:

$$(P_{c,FS}) = 3.6 (1.6 \text{ bar}) + 2.6 \text{ bar} = 8.36 \text{ bar} = 8.6 \text{ kg/cm}^2$$

Esto significa que para que se produzca una Propagación Rápida de Falla en una tubería de PVC de RD 19 a 3°C con un 10% de aire en el interior, la presión interna debe ser de al menos 8.36 bar. Esto corresponde a una tensión crítica de 8.6 kg/cm². Si la presión interna supera los 8.6 kg/cm² es posible que ocurra PRF.

Con el fin de controlar el riesgo de PRF en una tubería de PVC, la presión de operación del sistema debe ser mantenida por debajo de la presión crítica para PRF. Para algunos sistemas, podría significar un funcionamiento del sistema muy por debajo de la máxima de diseño hidrostática a la presión de la tubería.

Para evitar PRF se debe seleccionar una relación de diámetros a partir de RD 13 o más grueso para evitar que se propague una grieta. Con un RD superior (pared más delgada), es posible que la grieta, cuando se inicie, se propague por toda la tubería.

Por lo tanto las recomendaciones serían las siguientes: Bajar la presión interna de la tubería de PVC o utilizar una pared más gruesa.

4.3.5 Presión Crítica Medida de PRF para PE

(Leevers, 2008) realizó pruebas S4 similares a las de la tubería de PVC variando las cantidades de aire atrapado. Para una tubería de PE clase 80 con RD 11, cuando el volumen de aire alcanza el 20% la presión crítica para PRF es aproximadamente 3.0 bar. Utilizando la ecuación estándar para la presión crítica con el método FS, se tiene el siguiente cálculo para la tubería de PE:

$$(P_c, FS) = 3.6 (3.0 \text{ bar}) + 2.6 \text{ bar} = 13.4 \text{ bar} = 13.7 \text{ kg/cm}^2$$

Para la tubería de PE nueva generación de materiales de PE 4710, la presión crítica para PRF está por encima de los 10 bar (10.2 kg/cm²). Utilizando la ecuación estándar de nuevo para PE de presión crítica, tenemos el siguiente cálculo para la tubería de PE 4710:

$$(P_c, FS) = 3.6 (10 \text{ bar}) + 2.6 \text{ bar} = 38.6 \text{ bar} = 38.7 \text{ kg/cm}^2$$

En conclusión, cuando se produce un evento de Propagación Rápida de Falla, el comportamiento es distinto para los diferentes materiales de tubería. Realizando una comparación con los resultados de las presiones críticas para PVC, se percibe que el PE tiene mayor resistencia a las presiones internas que puedan detonar una rotura por PRF. Para algunos materiales dúctiles, como el polietileno, la grieta puede ser detenida debido a la resistencia del material.

La Propagación Rápida de Falla no se produce en la tubería de PE cuando está trabajando a tubo lleno. Para que se produzca la propagación rápida de en una tubería de PE, en general se necesita un poco de aire atrapado en la tubería, ya que el aire ayuda a impulsar la grieta por la tubería.

Para todos los materiales de tuberías es más probable que ocurra la propagación rápida de falla en grandes tamaños de diámetro de tubería. El agrietamiento generalmente no se produce en diámetros de tubería menores de 4". Cuanto mayor sea el diámetro de la tubería, más probable es que se produzca la Propagación Rápida de Falla (Greenshields, et al., 1997).

Esto no significa que no se deben utilizar tubos de gran diámetro, simplemente significa que se debe estar más consciente de que la posibilidad de que ocurra la Propagación Rápida de Falla en tuberías es más probable para diámetros más grandes.

(Greenshields & Leevers, 1995) mencionan que el RD mínimo para que se produzca Propagación Rápida de Falla en una tubería trabajando a tubo lleno para la tubería de PVC es de 13. Por otra parte, para tubos de PE el mínimo RD es de 29.

Para todos los materiales de tuberías de plástico, la Propagación Rápida de Falla es más probable que ocurra para presiones altas. Estas presiones proporcionan la energía para impulsar la grieta. Cuanto mayor sea la presión interna, es más probable que se produzca la Propagación Rápida de Falla. Esto no significa que no se deben utilizar tubos de plástico a altas presiones. Simplemente significa que se necesita ser más consciente de que la posibilidad de la PRF es mayor para presiones más altas.

CAPÍTULO 4

En el siguiente capítulo se presenta el caso de estudio del acueducto Conejos-Médanos de Ciudad Juárez, Chihuahua. La hipótesis que se planteó es que las 20 roturas de tubos de PVC ocurridas entre 2011 y 2013, se debieron a defectos de fabricación que propiciaron la ocurrencia propagación rápida de falla, debido a la ocurrencia de transitorios hidráulicos y a la presencia de aire atrapado en la conducción.

CAPÍTULO 5

5. CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

5.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta el análisis del caso de estudio del acueducto Conejos-Médanos de Ciudad Juárez, Chihuahua. La hipótesis que se planteó es que las 20 roturas de tubos de PVC que ocurrieron entre los años 2011 a 2013, se debieron a defectos de fabricación que propiciaron la Propagación Rápida de Falla (PRF), debido a la ocurrencia de transitorios hidráulicos y a la presencia de aire atrapado en la conducción.

El acueducto Conejos-Médanos, se construyó con tubos de PVC de 36 pulgadas (0.9144 m), DR 25, y una presión nominal o de trabajo de 165 psi (11.6 kg/cm²). El sistema inició su operación en mayo de 2010. La conducción se compone de tramos de tubos intercalados de dos marcas comerciales: JM Eagle y Diamond Plastics Corporation, ambas marcas se producen en Estados Unidos y cumplen la norma AWWA C905 PVC. Es importante mencionar, que las 20 roturas han ocurrido sólo en tubos de la marca JM Eagle.

El acueducto es abastecido por una serie de baterías de pozos que bombean el agua por una línea de conducción de 25.3 km de longitud, hasta llegar a tres tanques de entrega de 5,000 m³ cada uno, ubicados en las afueras de la zona poniente de Ciudad Juárez, a una elevación de 1,320 msnm (ver Figura 5.1). Una vez que se bombea el agua a los tanques de entrega, ésta se distribuye por un sistema a gravedad que transporta agua a diversos tanques para que sea suministrada a los habitantes de la ciudad.



Figura 5.1. Proyecto Conejos Médanos vista aérea (Avance de proyectos, Junta Municipal de Agua y Saneamiento, JMAS).

El acueducto cuenta con una capacidad de diseño de 1,075 l/s, el objetivo del acueducto fue incrementar el suministro de agua potable a Ciudad Juárez, y así evitar la extracción de agua del acuífero Bolsón del Hueco.

Del mes de junio 2011 hasta enero 2013 se han presentado 20 roturas en diferentes puntos de su extensión que han ocasionado daños a viviendas cercanas y a vialidades por donde pasa la línea de conducción. Las fallas se detectaron en la tubería de PVC que se instaló en un tramo de 7.5 kilómetros donde se distribuye el agua a gravedad y que va de los tanques de entrega y que finaliza a en el Tanque Altamirano (ver Figura 5.2), localizados justo en las faldas de la Sierra de Juárez, al poniente de Ciudad Juárez.

Para su estudio, el sistema se dividió en tres tramos. La Línea 1, que va de los Tanques de entrega al Tanque Renovación. La línea 2 que inicia en la derivación o interconexión y llega al Tanque Plutarco Elías Calles. Finalmente, la Línea 3 une los tanques Plutarco Elías Calles y Altamirano (ver figura 5.2).

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

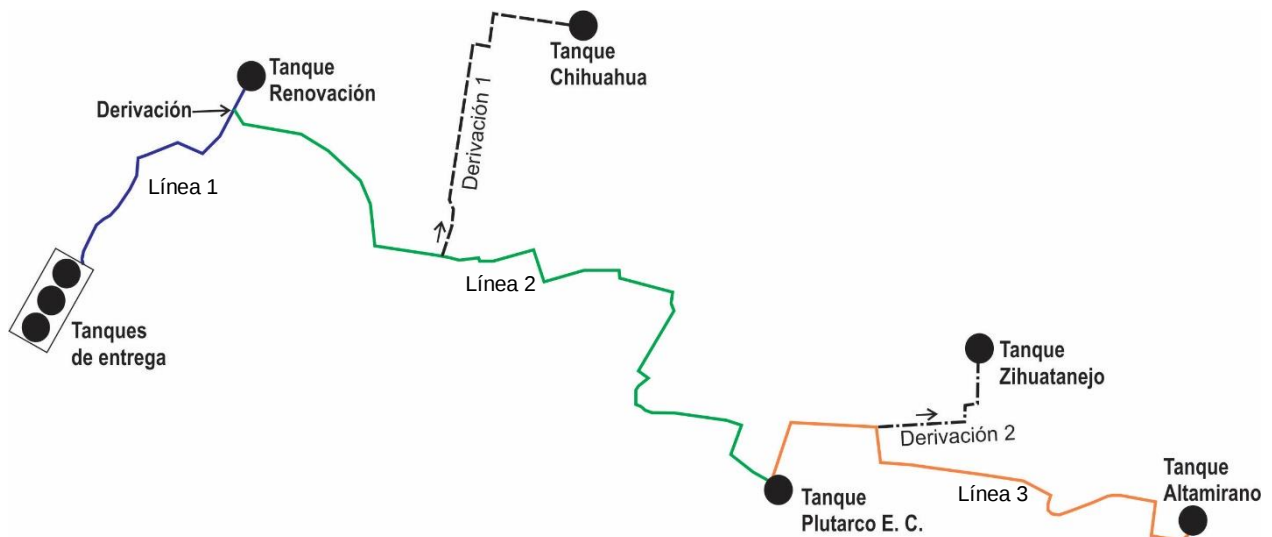


Figura 5.2. Tramo a gravedad del acueducto Conejos-Médanos visto en planta.

Es importante mencionar que en la Línea 1 no se han presentado fallas en la tubería. Sin embargo, las 20 roturas se han presentado a lo largo de las Líneas 2 y 3. En la Figura 5.3 se muestran las fallas ubicadas a lo largo del acueducto, y en la Tabla 5.1 se resume la ubicación y la fecha en la que ocurrieron las roturas.

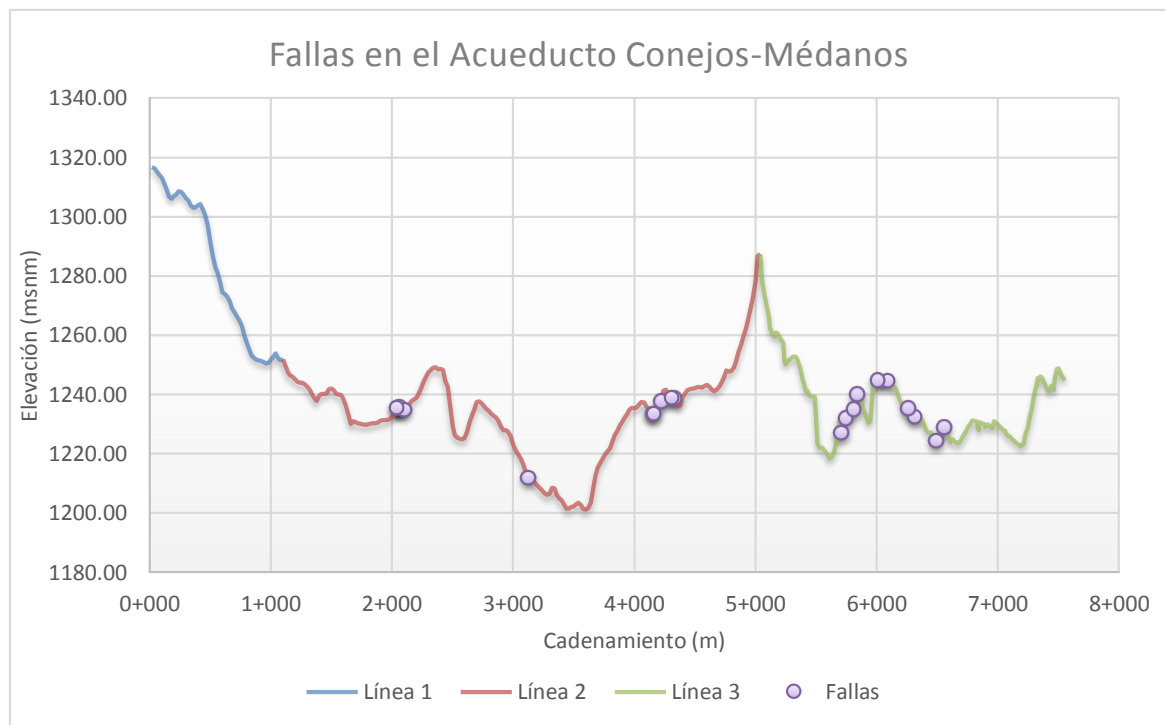


Figura 5.3. Fallas ocurridas a lo largo del acueducto Conejos-Médanos.

Tabla 5.1. Resumen de las fallas ocurridas en el acueducto Conejos – Médanos.

Línea 2			
	Cadenamiento	Elevación	Fecha de la falla
1	4+150	1233.49	07-jun-11
2	4+330	1238.82	06-jul-11
3	4+220	1237.7	10-sep-11
4	2+060	1235.5	24-oct-11
5	4+310	1239	23-mar-12
6	3+125	1212	27-mar-12
7	2+060	1237.92	07-may-12
8	4+160	1233.55	26-jun-12
9	2+100	1234.74	06-jul-12
10	2+040	1235.5	11-ene-13
Línea 3			
	Cadenamiento	Elevación	Fecha de la falla
1	6+560	1228.89	01-feb-11
2	5+745	1230.86	27-may-11
3	5+842	1240.06	17-jul-11
4	6+312	1232.5	04-oct-11
5	5+810	1234	19-abr-12
6	5+710	1227	12-may-12
7	6+094	1244.6	15-jun-12
8	6+010	1244.9	25-jun-12
9	6+262	1235.38	14-jul-12
10	6+494	1224.31	19-sep-12

Varios tramos de los tubos de la marca JM Eagle fueron llevados a dos laboratorios en los Estados Unidos y se les practicaron las pruebas correspondientes a la norma AWWA C905 PVC, que es el estatuto con el que fueron construidos los tubos de PVC que se utilizaron para la construcción del acueducto. Esta norma consiste en someter al tubo a presiones de corta duración y a aplastamiento, además las muestras de tubo se sometieron a la prueba de inmersión en acetona (ASTM D-2152), que es una norma de calidad para tuberías y se utiliza para conocer la calidad de la extrusión. Consiste en sumergir una sección del producto en acetona anhidra durante 20 minutos, después de los cuales se inspecciona el material para ver si presenta superficies con escamas, grietas o separación de pared. Todos los tubos pasaron las pruebas satisfactoriamente.

El 15 de enero de 2013 personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó una visita de campo al acueducto Conejos – Médanos y se observaron algunos de los tubos que han fallado. Al examinar la tubería de PVC, se notó que el patrón de falla es similar al fenómeno PRF con aire y sin aire en su interior. En la Figura 5.4 y Figura 5.5 se observan los patrones de falla en los tubos del acueducto (ver también Figura 4.2 y Figura 4.3 del capítulo 4).

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO
CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA



Figura 5.4. Rotura del tipo PRF en un tubo de PVC sin aire atrapado ocurrido en el acueducto Conejos-Médanos de Ciudad Juárez Chihuahua, México.



Figura 5.5. Rotura del tipo PRF en un tubo de PVC con presencia de aire atrapado ocurrido en el acueducto Conejos-Médanos de Ciudad Juárez Chihuahua, México.

5.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE PARA EL ANÁLISIS

Como se explica en los capítulos anteriores, existen diversas causas por las cuales un acueducto puede fallar. Dadas las cuantiosas roturas de los tubos de PVC y la complejidad del caso de estudio, se hizo una recopilación de información para poder realizar un análisis lo más detallado posible del sistema.

La información utilizada para el análisis del acueducto Conejos-Médanos fue proporcionada por la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS). Los datos disponibles son la topografía de las líneas 1 a 3, los gastos mensuales de los años 2012 y 2013, la elevación y cadenamamiento de las válvulas de aire y sus dimensiones, así como la ubicación de las roturas en la tubería.

5.2.1 Consideraciones generales

El gasto de diseño del acueducto Conejos-Médanos es de 1.075 m³/s con un diámetro nominal de 0.9144 m. La longitud total del tramo a gravedad de la línea de conducción es de 7500 m. El sistema está dividido en tres tramos. La Línea 1, que va de los Tanques de entrega al Tanque Renovación. La línea 2 que inicia en la derivación al Tanque Plutarco Elías Calles. Finalmente, la Línea 3 que une los tanques Plutarco Elías Calles y Altamirano.

5.2.2 Consideraciones de los gastos

La Junta Municipal de Agua y Saneamiento registró gastos máximos y mínimos mensuales obtenidos a partir de las mediciones de flujo en la entrada de cada uno de los tanques, los gastos del año 2012 se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Gastos registrados por la JMAS en el acueducto durante el año 2012.

Mes	Gasto mínimo (m ³ /s)	Gasto máximo (m ³ /s)
Enero	0.956	1.164
Febrero	0.852	1.142
Marzo	0.542	1.620
Abril	0.684	0.952
Mayo	0.717	0.992
Junio	1.095	1.217
Julio	0.677	0.972
Agosto	0.920	1.153
Septiembre	0.749	1.206
Octubre	0.614	1.178
Noviembre	0.518	1.199
Diciembre	0.474	1.200

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

Si se considera que el acueducto está operando con el gasto de diseño y éste a su vez es repartido a lo largo de la conducción por todas las derivaciones hacia los diferentes tanques, se obtiene la siguiente distribución de gastos que se resume en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Gasto de diseño repartido hacia los distintos tanques de entrega, según JMAS

Nombre	Q (m ³ /s)
Tanques de Entrega	1.075
Derivación	
Derivación	
Tanque Renovación	0.415
Derivación	
Derivación 1	0.66
Derivación 1	
Tanque Plutarco E.C.	0.37
Tanque Plutarco E.C.	
Derivación 2	0.37
Derivación 2	
Tanque Altamirano	

En la Figura 5.6 se muestra el diagrama de la configuración del acueducto del caso de estudio.

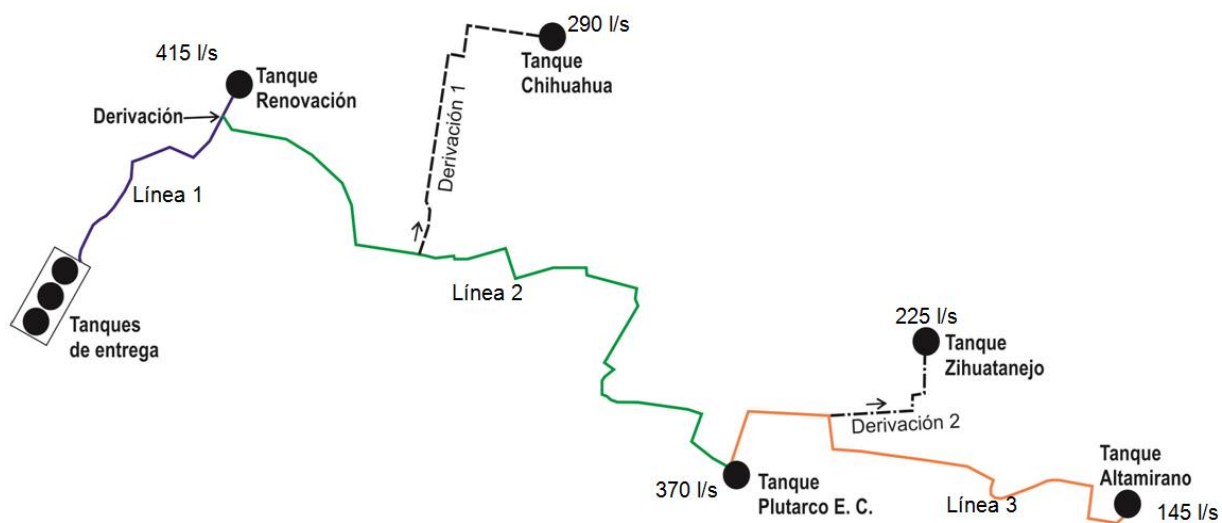


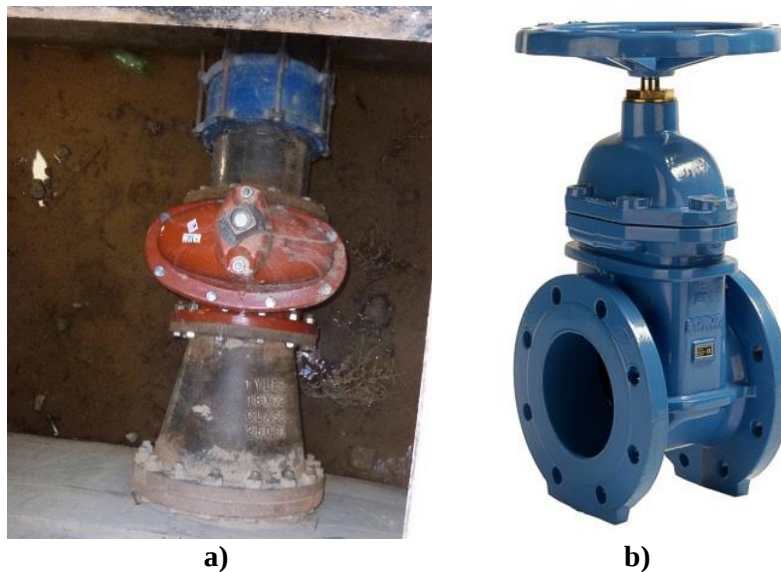
Figura 5.6. Vista en planta de la configuración del acueducto.

5.2.3 Consideraciones en los tanques

Para las simulaciones se consideró que el nivel del espejo de agua en los Tanques de Entrega está en la cota 1,323.86 msnm; mientras que el desplante de los mismos se encuentra en la cota 1,316.66 msnm. Es decir, se tiene un tirante de agua de 7.2 m. Para el Tanque Plutarco Elías Calles se tomó en cuenta el mismo valor de tirante, 7.2 m y el desplante del tanque se encuentra en el cadenamiento 5+040 y en la elevación 1287.31 msnm.

5.2.4 Consideraciones en las válvulas de seccionamiento

Para conocer las presiones provocadas por el cierre de las válvulas de seccionamiento a la entrada de los tanques se necesitan conocer las válvulas existentes en el sistema. Las válvulas utilizadas para la apertura o cierre de los tanques fueron propuestas, ya que no se cuenta con esta información. Con base en las fotografías tomadas durante la visita de campo del 15 de enero de 2013 realizada por personal del Instituto de Ingeniería, se propusieron válvulas de compuerta en la entrada de cada tanque. La Figura 5.7 es una comparación de una fotografía de una válvula colocada en el acueducto Conejos-Médanos (a) y de la válvula propuesta tipo compuerta (b).



a) b)
Figura 5.7. Válvulas tipo compuerta

5.2.5 Consideraciones en las válvulas de aire

El personal de JMAS proporcionó la elevación y el cadenamiento de las válvulas de aire que se encuentran instaladas a lo largo del acueducto, en la Tabla 5.4 se resume la información.

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUDUCTO
CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

Tabla 5.4. Válvulas de aire en el acueducto Conejos-Médanos

	Cadenamiento (m)	Elevación (msnm)	D VAEA (in)
Línea 1	0+100	1313.13	6
	0+297	1306.15	8
	0+420	1304.33	12
	0+640	1273.1	8
	0+732	1264.99	3
	1+164.53	1259.65	10
Línea 2	1+340	1240.24	3
	1+480	1241.79	10
	1+580	1239.76	10
	1+680	1230.91	12
	2+071	1235.75	10
	2+140	1236.56	6
	2+340	1248.94	8
	2+400	1248.59	6
	2+700	1237.52	12
	2+860	1232.14	6
	2+931	1227.98	2
	3+315	1207.52	12
	3+520.44	1202.97	6
	3+760	1219.79	6
	3+960	1234.74	6
	4+051	1237.12	10
	4+242.27	1241.28	12
	4+322.36	1238.77	10
	4+410	1239.72	12
	4+560	1242.35	8
	4+600	1243.27	10
Línea 3	5+018	1286.08	8
	5+040	1284.29	3
	5+745.39	1232.145	10
	5+790	1233.42	10
	5+842.04	1240.06	12
	5+950	1231	10
	6+143	1242.57	6
	6+593.92	1225.6	8
	6+788.97	1230.5	6
	6+858.15	1230.5	12

Cadenamiento (m)	Elevación (msnm)	D VAEA (in)
6+992.5	1230.6	6
7+357.9	1245.8	2

En la Figura 5.8 se muestra el perfil del acueducto y la ubicación de las válvulas de aire.

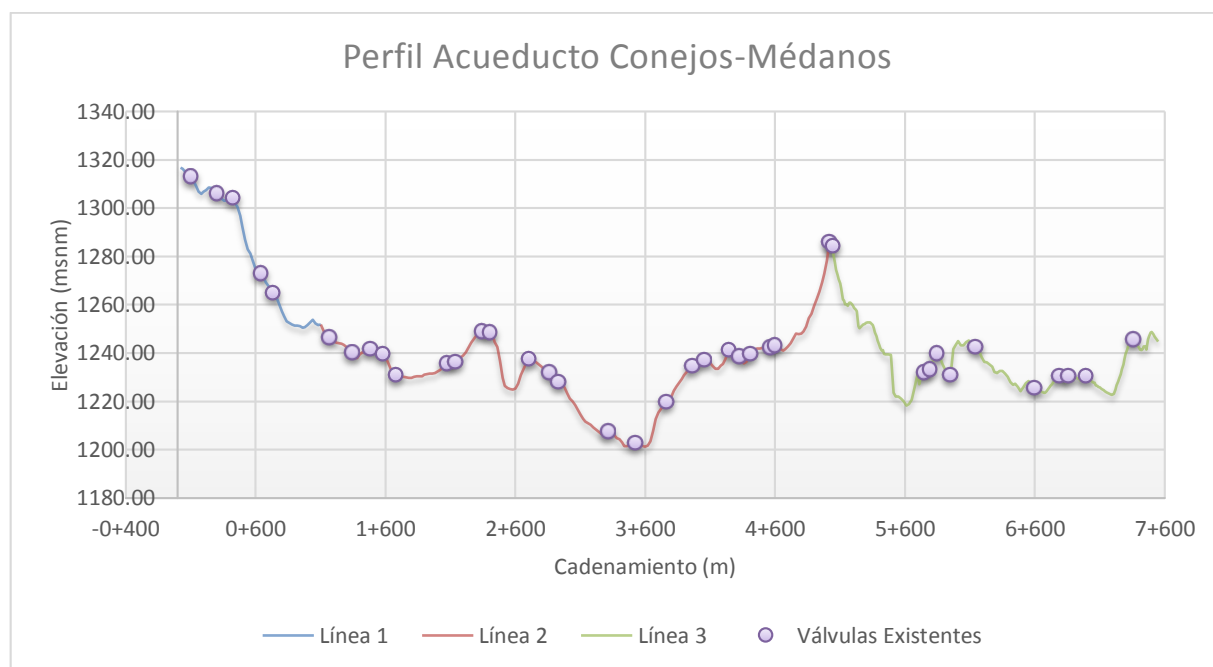


Figura 5.8. Perfil del acueducto y válvulas de aire existentes

5.3 ANÁLISIS DE LOS TRANSITORIOS HIDRÁULICOS CON EL PROGRAMA TRANS

Para la revisión y análisis del acueducto Conejos-Médanos durante un evento transitorio, se utilizó el programa numérico TRANS implementado por el Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Carmona & Carmona, 2013). Este sistema es el resultado de la necesidad de proponer soluciones que garanticen la operación segura de las líneas de conducción de agua a presión que operan en el país. Este Software ha sido usado y probado con éxito en grandes acueductos, como el acueducto Río Colorado – Tijuana, acueducto Chapala – Guadalajara, acueducto El Cuchillo – Monterrey y en el Sistema Cutzamala.

Con la información disponible, se generó el archivo de datos del software TRANS para efectuar la revisión del acueducto ante la ocurrencia de transitorios hidráulicos provocados por el cierre de una válvula de compuerta, que pudieron haber producido sobrepresiones lo suficientemente altas como para causar la rotura de la tubería.

A través del archivo de datos se le proporciona al TRANS la información de los sistemas hidráulicos a simular. En éste se describen las características físicas, hidráulicas y las maniobras de operación particulares de cada sistema de conducción.

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

En la Figura 5.9 se muestra la pantalla de inicio del programa TRANS empleada para la simulación de los transitorios, y en la Figura 5.10 se observa la pantalla de inicio para la captura de datos.

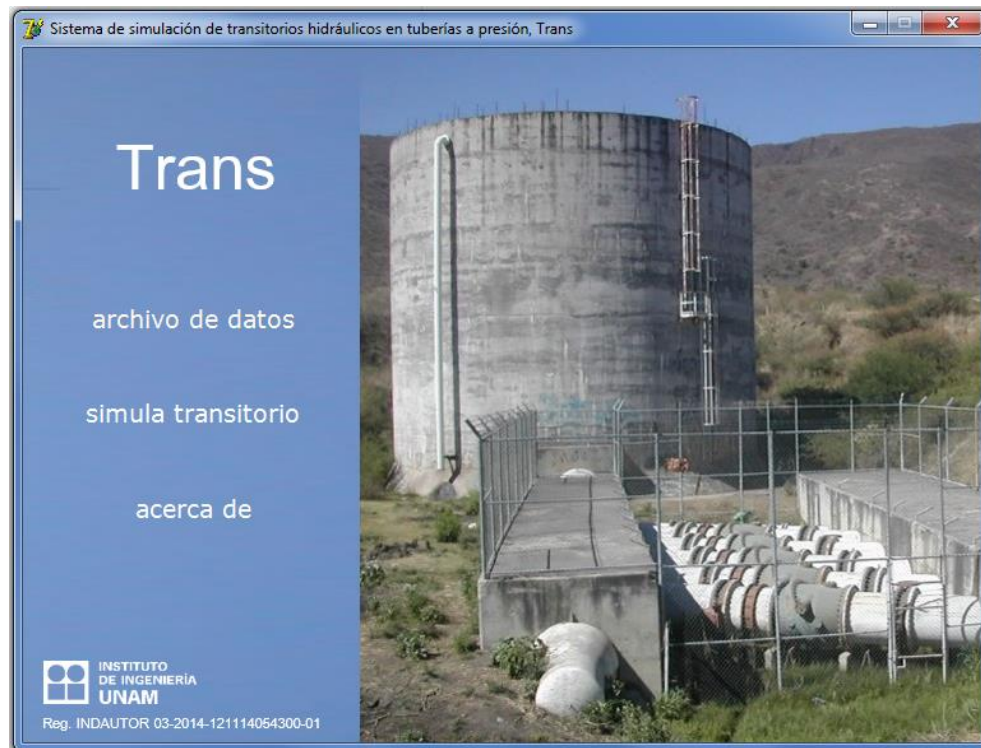


Figura 5.9. Pantalla de inicio del programa TRANS

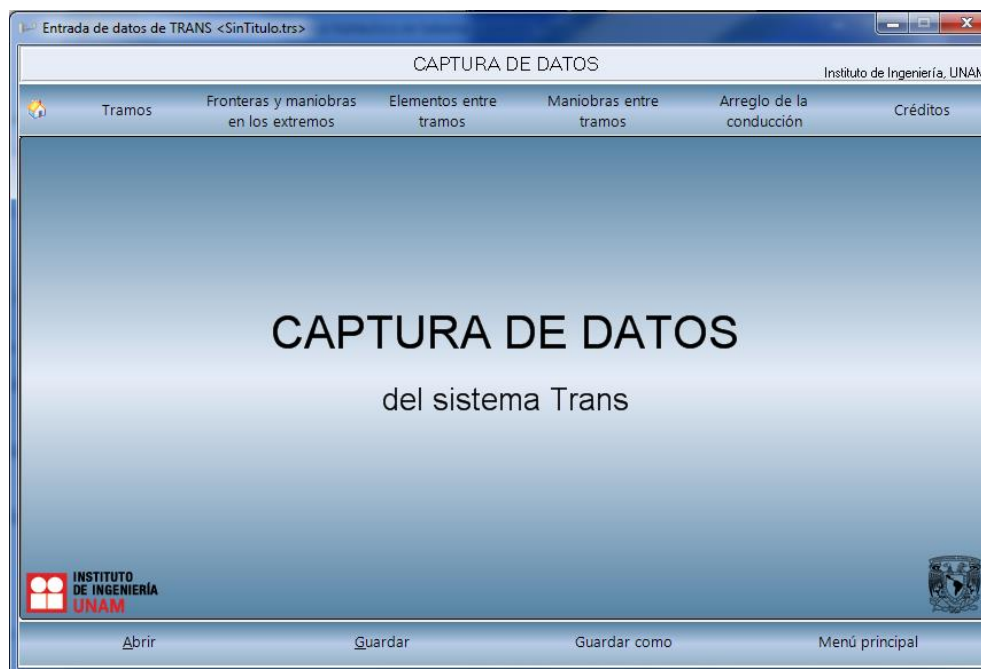


Figura 5.10. Captura de datos de proyecto

5.3.1 Determinación del coeficiente de pérdida de carga

Según la fórmula de Darcy – Weisbach (ecuación 5.1), el factor de fricción de un conducto a presión de sección circular está dado por:

$$f = \frac{0.25}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (5.1)$$

Donde:

R = número de Reynolds

D = diámetro de la tubería (m)

ε = rugosidad absoluta del material de la tubería (m)

Debido a que la velocidad varía en diferentes tramos del acueducto fue necesario determinar un coeficiente de fricción para cada tramo. En la Tabla 5.5 se observa un resumen de los coeficientes de fricción obtenidos para los diferentes gastos que se presentan a lo largo del acueducto. El coeficiente de rugosidad absoluta para el PVC se consideró de 0.010 mm.

Tabla 5.5. Factores de fricción (f)

Nombre	Q (m3/s)	f
Tanques de Entrega	1100	1.075
Derivación		0.011
Derivación	110	0.415
Tanque Renovación		0.013
Derivación	1260	0.66
Derivación 1		0.012
Derivación 1	110	0.29
Tanque Chihuahua		0.013
Derivación 1	2670	0.37
Tanque Plutarco E.C.		0.013
Tanque Plutarco E.C.	670	0.37
Derivación 2		0.13
Derivación 2	100	0.145
Tanque Zihuatanejo		0.016
Derivación 2	1840	0.225
Tanque Altamirano		0.014

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

5.3.2 Comportamiento de la línea piezométrica

Con la determinación del coeficiente de fricción podemos proceder con el cálculo de la línea piezométrica para cada tramo, la Figura 5.11 muestra el perfil del acueducto y las piezométricas del sistema obtenidas con los coeficientes de fricción de la Tabla 5.5.

Para observar el comportamiento de la línea piezométrica a lo largo del acueducto, se trazó la línea piezométrica iniciando desde los tanques de entrega ubicados en el cadenamiento 0+000 hacia aguas abajo.

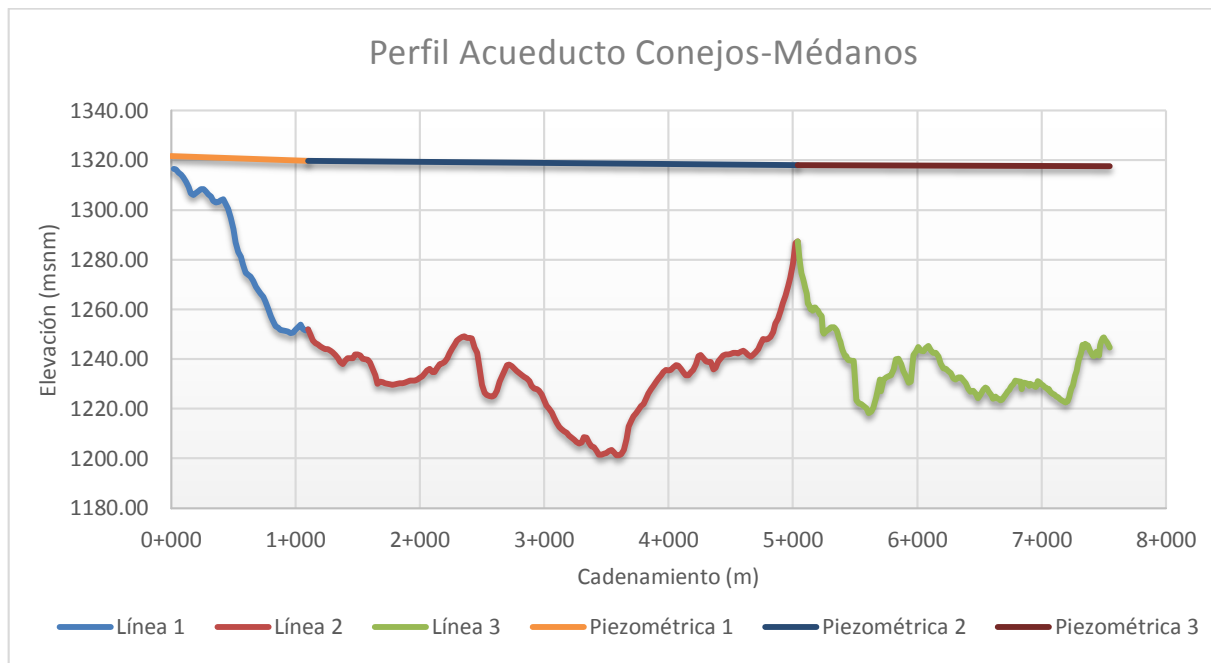


Figura 5.11. Piezométrica en el tramo a gravedad

Cuando se dibujó la línea piezométrica, ésta tenía una distancia de 20 m por encima del Tanque Plutarco Elías Calles. Por lo tanto, se estimó la piezométrica de aguas abajo hacia aguas arriba, es decir, se comenzó a calcular desde el cadenamiento 5+040 y elevación de 1294.51 msnm, hacia el tanque P.E.C (ver Figura 5.12) para que el tirante de agua en este último fuese de 7.2 m.

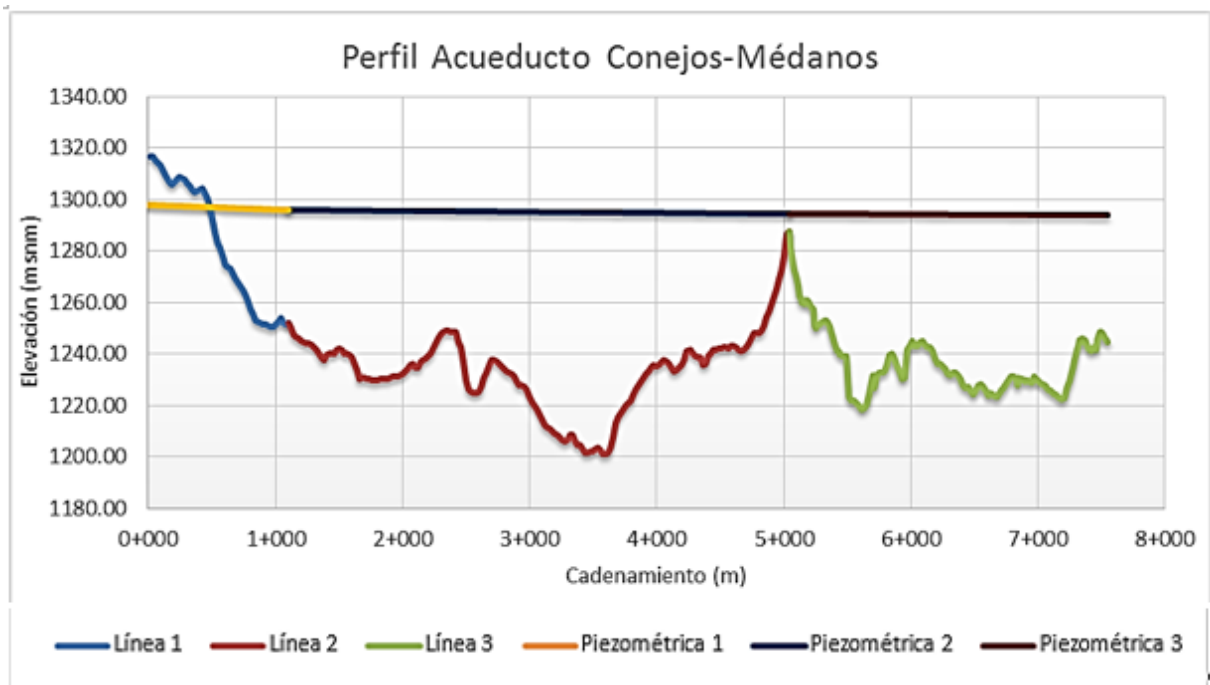


Figura 5.12. Cálculo de la línea piezométrica a partir del cadenamiento 5+040

Fue necesario realizar el análisis de pérdida de carga y sus efectos en la línea piezométrica, debido a que en este estudio se observó que al tener un tirante de agua constante en el tanque Plutarco Elías Calles la línea piezométrica cortaba el perfil del terreno produciendo presiones negativas en la línea a gravedad y un posterior vaciado de los tanques de entrega, por lo que se determinó que existe una válvula de control sobre la línea a gravedad (ver Figura 5.13), ésta válvula se encuentra en el kilómetro 0+475, en un punto posterior a los tanques de entrega y a una altura menor. En la Figura 5.14 se presenta un esquema de la colocación de las válvulas para incrementar las pérdidas y evitar que la línea piezométrica corte el perfil.

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

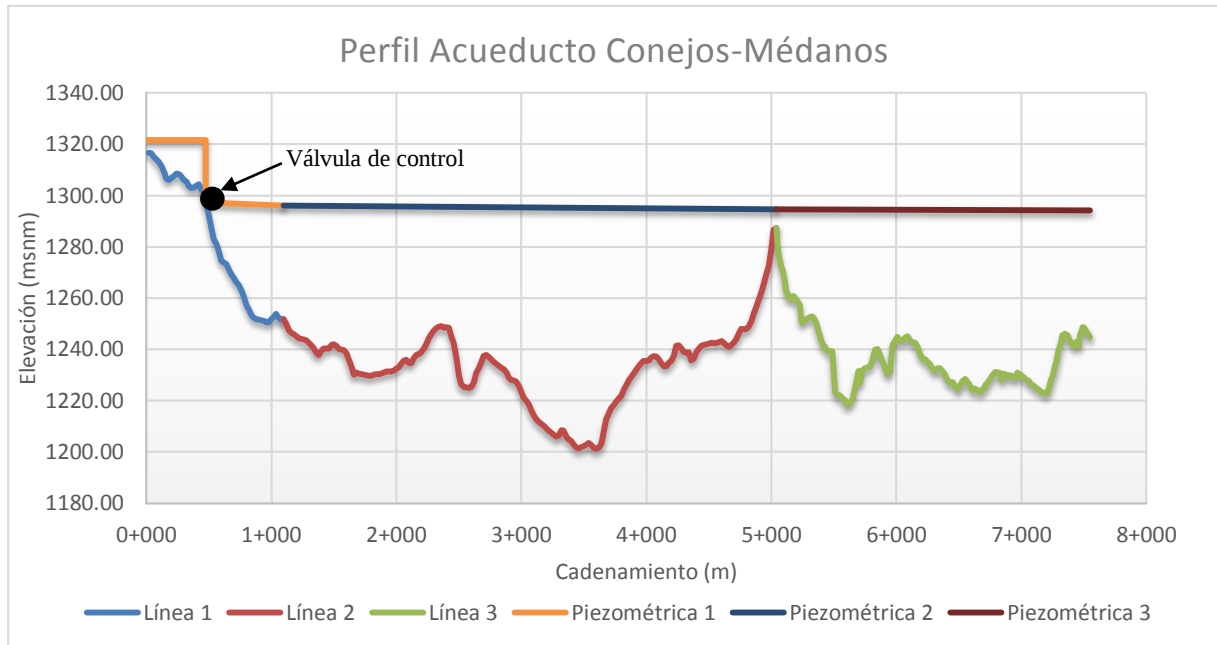


Figura 5.13. Piezométrica en el tramo a gravedad calculada del Tanque P.E.C hacia aguas arriba

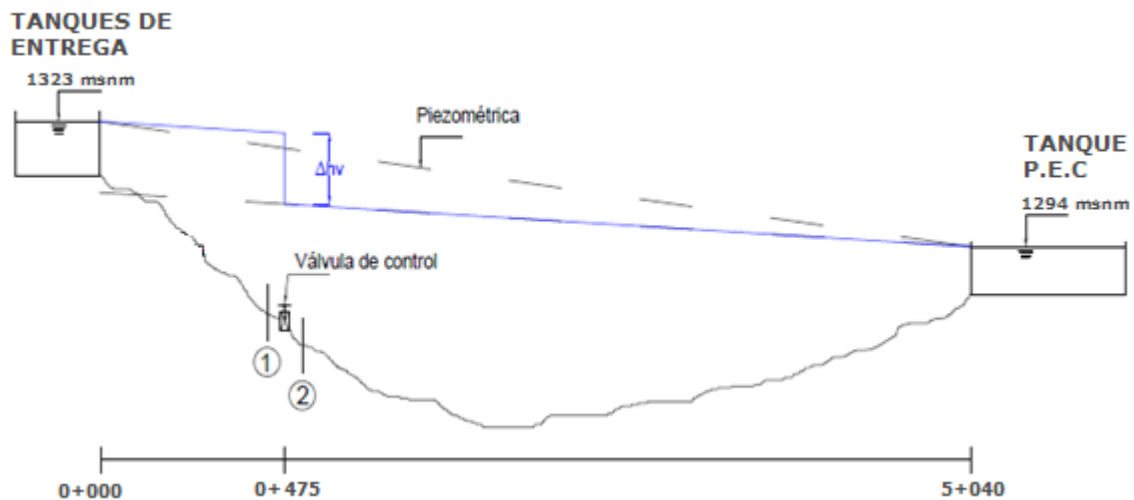


Figura 5.14. Esquema de la colocación de las válvulas para incrementar las pérdidas

5.3.3 Determinación de la celeridad

La magnitud y el desarrollo de los fenómenos transitorios dependen en su mayoría de la capacidad que tenga la tubería para transmitir, a lo largo de la conducción, las perturbaciones generadas. La velocidad de transmisión de las perturbaciones, conocida como celeridad, depende de las características, dimensiones y material de las tuberías. Para calcular la celeridad se utilizó la ecuación (5.2) (Comisión Nacional del Agua, 2007).

La ecuación es válida para tubos de pared delgada. Para el cálculo de la velocidad de propagación "a" se considera que un tubo es de pared delgada si su relación D/δ es igual o mayor que 25.

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{agua}}}{E_{\text{mat}}} \times \frac{D}{\delta}}} \quad (5.2)$$

Donde:

a_0 velocidad del sonido en el agua (m/s)

E_{agua} módulo de elasticidad volumétrica del agua (kg/cm²)

E_{mat} módulo de elasticidad (módulo de Young) del material del tubo (kg/cm²)

D diámetro interior del tubo (in)

δ espesor de la pared del tubo (in)

La velocidad del sonido en el agua (a_0) depende de la temperatura; para conducciones y temperaturas normales la velocidad del sonido en el agua tiene valores de 1425 a 1440 m/s. El módulo de elasticidad del agua es igual a 2.074×10^9 N/m² (2.115×10^4 kg/cm²). El valor de E_{mat} fue considerado de la ficha técnica del tubo de PVC y es igual a 28123 kg/cm².

Aplicando la fórmula para la obtención de la celeridad del material:

$$a = \frac{1440}{\sqrt{1 + \frac{21150}{28123} \times \frac{36}{1.532}}} = 333 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, para los análisis de flujo transitorio del acueducto Conejos-Médanos, se consideró una tubería plástica con un valor promedio de celeridad de 333 m/s.

5.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS

5.4.1 ANÁLISIS DEL ACUEDUCTO UTILIZANDO EL SOFTWARE TRANS

De acuerdo con la hipótesis de que las fallas ocurridas en el acueducto Conejos –Médanos se originaron a partir del cierre rápido de las válvulas de seccionamiento, se procedió a la realización de la simulación de los transitorios hidráulicos en el acueducto utilizando el programa TRANS, empleando los datos presentados en apartados anteriores. Para tal efecto, en el presente análisis se muestran las envolventes de presiones máximas y mínimas generadas de acuerdo a los resultados obtenidos. En la realización de la simulación se consideraron varios escenarios para la simulación de los transitorios.

El primer escenario se simuló cerrando las dos válvulas de seccionamiento o compuerta, una localizada en la entrada del tanque PEC y la otra en la entrada del tanque Altamirano, utilizando un tiempo de cierre de 5 segundos. Este escenario se eligió debido a que el cese repentino del flujo en estos puntos ocasionaría transitorios sobre las líneas 2 y 3. Es importante mencionar, que las válvulas en la entrada de los tanques del sistema analizado no se pueden cerrar en 5 segundos, el objetivo de las simulaciones aquí presentadas es analizar si las presiones transitorias generadas rebasan la presión nominal de los tubos de PVC, que es de 165 (psi) = 116 metros de columna de agua (mca).

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

En el esquema de la Figura 5.15 se muestran las válvulas que se cerraron para generar el transitorio del primer escenario.

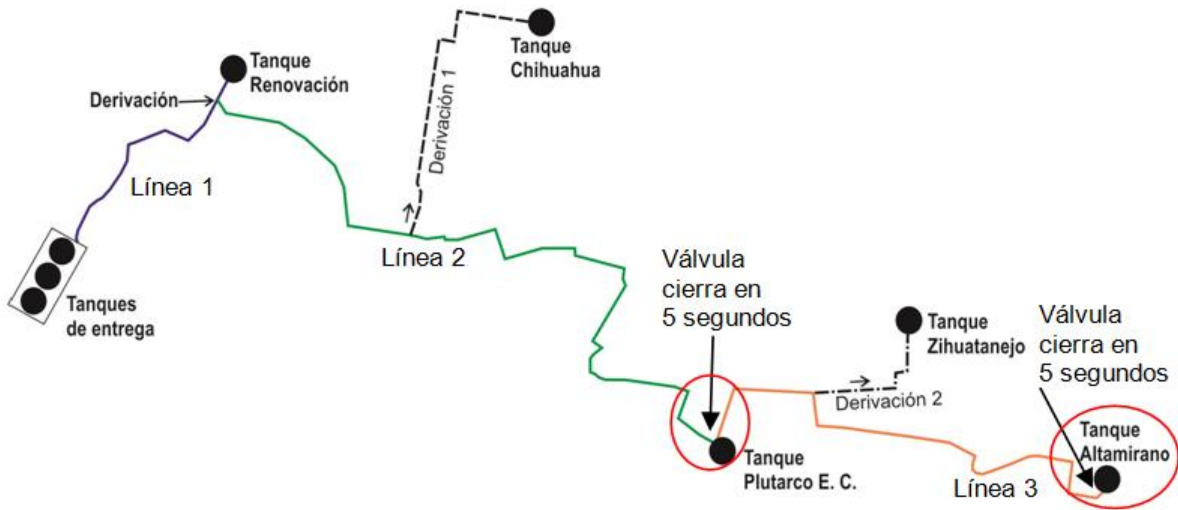


Figura 5.15. Acueducto Conejos-Médanos, válvulas que se cerraron para generar el transitorio del primer escenario.

El segundo escenario se simuló cerrando las tres válvulas de compuerta ubicadas en la entrada de los Tanques Renovación, Chihuahua y Zihuatanejo, igual que en el caso anterior las válvulas cierran en 5 segundos. En el esquema de la

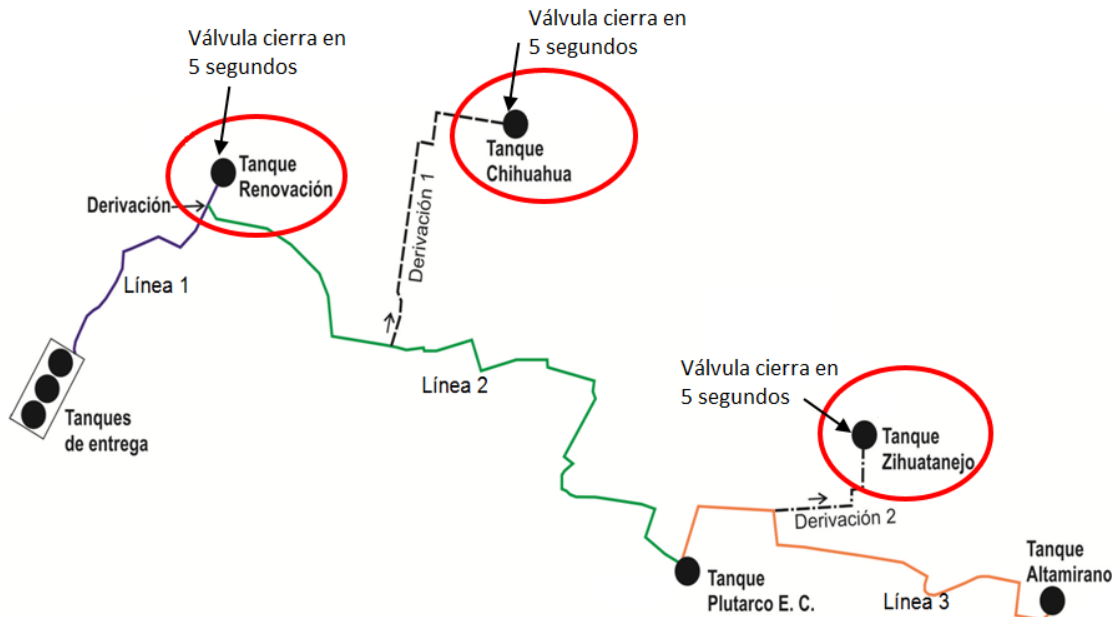


Figura 5.16. Acueducto Conejos-Médanos, válvulas que se cerraron para generar el transitorio del segundo escenario.

Se realizaron simulaciones utilizando 5 gastos representativos para cada escenario, el caudal de diseño (1075 l/s) y los caudales máximos y mínimos de los meses de mayo (1620 l/s y 542 l/s) y julio (972 l/s y 677 l/s). En el mes de julio se registraron fallas en las líneas 2 y 3 con una semana de diferencia entre cada evento, y en el mes de mayo se presentó el mayor gasto de salida en los tanques de entrega. En la Tabla 5.6 se muestra la distribución de gastos en las líneas del acueducto.

Aunado a esto, para la realización de las simulaciones de los dos escenarios, se consideraron las válvulas de aire que se encuentran colocadas actualmente en el acueducto. A continuación se muestran los resultados de las presiones en flujo establecido y en flujo transitorio.

Tabla 5.6. Distribución de los gastos para las simulaciones

Línea	Q (m³/s)				
Tanques de Entrega	0.542	0.677	0.972	1.075	1.62
Derivación					
Derivación	0.154	0.128	0.399	0.415	0.363
Tanque Renovación					
Derivación	0.388	0.549	0.573	0.66	1.257
Derivación 1					
Derivación 1	0.135	0.249	0.267	0.29	0.879
Tanque Chihuahua					
Derivación 1	0.253	0.3	0.306	0.37	0.387
Tanque Plutarco E.C.					
Tanque Plutarco E.C.	0.253	0.3	0.306	0.37	0.387
Derivación 2					
Derivación 2	0.14	0.279	0.131	0.145	0.181
Tanque Zihuatanejo					
Derivación 2	0.113	0.21	0.175	0.225	0.197
Tanque Altamirano					

5.5 ANÁLISIS DE LAS PRESIONES EN FLUJO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO

Con los valores de presión en flujo establecido y transitorio obtenidos de las simulaciones, se calcularon las presiones en ambos regímenes en los puntos donde ocurrieron las roturas de los tubos en el acueducto, para después compararlas con la presión nominal de los tubos de PVC que es de 165 psi (11.6 kg/cm² = 116 mca). Estos datos se obtuvieron midiendo la distancia vertical desde el eje del tubo en el punto donde ocurrió cada falla hasta las envolventes de presión, como se muestra en la Figura 5.17.

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

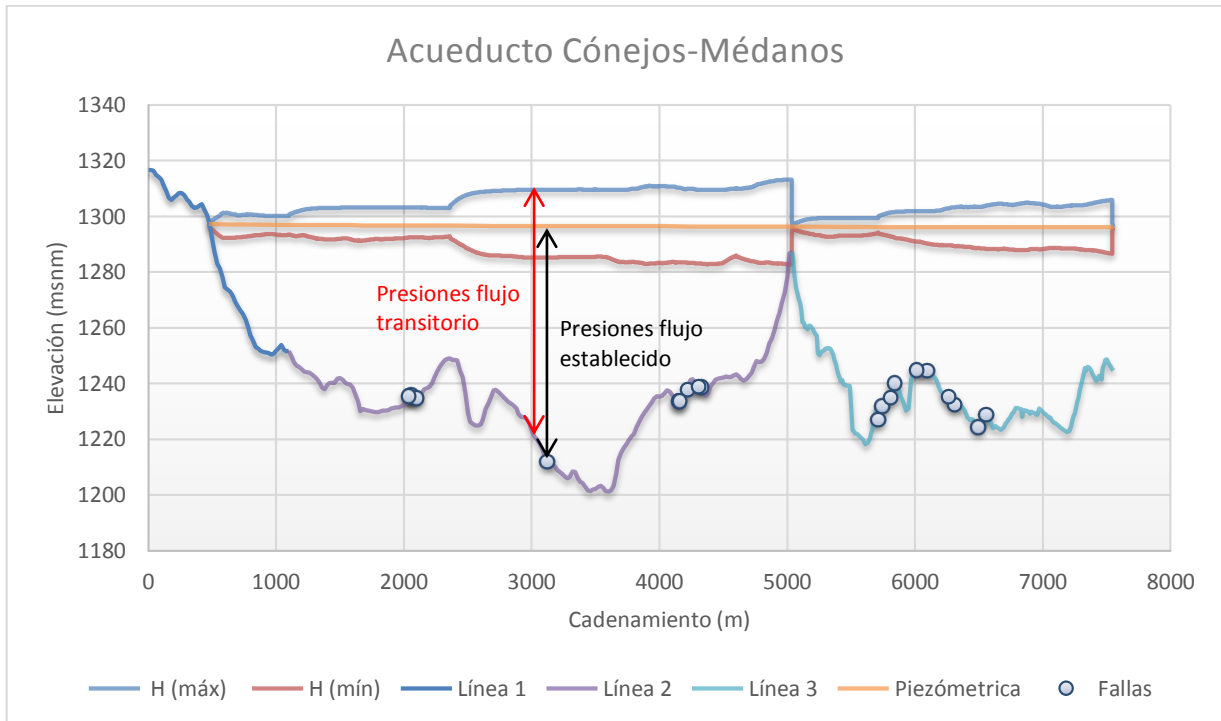


Figura 5.17. Presiones a flujo establecido y transitorio registradas en cada punto donde ocurrió una falla.

5.6 RESULTADOS PARA EL ESCENARIO 1

5.6.1 Gasto de diseño, 1075 l/s

Como se observa en la Figura 5.18, la envolvente de cargas mínimas se ubica por encima del perfil de la conducción a excepción de los últimos 50 m de la línea 2; esto quiere decir, que sólo llegan a producirse presiones negativas al final de esta línea, muy cerca del tanque PEC. Es importante mencionar, que es poco probable que la tubería del acueducto colapse debido al fenómeno de cavitación, debido a que los tubos de PVC están enterrados a una profundidad promedio de tres metros, además el material del conducto acepta deformaciones importantes.

Por otra parte, la envolvente de cargas máximas excede a la línea piezométrica o envolvente de presiones en flujo establecido hasta en 19.6 (mca) en algunos puntos del acueducto. Se destaca que las sobrepresiones máximas se obtienen en la línea 2, después de la derivación al tanque Chihuahua hasta el Tanque PEC, y en la línea 3 después de la derivación al tanque Zihuatanejo hasta el tanque Altamirano.

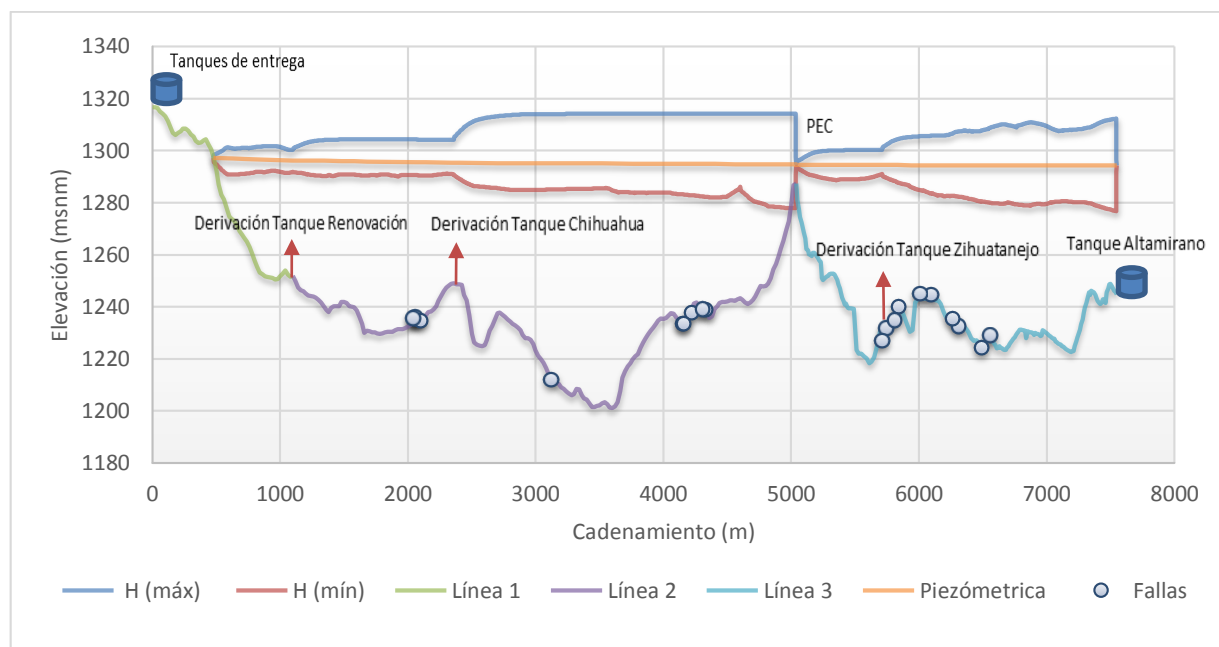


Figura 5.18. Envoltorios máximos y mínimos producidos para un gasto de 1075 l/s escenario 1.

En la Tabla 5.7 se resumen las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 1075 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.7. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio ($Q = 1075$ l/s)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 1	4+150	1233.49	62.25	88.55	70.86	100.79
Falla 2	4+330	1238.82	56.86	80.88	65.55	93.23
Falla 3	4+220	1237.7	57.95	82.42	66.59	94.72
Falla 4	2+060	1235.5	52.20	74.25	56.71	80.66
Falla 5	4+310	1239	56.53	80.40	65.20	92.74
Falla 6	3+125	1212	61.03	86.81	69.64	99.06
Falla 7	2+060	1237.92	60.99	86.75	66.01	93.89
Falla 8	4+160	1233.55	62.11	88.34	70.73	100.60
Falla 9	2+100	1234.74	61.74	87.81	66.72	94.89
Falla 10	2+040	1235.5	62.07	88.28	67.17	95.54
Falla 11	6+560	1228.89	67.12	95.47	76.13	108.28
Falla 12	5+745	1230.86	62.77	89.28	71.77	102.08
Falla 13	5+842	1240.06	55.23	78.56	64.24	91.37
Falla 14	6+312	1232.5	65.56	93.25	74.60	106.10
Falla 15	5+810	1234	59.44	84.54	68.44	97.35
Falla 16	5+710	1227	68.32	97.17	77.32	109.97
Falla 17	6+094	1244.6	50.04	71.17	59.05	83.99
Falla 18	6+010	1244.9	50.36	71.63	59.38	84.45
Falla 19	6+262	1235.38	60.93	86.67	69.93	99.46
Falla 20	6+494	1224.31	66.18	94.13	78.07	111.05

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

5.6.2 Gasto máximo julio, 972 l/s

Como se observa en la Figura 5.19, la envolvente de cargas mínimas se ubica por encima del perfil de la conducción, a excepción de los últimos 25 m de la línea 2, en estos metros de tubería se producen presiones negativas. La envolvente de cargas máximas excede la línea piezométrica hasta en 16.8 (mca) en algunos puntos del acueducto. Además, se ve un incremento de las presiones máximas y mínimas en las líneas 2 y 3, desde las derivaciones 1 y 2 y hasta los tanques PEC y Altamirano, respectivamente.

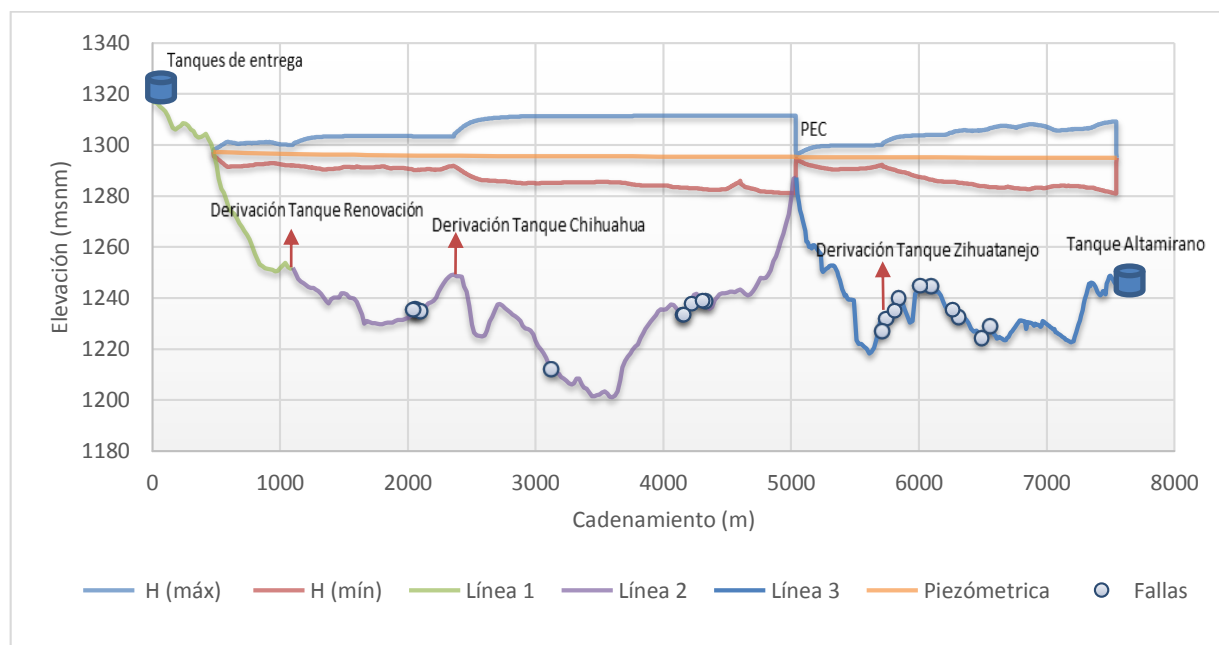


Figura 5.19. Envolventes máximas y mínimas producidas para un gasto de 972 l/s escenario 1.

En la Tabla 5.8 se presentan las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 972 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.8. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio ($Q = 972$ l/s)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 1	4+150	1233.49	62.25	88.55	70.04	99.62
Falla 2	4+330	1238.82	56.86	80.88	64.71	92.04
Falla 3	4+220	1237.7	57.95	82.42	65.77	93.54
Falla 4	2+060	1235.5	52.20	74.25	55.93	79.55
Falla 5	4+310	1239	56.53	80.40	64.37	91.56
Falla 6	3+125	1212	61.03	86.81	68.82	97.89
Falla 7	2+060	1237.92	60.99	86.75	64.97	92.40
Falla 8	4+160	1233.55	62.11	88.34	69.91	99.43
Falla 9	2+100	1234.74	61.74	87.81	65.59	93.29
Falla 10	2+040	1235.5	62.07	88.28	66.09	94.00
Falla 11	6+560	1228.89	67.12	95.47	75.33	107.15
Falla 12	5+745	1230.86	62.77	89.28	70.94	100.91
Falla 13	5+842	1240.06	55.23	78.56	63.41	90.20
Falla 14	6+312	1232.5	65.56	93.25	73.84	105.02
Falla 15	5+810	1234	59.44	84.54	67.62	96.18
Falla 16	5+710	1227	68.32	97.17	76.49	108.79
Falla 17	6+094	1244.6	50.04	71.17	58.24	82.84

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 18	6+010	1244.9	50.36	71.63	58.56	83.29
Falla 19	6+262	1235.38	60.93	86.67	69.12	98.32
Falla 20	6+494	1224.31	66.18	94.13	76.88	109.35

5.6.3 Gasto mínimo julio, 677 l/s

En la Figura 5.20, la envolvente de cargas mínimas se ubica por encima del perfil de la conducción, a excepción de los últimos 10 m de la línea 2. La envolvente de cargas máximas excede la línea piezométrica hasta en 18.39 (mca) en algunos puntos del acueducto. Sin embargo, las envolventes de presiones máximas y mínimas en la línea 3 son menores en comparación con las de la línea 2.

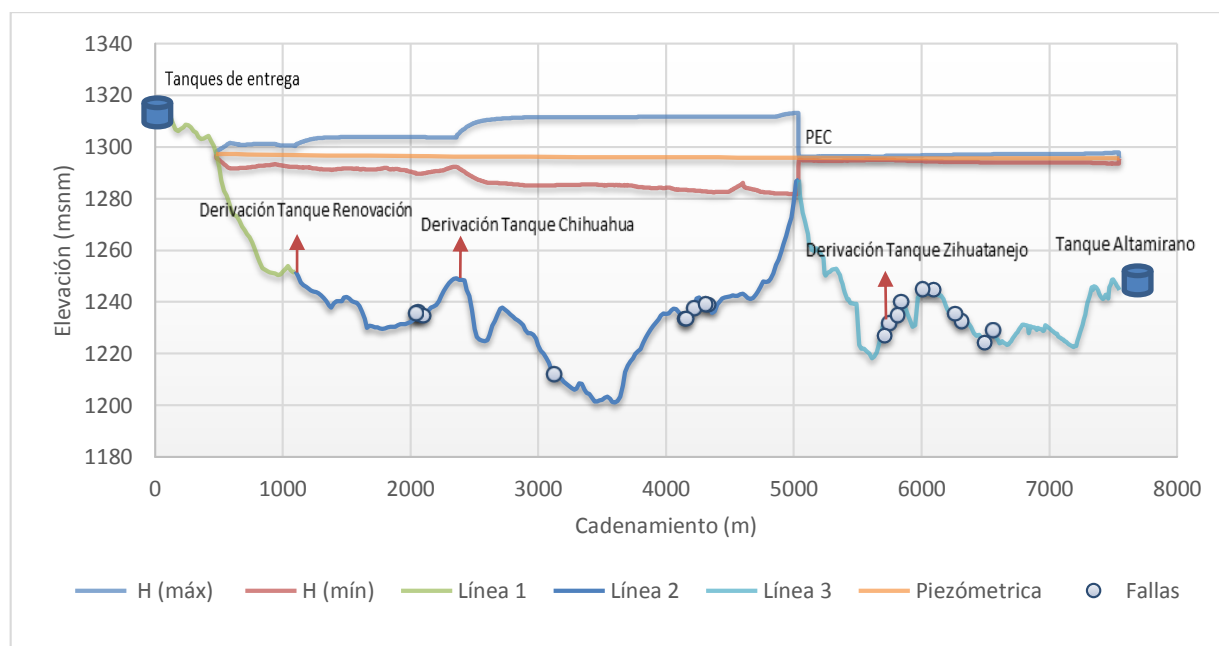


Figura 5.20. Envolventes máximas y mínimas producidas para un gasto de 677 l/s escenario 1.

En la Tabla 5.9 se muestran las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 677 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.9. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio (Q = 677 l/s)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 1	4+150	1233.49	62.254	88.55	70.35	100.06
Falla 2	4+330	1238.82	56.863	80.88	65.02	92.48
Falla 3	4+220	1237.7	57.950	82.42	66.07	93.98
Falla 4	2+060	1235.5	52.201	74.25	56.24	79.99
Falla 5	4+310	1239	56.526	80.40	64.68	91.99
Falla 6	3+125	1212	61.034	86.81	69.13	98.32
Falla 7	2+060	1237.92	60.991	86.75	65.07	92.55
Falla 8	4+160	1233.55	62.111	88.34	70.21	99.86
Falla 9	2+100	1234.74	61.735	87.81	65.71	93.47
Falla 10	2+040	1235.5	62.069	88.28	66.18	94.13

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 11	6+560	1228.89	67.124	95.47	75.66	107.61
Falla 12	5+745	1230.86	62.770	89.28	71.26	101.35
Falla 13	5+842	1240.06	55.232	78.56	63.73	90.65
Falla 14	6+312	1232.5	65.558	93.25	74.16	105.49
Falla 15	5+810	1234	59.439	84.54	67.93	96.62
Falla 16	5+710	1227	68.317	97.17	76.80	109.24
Falla 17	6+094	1244.6	50.040	71.17	58.56	83.29
Falla 18	6+010	1244.9	50.364	71.63	58.88	83.74
Falla 19	6+262	1235.38	60.933	86.67	69.44	98.77
Falla 20	6+494	1224.31	66.180	94.13	77.17	109.76

5.6.4 Gasto máximo mayo, 1620 l/s

Como se muestra en la Figura 5.21, la envolvente de cargas mínimas se ubica por encima del perfil de la conducción a excepción de los últimos 50 m de la línea 2, esto quiere decir, que se producen presiones negativas al final de la línea, muy cerca del tanque PEC. Si bien se considera que el suelo que recubre la tubería de PVC está bien compactado, y que los tubos plásticos son poco propensos a fallar por aplastamiento, sería necesario colocar a la entrada del Tanque PEC una válvula de admisión y expulsión de aire para no provocarle al conducto una falla por fatiga.

Por otra parte, la envolvente de cargas máximas excede la piezométrica hasta en 18.39 (mca) en algunos puntos del acueducto. Como se observa, las líneas 2 y 3 están afectadas por el transitorio, sin embargo las presiones máximas se obtienen en la línea 2, después de la derivación al tanque Chihuahua hasta el Tanque PEC, y en la línea 3 después de la derivación al tanque Zihuatanejo hasta el tanque Altamirano.

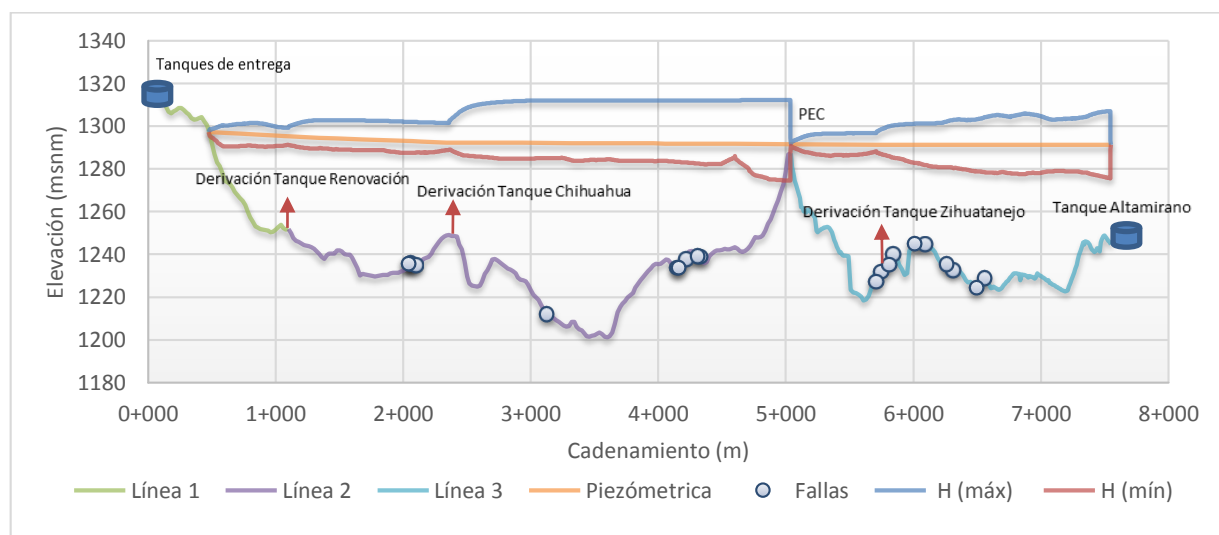


Figura 5.21. Envolventes máximas y mínimas producidas para un gasto de 1620 l/s escenario 1.

En la Tabla 5.10 se resumen las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 1620 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.10. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio ($Q = 1620$ l/s)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 1	4+150	1233.49	62.25	88.55	69.32	98.60
Falla 2	4+330	1238.82	56.86	80.88	63.99	91.02
Falla 3	4+220	1237.7	57.95	82.42	65.03	92.49
Falla 4	2+060	1235.5	52.20	74.25	55.26	78.61
Falla 5	4+310	1239	56.53	80.40	63.66	90.54
Falla 6	3+125	1212	61.03	86.81	68.10	96.87
Falla 7	2+060	1237.92	60.99	86.75	64.55	91.81
Falla 8	4+160	1233.55	62.11	88.34	69.18	98.40
Falla 9	2+100	1234.74	61.74	87.81	65.17	92.70
Falla 10	2+040	1235.5	62.07	88.28	65.70	93.45
Falla 11	6+560	1228.89	67.12	95.47	73.71	104.84
Falla 12	5+745	1230.86	62.77	89.28	69.60	99.00
Falla 13	5+842	1240.06	55.23	78.56	62.04	88.23
Falla 14	6+312	1232.5	65.56	93.25	71.93	102.31
Falla 15	5+810	1234	59.44	84.54	66.26	94.24
Falla 16	5+710	1227	68.32	97.17	75.16	106.90
Falla 17	6+094	1244.6	50.04	71.17	56.77	80.75
Falla 18	6+010	1244.9	50.36	71.63	57.13	81.25
Falla 19	6+262	1235.38	60.93	86.67	67.59	96.14
Falla 20	6+494	1224.31	66.18	94.13	75.51	107.40

5.6.5 Gasto mínimo mayo, 542 l/s

En la Figura 5.22 se muestra que la envolvente de cargas mínimas se ubica por encima del perfil de la conducción, a excepción de los últimos 10 m de la línea 2. Como se ha mencionado anteriormente esto no ocasionaría el colapso de la tubería. Por otra parte, la envolvente de cargas máximas excede la línea piezométrica hasta en 18.56 (mca) en algunos puntos de la conducción.

De igual manera que en los cuatro casos anteriores, se observa un incremento de las presiones máximas y mínimas en las líneas 2 y 3, desde las derivaciones 1 y 2 y hasta los tanques PEC y Altamirano, respectivamente.

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

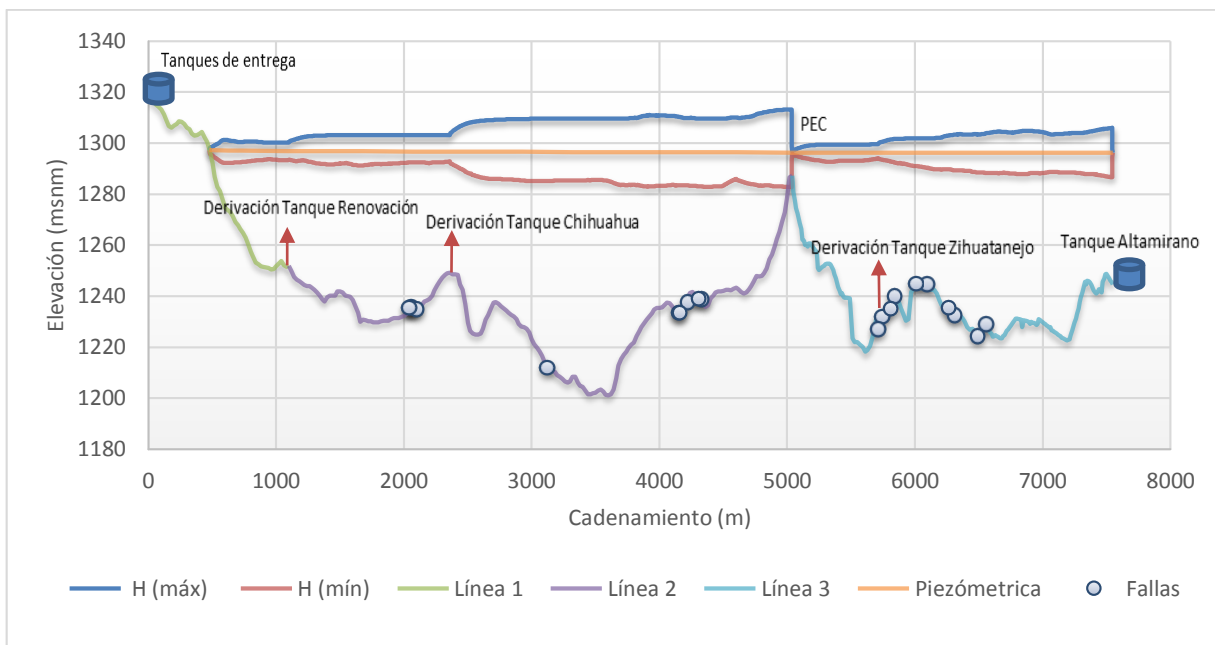


Figura 5.22. Envoltentes máximas y mínimas producidas para un gasto de 542 l/s escenario 1.

En la Tabla 5.11 se presentan las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 542 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.11. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio ($Q = 542$ l/s)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 1	4+150	1233.49	63.39	90.17	69.72	99.17
Falla 2	4+330	1238.82	58.02	82.53	64.39	91.58
Falla 3	4+220	1237.7	59.10	84.06	65.44	93.08
Falla 4	2+060	1235.5	52.57	74.78	56.04	79.71
Falla 5	4+310	1239	57.69	82.05	64.05	91.10
Falla 6	3+125	1212	61.88	88.02	68.50	97.43
Falla 7	2+060	1237.92	61.31	87.20	64.76	92.10
Falla 8	4+160	1233.55	63.25	89.97	69.59	98.97
Falla 9	2+100	1234.74	62.06	88.28	65.51	93.18
Falla 10	2+040	1235.5	62.38	88.73	65.83	93.62
Falla 11	6+560	1228.89	68.40	97.28	75.10	106.81
Falla 12	5+745	1230.86	63.96	90.98	70.66	100.51
Falla 13	5+842	1240.06	56.44	80.27	63.14	89.81
Falla 14	6+312	1232.5	66.90	95.16	73.64	104.74
Falla 15	5+810	1234	60.64	86.25	67.34	95.78
Falla 16	5+710	1227	69.51	98.86	76.21	108.39
Falla 17	6+094	1244.6	51.27	72.92	57.98	82.47
Falla 18	6+010	1244.9	51.58	73.37	58.29	82.91
Falla 19	6+262	1235.38	62.18	88.44	68.87	97.96
Falla 20	6+494	1224.31	67.34	95.78	76.32	108.55

5.7 RESULTADOS PARA ESCENARIO 2

5.7.1 Gasto de Diseño, 1075 l/s

Como se puede observar en la Figura 5.23, la envolvente de presiones mínimas se ubica por encima del perfil de la conducción, esto quiere decir que el transitorio no produce presiones negativas a lo largo de la conducción.

Por otra parte, la envolvente de presiones máximas excede la línea piezométrica hasta en 20.98 (mca) en algunos puntos de la conducción. Las mayores presiones transitorias ocurren en las líneas 1 y 2. El caso contrario se presenta en la línea 3, donde las presiones máximas rebasan a la línea piezométrica sólo por 5 (mca).

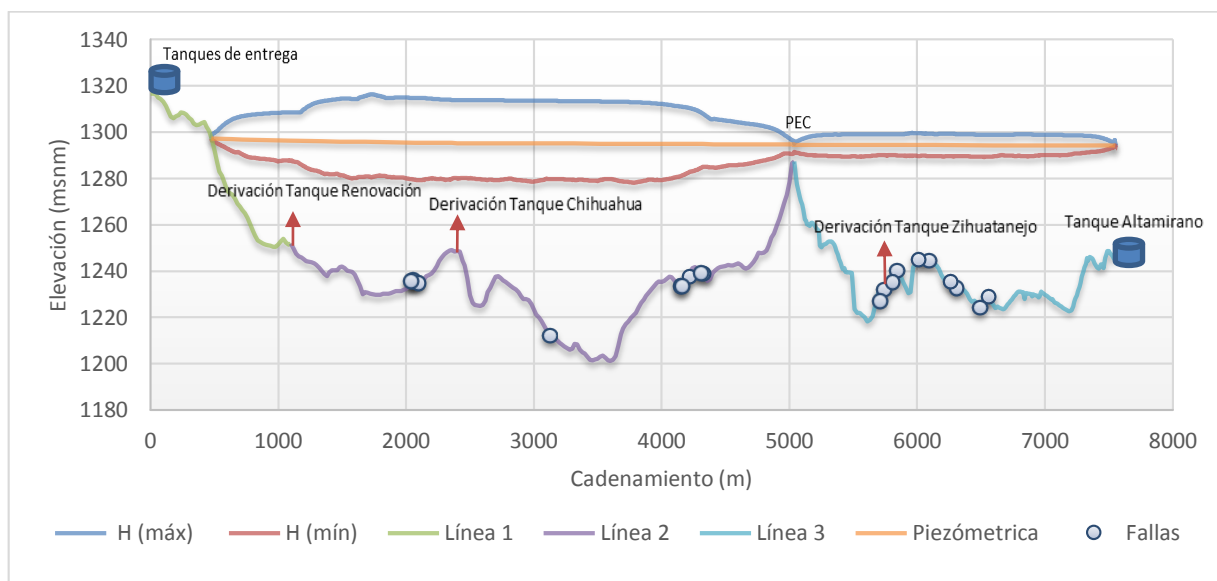


Figura 5.23. Envolventes máximas y mínimas producidas para un gasto de 1075 l/s escenario 2.

En la Tabla 5.12 se presentan las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 1075 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.12. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio ($Q = 1075$ l/s)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 1	4+150	1233.49	62.25	88.55	80.99	115.19
Falla 2	4+330	1238.82	56.86	80.88	75.81	107.83
Falla 3	4+220	1237.7	57.95	82.42	76.82	109.27
Falla 4	2+060	1235.5	52.20	74.25	64.24	91.37
Falla 5	4+310	1239	56.53	80.40	75.53	107.43
Falla 6	3+125	1212	61.03	86.81	79.77	113.45
Falla 7	2+060	1237.92	60.99	86.75	72.84	103.61
Falla 8	4+160	1233.55	62.11	88.34	80.88	115.04
Falla 9	2+100	1234.74	61.74	87.81	73.63	104.72
Falla 10	2+040	1235.5	62.07	88.28	73.90	105.11
Falla 11	6+560	1228.89	67.12	95.47	86.52	123.06
Falla 12	5+745	1230.86	62.77	89.28	82.45	117.27
Falla 13	5+842	1240.06	55.23	78.56	74.86	106.48

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUEDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 14	6+312	1232.5	65.56	93.25	84.46	120.12
Falla 15	5+810	1234	59.44	84.54	79.09	112.49
Falla 16	5+710	1227	68.32	97.17	88.02	125.19
Falla 17	6+094	1244.6	50.04	71.17	69.54	98.91
Falla 18	6+010	1244.9	50.36	71.63	69.88	99.40
Falla 19	6+262	1235.38	60.93	86.67	80.44	114.41
Falla 20	6+494	1224.31	66.18	94.13	84.88	120.73

5.7.2 Gasto máximo julio, 972 l/s

En la Figura 5.24 se muestra, la envolvente de cargas mínimas se ubica por encima del perfil de la conducción. Por otra parte, la envolvente de cargas máximas excede la piezométrica hasta en 20.26 (mca) en algunos puntos del acueducto. Las presiones máximas se presentaron en la línea 1 y 2, y en la línea 3 las presiones apenas rebasan la piezométrica en 3 (mca).

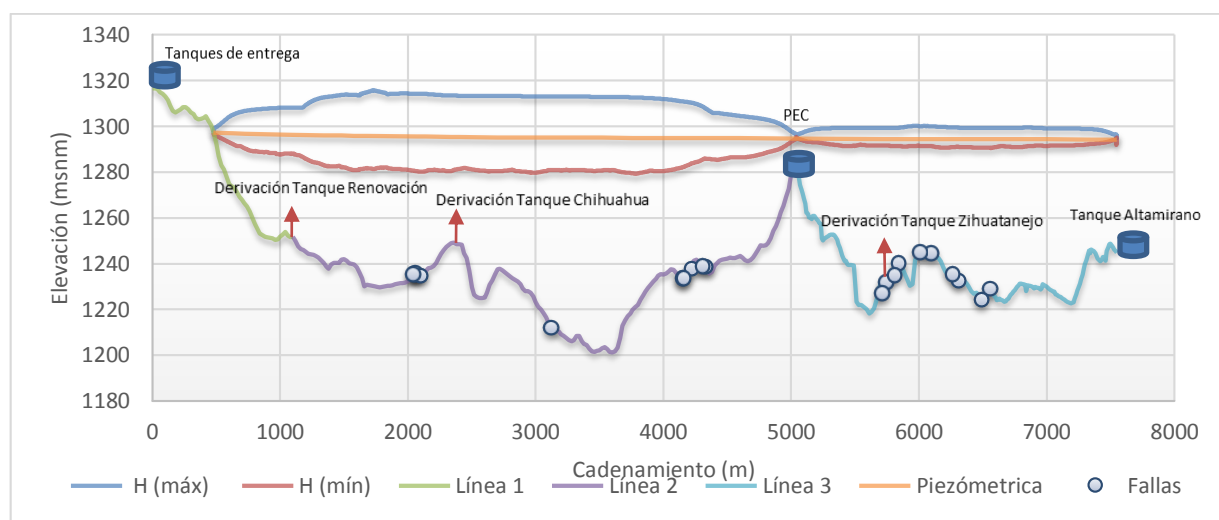


Figura 5.24. Envolventes máximas y mínimas producidas para un gasto de 972 l/s escenario 2.

En la Tabla 5.13 se resumen las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 972 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.13. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio ($Q = 972$ l/s)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 1	4+150	1233.49	62.25	88.55	80.28	114.19
Falla 2	4+330	1238.82	56.86	80.88	75.11	106.83
Falla 3	4+220	1237.7	57.95	82.42	76.12	108.26
Falla 4	2+060	1235.5	52.20	74.25	63.96	90.97
Falla 5	4+310	1239	56.53	80.40	74.82	106.42
Falla 6	3+125	1212	61.03	86.81	79.06	112.45
Falla 7	2+060	1237.92	60.99	86.75	72.56	103.20
Falla 8	4+160	1233.55	62.11	88.34	80.17	114.03
Falla 9	2+100	1234.74	61.74	87.81	73.35	104.32
Falla 10	2+040	1235.5	62.07	88.28	73.62	104.71
Falla 11	6+560	1228.89	67.12	95.47	85.96	122.27

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 12	5+745	1230.86	62.77	89.28	81.85	116.41
Falla 13	5+842	1240.06	55.23	78.56	74.26	105.63
Falla 14	6+312	1232.5	65.56	93.25	83.93	119.38
Falla 15	5+810	1234	59.44	84.54	78.49	111.63
Falla 16	5+710	1227	68.32	97.17	87.41	124.33
Falla 17	6+094	1244.6	50.04	71.17	68.96	98.08
Falla 18	6+010	1244.9	50.36	71.63	69.29	98.56
Falla 19	6+262	1235.38	60.93	86.67	79.86	113.59
Falla 20	6+494	1224.31	66.18	94.13	84.36	119.99

5.7.3 Gasto mínimo julio, 677 l/s

En la Figura 5.25, la envolvente de presiones mínimas se ubica por encima del perfil de la conducción, esto quiere decir que el transitorio no produce presiones negativas a lo largo de la conducción. La envolvente de presiones máximas en la línea 2 excede la piezométrica hasta en 12.57 (mca) en algunos puntos de la conducción. En el caso de la línea 3 las presiones máximas rebasan hasta en 10.19 (mca) a la envolvente de presiones estacionarias.

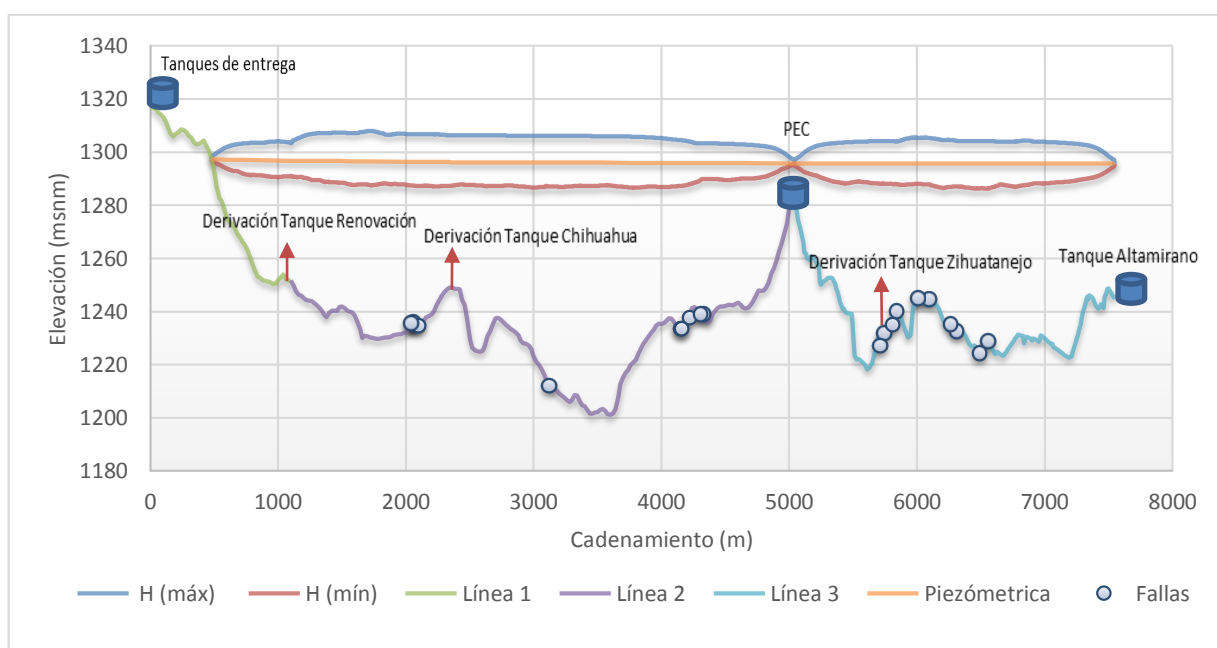


Figura 5.25. Envoltentes máximas y mínimas producidas para un gasto de 677 l/s escenario 2.

En la Tabla 5.14 se presentan las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 677 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.14. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio ($Q = 677$ l/s)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 1	4+150	1233.49	62.25	88.55	73.95	105.18
Falla 2	4+330	1238.82	56.86	80.88	68.58	97.54
Falla 3	4+220	1237.7	57.95	82.42	69.68	99.11

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 4	2+060	1235.5	52.20	74.25	59.79	85.04
Falla 5	4+310	1239	56.53	80.40	68.29	97.13
Falla 6	3+125	1212	61.03	86.81	72.73	103.45
Falla 7	2+060	1237.92	60.99	86.75	68.54	97.49
Falla 8	4+160	1233.55	62.11	88.34	73.82	104.99
Falla 9	2+100	1234.74	61.74	87.81	69.33	98.61
Falla 10	2+040	1235.5	62.07	88.28	69.60	98.99
Falla 11	6+560	1228.89	67.12	95.47	78.69	111.93
Falla 12	5+745	1230.86	62.77	89.28	74.35	105.75
Falla 13	5+842	1240.06	55.23	78.56	66.79	94.99
Falla 14	6+312	1232.5	65.56	93.25	76.89	109.36
Falla 15	5+810	1234	59.44	84.54	71.00	100.99
Falla 16	5+710	1227	68.32	97.17	79.91	113.66
Falla 17	6+094	1244.6	50.04	71.17	61.52	87.50
Falla 18	6+010	1244.9	50.36	71.63	61.84	87.96
Falla 19	6+262	1235.38	60.93	86.67	72.46	103.06
Falla 20	6+494	1224.31	66.18	94.13	77.33	109.98

5.7.4 Gasto máximo mayo, 1620 l/s

La Figura 5.26 muestra la envolvente de presiones mínimas, la cual se ubica por encima del perfil de la conducción. La envolvente de presiones máximas excede la piezométrica provocando unas sobrepresiones de hasta 33.34 (mca) en algunos puntos de las líneas 1 y 2. En el mismo sentido, las presiones máximas generadas por el cierre de las válvulas en la línea 3, llegan a alcanzar un valor de 9 (mca) con respecto de la envolvente de presiones estacionarias.

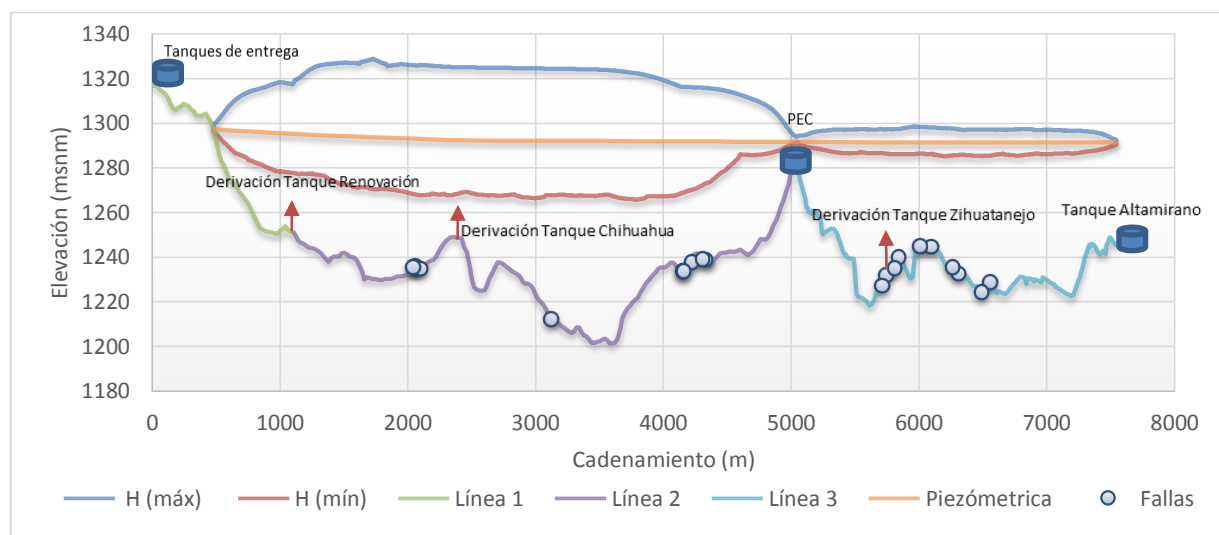


Figura 5.26. Envolventes máximas y mínimas producidas para un gasto de 1620 l/s escenario 2.

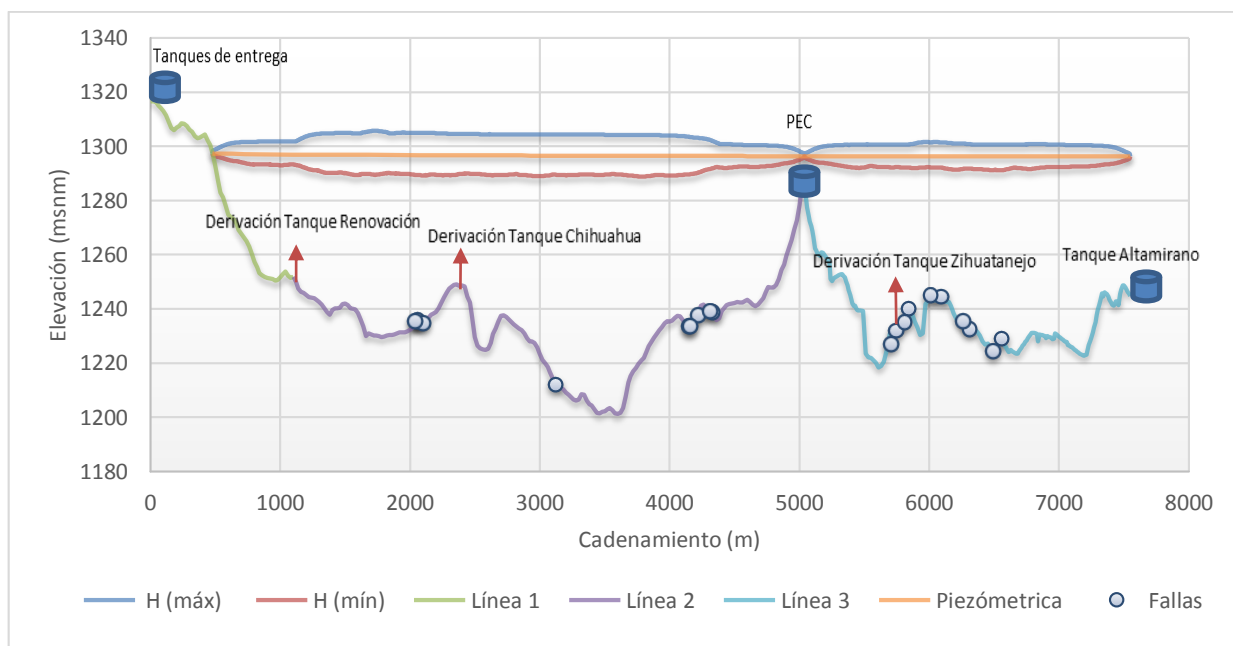
En la Tabla 5.15 se muestran las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 1620 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.15. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio ($Q = 1620 \text{ l/s}$)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (psi)	Presión Transitoria (mca)
Falla 1	4+150	1233.49	62.25	88.55	93.64	133.19
Falla 2	4+330	1238.82	56.86	80.88	88.33	125.63
Falla 3	4+220	1237.7	57.95	82.42	89.45	127.23
Falla 4	2+060	1235.5	52.20	74.25	73.98	105.23
Falla 5	4+310	1239	56.53	80.40	88.12	125.34
Falla 6	3+125	1212	61.03	86.81	92.42	131.45
Falla 7	2+060	1237.92	60.99	86.75	82.66	117.57
Falla 8	4+160	1233.55	62.11	88.34	93.53	133.03
Falla 9	2+100	1234.74	61.74	87.81	83.57	118.87
Falla 10	2+040	1235.5	62.07	88.28	83.64	118.97
Falla 11	6+560	1228.89	67.12	95.47	97.77	139.06
Falla 12	5+745	1230.86	62.77	89.28	93.72	133.30
Falla 13	5+842	1240.06	55.23	78.56	86.10	122.46
Falla 14	6+312	1232.5	65.56	93.25	95.67	136.08
Falla 15	5+810	1234	59.44	84.54	90.33	128.48
Falla 16	5+710	1227	68.32	97.17	99.33	141.28
Falla 17	6+094	1244.6	50.04	71.17	80.71	114.80
Falla 18	6+010	1244.9	50.36	71.63	81.04	115.27
Falla 19	6+262	1235.38	60.93	86.67	91.68	130.40
Falla 20	6+494	1224.31	66.18	94.13	96.08	136.65

5.7.5 Gasto mínimo mayo, 542 l/s

Como se puede observar en la Figura 5.27, la envolvente de cargas mínimas se ubica por encima del perfil de la conducción. Por otra parte, la envolvente de cargas máximas excede a la piezométrica hasta en 10.32 (mca) en algunos puntos del acueducto.

**Figura 5.27. Envolventes máximas y mínimas producidas para un gasto de 542 l/s escenario 2.**

CASO DE ESTUDIO DE LAS ROTURAS DE LA TUBERÍA PLÁSTICA DEL ACUDUCTO CONEJOS-MÉDANOS POR PROPAGACIÓN RÁPIDA DE FALLA

En la Tabla 5.16 se resumen las presiones en flujo estacionario y transitorio para un gasto de 542 l/s, en los puntos en donde ocurrieron las fallas.

Tabla 5.16. Fallas y presiones en flujo estacionario y transitorio ($Q = 542 \text{ l/s}$)

Número de falla	Cadenamiento	Elevación (msnm)	Presión estacionaria (mca)	Presión estacionaria (psi)	Presión Transitoria (mca)	Presión Transitoria (psi)
Falla 1	4+150	1233.49	62.25	88.55	71.56	101.79
Falla 2	4+330	1238.82	56.86	80.88	66.23	94.21
Falla 3	4+220	1237.7	57.95	82.42	67.31	95.73
Falla 4	2+060	1235.5	52.20	74.25	57.59	81.91
Falla 5	4+310	1239	56.53	80.40	65.92	93.76
Falla 6	3+125	1212	61.03	86.81	70.34	100.05
Falla 7	2+060	1237.92	60.99	86.75	66.29	94.29
Falla 8	4+160	1233.55	62.11	88.34	71.43	101.60
Falla 9	2+100	1234.74	61.74	87.81	67.05	95.37
Falla 10	2+040	1235.5	62.07	88.28	67.36	95.81
Falla 11	6+560	1228.89	67.12	95.47	76.83	109.28
Falla 12	5+745	1230.86	62.77	89.28	72.49	103.10
Falla 13	5+842	1240.06	55.23	78.56	64.93	92.36
Falla 14	6+312	1232.5	65.56	93.25	75.02	106.70
Falla 15	5+810	1234	59.44	84.54	69.15	98.35
Falla 16	5+710	1227	68.32	97.17	78.04	111.00
Falla 17	6+094	1244.6	50.04	71.17	59.69	84.89
Falla 18	6+010	1244.9	50.36	71.63	60.01	85.36
Falla 19	6+262	1235.38	60.93	86.67	70.61	100.43
Falla 20	6+494	1224.31	66.18	94.13	75.46	107.32

6. CONCLUSIONES

Las tuberías termoplásticas son un material popular principalmente debido a su bajo costo, facilidad de fabricación (por lo general por extrusión), y durabilidad, lo que la ha provocado que su uso vaya en aumento.

Los tubos termoplásticos tienen la más amplia gama de aplicaciones que las de otro tipo de material, que las hacen diferentes significativamente en sus características y usos. Actualmente, este tipo de tuberías han sustituido en gran medida a otros materiales con los que por años se han construido los acueductos en todo el mundo. Este cambio se debe, entre otras cosas, a los ahorros en los costos de instalación, mano de obra y equipo, en comparación con los materiales de tuberías tradicionales. Aunado a esto, los tubos termoplásticos tienen el potencial de reducir los gastos de mantenimiento y tienen una mayor vida útil. Sus usos y aplicaciones se han extendido, así como sus diámetros, por lo que han jugado un papel importante en el crecimiento de la industria.

El cloruro de polivinilo (PVC) constituye la mayor parte del mercado de la tubería termoplástica; el polietileno (PE) es el segundo más popular. Los termoplásticos difieren significativamente en sus propiedades y su idoneidad dependiendo del uso.

Las roturas del tipo Propagación Rápida de Falla son comunes en tuberías de PVC, éstas se pueden extender por cientos de metros si los tubos fueron unidos por fusión a tope ya que la grieta continuará propagándose a través de la articulación. Esto está confirmado por la experiencia de campo, donde se han observado algunas fallas longitudinales de varios metros en las tuberías de PVC.

Las tuberías de PVC que están unidas mediante juntas de espiga-campana ofrecen una propagación limitada a las roturas del tipo PRF debido a la presencia de la articulación.

Para evitar PRF en las tuberías plásticas, es recomendable seleccionar un RD mínimo de 13 para evitar Propagación Rápida de Falla en un tubo de PVC. Con un RD superior (pared más delgada), es posible que ocurra la aparición de PRF. De acuerdo a las fallas ocurridas en campo, es común que ocurra Propagación Rápida de Falla en tuberías con un RD de entre 25 y 18.

Cuando la tubería se expone a la prueba de presión hidrostática, el PVC es susceptible a la PRF, porque la tubería está sujeta una presión mayor que la nominal. La presión de la prueba de presión hidrostática debe de realizarse por debajo de la presión crítica de PRF para evitar fallas.

Caso de Estudio

Se presentó un caso de estudio en el cual ocurrieron 20 roturas entre los años 2011 y 2013. La hipótesis que se consideró, es que las fallas ocurridas en el acueducto Conejos-Médanos pudieron deberse a fenómenos transitorios ocasionados por el cierre de una válvula o varias válvulas, que originaron sobrepresiones.

El acueducto fue analizado para el caso de los transitorios producidos por el cierre rápido de las válvulas de compuerta en la entrada de los tanques del sistema. Las envolventes de presiones máximas y mínimas que se produjeron con el cierre de las válvulas, dependen del tiempo de cierre, del gasto de

agua y de la longitud de la conducción. Éstas son mayores cuando el tiempo de cierre es menor. Para el caso de estudio se determinó que el tiempo de cierre para las válvulas sería de 5 segundos.

En cada simulación se obtuvieron las presiones para flujo transitorio y se obtuvieron las piezométricas para cada línea de conducción. Con los datos obtenidos, se calcularon las presiones generadas en los puntos de falla y se llegó a la conclusión de que en ninguno de los escenarios se sobrepasaron las presiones nominales de la tubería, en este caso es de 165 psi = 116 mca.

Por otro lado, los tubos que fallaron de la marca JM Eagle, fueron llevados a un laboratorio del fabricante en los Estados Unidos donde se les practicaron las pruebas de presión de corta duración correspondientes a la norma AWWA C905-97, además las muestras de tubo se sometieron a la prueba de inmersión en acetona (ASTM D-2152), que se utiliza para conocer la calidad de la extrusión. Todos los tubos pasaron las pruebas satisfactoriamente.

Por todo lo anterior se puede concluir que los tubos de la marca JM Eagle pudieron haber tenido defectos de fabricación. Lo que generó las roturas del tipo PRF, las mismas se producen en general bajo cargas normales de servicio, muchas veces inferiores a las de diseño. Por tal motivo, la fractura rápida no es precedida por deformaciones macroscópicas que permitan tomar medidas para evitarla o para reducir la gravedad de sus consecuencias. Una vez iniciada, pocas veces se detiene antes de producir la rotura completa de la tubería; es decir, las fallas que se presentaron no ocurrieron por la mala operación hidráulica del sistema, si no por fallas en la fabricación de los materiales o en las materias primas.

Las características que adopta en general la falla por fractura rápida, y que explican en parte el alto costo en vidas y bienes frecuentemente asociados se debe principalmente a que, la falla se produce de manera totalmente sorpresiva y progresa a muy alta velocidad, típicamente entre algunos centenares y algunos miles de metros por segundo.

REFERENCIAS

- AWWA, 2002. Manual M23, PVC Pipe - Design and Instalation.. USA: American Water Works Association.
- AWWA, 2004. *C-104, Cement–Mortar Lining for Ductile-Iron Pipe and Fittings for Water*. USA: American Water Works Association.
- AWWA, 2010. *C905-10 Polyvinyl Chloride (PVC) Pressure Pipe and Fabricated Fittings, 14 In. Through 48 In. (350 mm Through 1,200 mm) for Water Transmission and Distribution*. USA: American Water Works Association.
- AWWA, 2015. *C203-1, Coal-Tar Protective Coatings and Linings for Steel Water Pipe*. USA: American Water Works Association.
- Bernal-Lara, T. E. y otros, 2004. Stepwise Fatigue Crack Propagation in Poly(vinyl chloride). *Journal of Vinyl and Additive Technology*, Vol. 10(Nº 1), pp. 5 - 10.
- Bueno, M., 2010. What lies underground?. *Trenchless technology*, Volumen special supplement, pp. 8-10.
- Comisión Nacional del Agua, 1997. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua, 2011. *Agenda del Agua 2030*. Primera ed. México, D.F.: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Ellis, J., 2008. *Pressure transients in Water Engineering A Guide to Analysis and Interpretation of Behaviour*. London: Thomas Telford.
- Farshad, M., 2006. *Plastic Pipe Systems, Failure Investigation and Diagnosis*. s.l.:s.n.
- Greenshields, C. J. & Leever, P. S., 1995. The effect of air pockets on rapid crack propagation in PVC and PE water pipe. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, Issue Nº 24.
- Greenshields, C. J. & Leever, P. S., 1996. Rapid Crack Propagation in Plastic Water Pipes: Measurement of Dynamic Fracture Resistance. *International Journal of Fracture*, Issue Nº 79, pp. 85-95.
- Greenshields, C. J., Leever, P. S. & Morris, J., 1997. Brittle Fracture of Plastic Water Pipes. *Pipes and Pipelines International*.
- ISO, 2005. *ISO 4179. Ductile iron pipes and fittings for pressure and non-pressure pipelines -- Cement mortar lining*. 3º ed. USA: International Organization for Standardization.

ISO, 2007. *ISO 13478, Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids -- Determination of resistance to rapid crack propagation (RCP) -- Full-scale test (FST)*. 2° ed. USA: International Organization for Standardization.

ISO, 2008. *ISO 13477, Thermoplastics pipes for the conveyance of fluids -- Determination of resistance to rapid crack propagation (RCP) -- Small-scale steady-state test (S4 test)*. 2° ed. USA: International Organization for Standardization.

Leevers, P. S., 1989. A New Small Scale Pipe Test for Rapid Crack Propagation. *11th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*.

Leevers, P. S., 2008. The correlation of S4 to full-scale RCP test results.

Martin, C., 1976. Entrapped Air in Pipelines, Proceedingf of the Second International Conference on Pressure Seurges. En: The City University, London: British Hydromechanics Research Association, pp. Paper F2, F2-15 - F2-28.

Martin, C., 1996. Two-phase gas-liquid experiences in fluid transients, Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surge and Fluid Transients in Pipelines and Open Channel. En: Harrogate, UK: BHRA, pp. 65-81.

Mora Rodríguez, J. d. J., 2011. *Tesis Doctoral: Modelación de la intrisión patógena a través de Fallos y su implicaicón en la red de distribución de agua*, Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.

Palermo, E. F., 2010. *How to Design Against Long Running Cracks in Plastic Pipe for Water Applications*. USA: Palermo Plastics Pipe Consulting.

Pozos, Ó., Fairuzov, Y., Sánchez, A. & Rodal, E., 2012. *Manual de análisis de la problemática del aire atrapado en acueductos para mejorar su eficiencia*. Primera ed. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería UNAM.

Qiu, D. & Borrows, R., 1996. Prediction of pressure transients with entrapped air in a pipeline, Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surge and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels. En: Harrogate, UK: BHRA, pp. 251-263.

Stephenson, D., 1997. Effects of air valves and pipework on water hammer pressure. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 123(N° 2), pp. 101-106.

Thorley, A., 2004. *Fluid transients in pipeline systems*. 2nd ed. London, UK: Ed. D. & L. George Ltd.

Willoughby, D., 2007. *Plastic Piping Handbook*. USA: McGraw-Hill.

Wylie, E., 2004. *Fluid trnasients in systems*. Second ed. London, UK: D. & L.

Wylie, E., Streeter, V. & Suo, L., 1993. *Fluid transients in systems*. New Jersey, USA: Prentice Hall.