



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

ANÁLISIS DE ROTURAS EN TUBERÍAS PLÁSTICAS

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ANAYELLY MIRELES GONZÁLEZ

TUTOR PRINCIPAL

DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

CD.MX., OCTUBRE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Óscar Arturo

Secretario: M.C. Carmona Paredes Libia Georgina

1^{er} Vocal: Dr. Pozos Estrada Óscar

2^{do} Vocal: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

3^{er} Vocal: Dra. Aragón Hernández José Luis

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

TUTOR DE TESIS:

DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA



FIRMA

Índice

INTRODUCCIÓN.....	14
Planteamiento del problema	17
Objetivos	17
1 ANTECEDENTES	18
Introducción	18
1.1 Clasificación de las líneas de conducción de agua potable.....	18
1.1.1 Conductos a gravedad	18
1.1.2 Conductos a bombeo	19
1.1.3 Conductos a gravedad y a bombeo	20
1.2 Componentes de una línea de conducción	20
1.2.1 Tuberías	20
1.2.1.1. Tuberías de fibrocemento (FC).....	22
1.2.1.2. Tubería de hierro fundido (HF)	24
1.2.1.3. Tubería de concreto.....	24
1.2.1.4. Tubería de acero.....	25
1.2.1.5. Tuberías plásticas.....	27
1.2.2 Conexiones y piezas especiales.....	34
1.2.3 Tanques	36
1.2.4 Válvulas.....	37
1.2.4.1 Válvulas de aire.....	40
1.2.5 Dispositivos para control de transitorios	43
1.2.5.1. Torre de oscilación.....	43
1.2.5.2. Tanque unidireccional.....	44
1.2.5.3. Cámara de aire	44
1.2.5.4. Válvula de alivio	45
1.2.5.5. Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA).....	46
1.2.5.6. Válvulas anticipadoras del golpe de ariete	46
1.2.5.7. Membranas protectoras o fusibles hidráulicos	46
1.2.5.8. Volante de inercia	47
2 FALLAS EN TUBERÍAS	48
Introducción	48
2.1 Cargas y esfuerzos a los que está sometida una tubería.....	49
2.2 Modos de falla	51
2.2.1 Roturas.....	54
2.2.2 Voladuras o rotura por estallido	54
2.2.3 Perforaciones	55
2.3 Mecanismos de falla.....	55
2.3.1 Defectos de Fabricación	57
2.3.2 Corrosión.....	58
2.3.3 Degradación molecular	61
2.3.4 Sobrecarga dúctil	61
2.3.5 Rotura por fluencia.....	62
2.3.6 Transitorios Hidráulicos.....	62
2.3.6.1 Fatiga	65
2.3.6.2 Cavitación	67
2.3.6.3 Aire atrapado.....	70
2.3.7 Propagación Rápida de Falla.....	71
2.4 Normatividad y pruebas para tuberías	77
2.5 Casos de rotura de tuberías por propagación rápida de falla (PRF)	83
3 ANÁLISIS DE LAS FALLAS	85
Introducción	85
3.1 Programa para el análisis de transitorios hidráulicos.....	86

3.1.1	TRANS	89
3.2	Caso de Estudio	90
3.3	Datos iniciales para el análisis transitorio	94
3.4	Simulaciones de transitorios hidráulicos con el programa TRANS en el acueducto Conejos-Médanos.....	97
4	RESULTADOS Y SU ANÁLISIS	104
	Introducción	104
4.1	Análisis estático.....	104
4.2	Resultados y Análisis de los transitorios rápidos	106
4.2.1	Simulación del tramo de los Tanques de Entrega al Tanque Renovación (T.E.-T.R.)	106
4.2.1.1	Simulaciones para el gasto 1.075 m ³ /s.....	106
4.2.1.2	Simulaciones para el gasto 1.62 m ³ /s.....	111
4.2.1.3	Simulaciones para el gasto 0.542 m ³ /s.....	115
	La Tabla 4.5 y las Figuras 4.21 a 4.28 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 0.542 m ³ /s.....	115
4.2.2	Simulaciones de los tramos de los Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.) y del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.).....	121
4.2.2.1	Simulaciones para el gasto 1.075 m ³ /s.....	121
4.2.2.2	Simulaciones para el gasto 1.62 m ³ /s.....	126
4.2.2.3	Simulaciones para el gasto 0.542 m ³ /s.....	132
4.2.3	Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.), del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.) y de T.E. al Tanque Renovación (T.E.-T.R.)	137
4.2.3.1	Simulaciones para el gasto 1.075 m ³ /s.....	138
4.2.3.2	Simulaciones para el gasto 1.62 m ³ /s.....	141
4.2.3.3	Simulaciones para el gasto 0.542 m ³ /s.....	144
4.3	Resultados y Análisis de los transitorios lentos	147
4.3.1	Tanques de Entrega al Tanque Renovación (T.E.-T.R.)	147
4.3.2	Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.) y del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.).....	149
4.3.3	Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.), del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.) y de T.E. al Tanque Renovación (T.E.-T.R.)	153
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	157
	REFERENCIAS.....	161

Índice de figuras

Figura 1.1 Esquema de un conducto a gravedad.	19
Figura 1.2 Esquema de un conducto a presión.	19
Figura 1.3 Arreglo típico de un acueducto.	20
Figura 1.4 Tubería de fibrocemento.	23
Figura 1.5 Unión de tubos de fibrocemento. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.	23
Figura 1.6 Tubería de hierro fundido.	24
Figura 1.7 Tubería de concreto.	25
Figura 1.8 Tubería de acero.	26
Figura 1.9. Junta espiga-campana. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.	28
Figura 1.10 Tubería de PVC.	28
Figura 1.11 Tubería de PVCO.	31
Figura 1.12 Tubería de polietileno.	31
Figura 1.13 Uniones por termofusión. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.	32
Figura 1.14 Tubería de Polipropileno Copolímero Random. Fuente: Rotoplas®.	33
Figura 1.15 Tubería de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio.	33
Figura 1.16 Junta Gibault. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.	34
Figura 1.17 Carrete.	34
Figura 1.18 Tee en diferentes materiales.	35
Figura 1.19 Cruces en diferentes materiales.	35
Figura 1.20 Codos en diferentes materiales.	35
Figura 1.21 Reducciones en diferentes materiales.	35
Figura 1.22 Coples en diferentes materiales.	36
Figura 1.23 Tapones en diferentes materiales.	36
Figura 1.24 Esquema de un tanque.	37
Figura 1.25 Válvula de aguja. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	37
Figura 1.26 Válvula de globo. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	38
Figura 1.27 Válvula de paso anular. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	38
Figura 1.28. Válvula de compuerta. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	38
Figura 1.29. Válvula de esfera. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	38
Figura 1.30. Válvula de mariposa. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	39
Figura 1.31. Válvula de retención. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	39
Figura 1.32 Ubicación de las válvulas de aire a lo largo de un conducto. Fuente: AWWA, 2001. <i>Manual of Water Supply Practices M51</i>	40
Figura 1.33. Válvula de Eliminación de Aire. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Anexos Instalaciones electromecánicas.	41
Figura 1.34. Válvula de Admisión y Expulsión de Aire. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Anexos Instalaciones electromecánicas.	42
Figura 1.35. Válvula de Admisión, Expulsión y Eliminación de Aire de un solo cuerpo. Fuente: AWWA, 2001. <i>Manual of Water Supply Practices M51</i>	42
Figura 1.36. Válvula de Admisión, Expulsión y Eliminación de Aire de doble cuerpo. Fuente: AWWA, 2001. <i>Manual of Water Supply Practices M51</i>	43
Figura 1.37 Esquema de una torre de oscilación. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	43

Figura 1.38 Esquema de un tanque unidireccional. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	44
Figura 1.39 Esquema de una cámara de aire. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.	45
Figura 1.40 Esquema de una válvula de alivio. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 11-Fenómenos transitorios en líneas de conducción.	46
Figura 1.41 Esquema de un volante de inercia instalado entre el motor y la bomba. Fuente: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 11-Fenómenos transitorios en líneas de conducción.	47
Figura 2.1 Modos de falla en tuberías. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 42- Mantenimiento y reparación de tuberías y piezas especiales.	51
Figura 2.2 Modos de falla estructural en tuberías que transportan agua. Fuente: <i>Federation of Canadian Municipalities and National Research Council. 2003. Deterioration and inspection of water distribution systems.</i>	51
Figura 2.3 Modos de falla para tuberías enterradas. Fuente: Balvant, R. & Yehuda K., 2011. <i>Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models.</i>	52
Figura 2.4 a) Rotura circunferencial en una tubería de hierro; b) Rotura longitudinal en una tubería de PVC; c) Rotura en la unión en una tubería de PVC.	54
Figura 2.5 Voladura en una tubería de PVC.	54
Figura 2.6 a) Perforación en una tubería de polietileno; b) Perforación en una tubería de hierro dúctil.	55
Figura 2.7 Material extraño dentro de la pared de una tubería de PVC. Fuente: Beamer, R. et al. 2009. <i>Several Failures of a 16-inch PVC Transmission Main within 12 Years.</i>	58
Figura 2.8 Condiciones principales de corrosión. Fuente: Balvant, R. & Yehuda K., 2011. <i>Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models.</i>	59
Figura 2.9 Falla dúctil resultado de una prueba. Fuente: <i>Gas Technology Institute. 2009. Plastic Pipe Failure, Risk, and Threat Analysis.</i>	62
Figura 2.10 Esquema de la influencia de las sobrepresiones. Fuente: Carmona, R., 1987. Transitorios hidráulicos en conductos a presión.	62
Figura 2.11 Colapso de la tubería por depresión. Fuente: Carmona, R., 1987. Transitorios hidráulicos en conductos a presión.	63
Figura 2.12 Proceso de separación y reintegración de la columna líquida.	63
Figura 2.13 Instalación con riesgo de separación de columna. Fuente: Carmona, R., 1987. Transitorios hidráulicos en conductos a presión.	64
Figura 2.14 Acueducto bien diseñado. Fuente: Carmona, R., 1987. Transitorios hidráulicos en conductos a presión.	64
Figura 2.15 Datos de resistencia contra fatiga en tubería de PVC (Curva S-N) de Marshall, Brogden, y Shepherd (1998). Fuente: Tzatchkov, Velitchko et. al., 2006. Diseño de acueductos seguro contra fatiga del material en los transitorios hidráulicos.	66
Figura 2.16 Curva de diseño contra fatiga en tuberías de PVC (Jeffrey, Moser y Folkman). Fuente: Tzatchkov, Velitchko et. al., 2006. Diseño de acueductos seguro contra fatiga del material en los transitorios hidráulicos.	67
Figura 2.17 Aparición de cavitación en una tubería.	68
Figura 2.18 Etapas de la erosión por cavitación. Fuente: Aranibar, A., 2016. Determinación predictiva de la cavitación por parámetros sónicos.	69
Figura 2.19. Defecto microscópico en un tubo de PVC. Fuente: Bernal-Lara, T. E. et al., 2004. <i>Stepwise Fatigue Crack Propagation in Poly (vinyl chloride)</i>	73
Figura 2.20 Gráfico esquemático de la influencia de la temperatura en la fractura dinámica de tuberías termoplásticas y, en particular, en la velocidad de la grieta, la tensión crítica y la presión interna crítica. Fuente: Farshad, M., 2006. <i>Plastic Pipe systems.</i>	74
Figura 2.21. Rotura en un tubo de PVC con aire atrapado, forma senoidal. Fuente: Greenshields, C. J. & Leever, P. S., 1996. <i>Rapid crack propagation in plastic water pipes: measurement of dynamic fracture resistance.</i>	74
Figura 2.22. Rotura en un tubo de PVC sin aire atrapado, forma lineal. Fuente: Greenshields, C. J. & Leever, P. S., 1996. <i>Rapid crack propagation in plastic water pipes: measurement of dynamic fracture resistance.</i>	75

Figura 2.23 Falla de 260 m de longitud por PRF en tubería fusible de PVC de 30" RD25 en Chatham, IL (Palermo, 2010).	75
Figura 2.24 Curva característica de propagación de grieta. Fuente: Andrade, A. et al., 2015. Modelos de crecimiento de grietas por fatiga.	76
Figura 2.25 Factores que influyen en el desempeño de una tubería. Fuente: Jansen, Jeffrey. <i>Characterization of Plastics in Failure Analysis</i> .	77
Figura 2.26 Corte de la sección de una zanja. Fuente: AWWA M23.	81
Figura 2.27 a) Falla tipo PRF de 850 m de longitud en tubería de PVC 18 in RD25-Chatham, IL; b) Falla tipo PRF de 850 m de longitud en tubería de PVC 24 in RD25-Baton Rouge, LA; c) Falla tipo PRF de 200 m de longitud en tubería de PVC 8 in RD25-Tampa, FL; d) Falla tipo PRF de 20 m de longitud en tubería de PVC 12 in RD18-Jacksonville, FL.	83
Figura 2.28 Falla en Acueducto González Ortega II con tubería de PEAD 24 in- Chetumal, Quintana Roo.	84
Figura 3.1 Localización de Ciudad Juárez, Chihuahua. Fuente: Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua.	86
Figura 3.2 Representación gráfica de las ecuaciones características.	88
Figura 3.3 Ventana de inicio del programa TRANS.	89
Figura 3.4 Archivo de datos de entrada al programa TRANS.	90
Figura 3.5 Ventana y archivos de resultados después de la simulación.	90
Figura 3.6 Acueducto Conejos-Médanos. Fuente: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS).	91
Figura 3.7 Componentes del acueducto Conejos-Médanos. Fuente: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS).	91
Figura 3.8 Zona de fallas en la conducción Conejos-Médanos. Fuente: https://aguaparatodos.org.mx/falla-acueducto-construido-aqui-por-empresa-de-slim/	92
Figura 3.9 Rotura del tipo PRF en un tubo de PVC sin aire atrapado ocurrido en el acueducto Conejos-Médanos en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Fuente: Tolentino K., 2015. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería: Propagación rápida de falla en tuberías plásticas.	93
Figura 3.10 Rotura del tipo PRF en un tubo de PVC con presencia de aire atrapado ocurrido en el acueducto Conejos-Médanos en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Fuente: Tolentino K., 2015. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería: Propagación rápida de falla en tuberías plásticas.	94
Figura 3.11 Acueducto Conejos-Médanos visto en planta.	94
Figura 3.12 Ubicación de las fallas y VAEA's en el acueducto Conejos-Médanos.	95
Figura 3.13 Diagrama de Moody. Fuente: Frank M. White. Fluid Mechanics.	98
Figura 3.14 Curva que representa el comportamiento de la válvula de mariposa.	99
Figura 3.15 Ubicación de las válvulas de mariposa consideradas en las simulaciones.	100
Figura 3.16 Perfil del primer caso de simulación.	101
Figura 3.17 Perfil del segundo caso de simulación.	102
Figura 3.18 Perfiles del tercer caso de simulación.	103
Figura 4.1 Análisis del acueducto Conejos-Médanos en flujo establecido.	104
Figura 4.2 Análisis de la carga estática en la línea 1. H indica el valor máximo de la carga estática desde el nivel del agua en el tanque hasta el punto con menor cota.	104
Figura 4.3 Análisis de la carga estática en la línea 2. H indica el valor máximo de la carga estática desde el nivel del agua en el tanque hasta el punto con menor cota.	105
Figura 4.4 Análisis de la carga estática en la línea 3. H indica el valor máximo de la carga estática desde el nivel del agua en el tanque hasta el punto con menor cota.	105
Figura 4.5 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m ³ /s.	107
Figura 4.6 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m ³ /s.	107
Figura 4.7 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m ³ /s.	108
Figura 4.8 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m ³ /s.	108

Figura 4.9 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m ³ /s.	109
Figura 4.10 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m ³ /s.	109
Figura 4.11 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m ³ /s.	110
Figura 4.12 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m ³ /s.	110
Figura 4.13 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.62 m ³ /s.	111
Figura 4.14 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.62 m ³ /s.	112
Figura 4.15 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.62 m ³ /s.	112
Figura 4.16 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.62 m ³ /s.	113
Figura 4.17 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.62 m ³ /s.	113
Figura 4.18 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.62 m ³ /s.	114
Figura 4.19 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.62 m ³ /s.	114
Figura 4.20 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.62 m ³ /s.	115
Figura 4.21 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m ³ /s.	116
Figura 4.22 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m ³ /s.	117
Figura 4.23 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m ³ /s.	117
Figura 4.24 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m ³ /s.	118
Figura 4.25 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m ³ /s.	118
Figura 4.26 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m ³ /s.	119
Figura 4.27 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m ³ /s.	119
Figura 4.28 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m ³ /s.	120
Figura 4.29 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA´s en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s.	122

Figura 4.48 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	135
Figura 4.49 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	135
Figura 4.50 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	136
Figura 4.51 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	136
Figura 4.52 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	137
Figura 4.53 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	139
Figura 4.54 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	139
Figura 4.55 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	140
Figura 4.56 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	140
Figura 4.57 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m ³ /s.....	142
Figura 4.58 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m ³ /s.....	142
Figura 4.59 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m ³ /s.....	143
Figura 4.60 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m ³ /s.....	143
Figura 4.61 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	145
Figura 4.62 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	145
Figura 4.63 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	146
Figura 4.64 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	146
Figura 4.65 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula en 30 segundos antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto de diseño 1.075 m ³ /s.....	147

Figura 4.66 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula en 30 segundos antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto de diseño 1.075 m ³ /s.....	148
Figura 4.67 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula en 1 minuto antes del T.R. sin considerar las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto de diseño 1.075 m ³ /s.....	148
Figura 4.68 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula en 1 minuto antes del T.R. considerando las VAEA´s en el tramo de T.E.-T.R para el gasto de diseño 1.075 m ³ /s.....	149
Figura 4.69 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 30 segundos antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA´s en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	150
Figura 4.70 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 30 segundos antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA´s en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	151
Figura 4.71 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 1 minuto antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA´s en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	152
Figura 4.72 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 1 minuto antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA´s en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	152
Figura 4.73 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 30 segundos antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA´s en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.	154
Figura 4.74 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 30 segundos antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA´s en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	154
Figura 4.75 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 1 minuto antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA´s en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	155
Figura 4.76 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 1 minuto antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA´s en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	156

Índice de tablas

Tabla 0.1 Principales acueductos en México, 2017. Fuente: Estadísticas del Agua en México 2018.....	15
Tabla 0.2 Principales acueductos en México, 2017 (continuación). Fuente: Estadísticas del Agua en México 2018.	16
Tabla 1.1 Resumen de las ventajas y desventajas en los materiales de las tuberías. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.	22
Tabla 1.2 Clases de tubos de fibrocemento. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.	23
Tabla 1.3 Clases en tubos de PVC. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.	27
Tabla 1.4 Dimensiones de la tubería de PVC. Fuente: AWWA-C905.	29
Tabla 1.5 Presión nominal en tuberías de PVC. Fuente: AWWA C905.	30
Tabla 1.6 Clases de las tuberías Tipo III de PE. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.	32
Tabla 1.7 Tabla resumen de las válvulas de uso frecuente. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 10-Conducciones.	39
Tabla 1.8 Ventajas y desventajas del tanque de oscilación.	44
Tabla 1.9 Ventajas y desventajas del tanque unidireccional.	44
Tabla 1.10 Ventajas y desventajas de la cámara de aire.	45
Tabla 2.1 Clasificación de las causas de falla. Fuente: Martínez, Á., 2018, Relación entre las causas y los modos de falla de tuberías en la red de distribución de Canal de Isabel II en Madrid. 49	
Tabla 2.2 Modos de falla estructural para materiales más comunes de tuberías que transportan agua. Fuente: <i>Federation of Canadian Municipalities and National Research Council. 2003. Deterioration and inspection of water distribution systems.</i>	52
Tabla 2.3 Varios modos de falla en tuberías plásticas y sus causas potenciales: Fuente: Farshad, M., 2006. <i>Plastic pipe systems.</i>	53
Tabla 2.4 Factores que contribuyen al deterioro de tuberías que transportan agua. Fuente: <i>Federation of Canadian Municipalities and National Research Council. 2003. Deterioration and inspection of water distribution systems.</i>	56
Tabla 2.5 Factores que influyen en el envejecimiento y deterioro de las tuberías plástica. Fuente: Farshad, M., 2006. <i>Plastic pipe systems.</i>	57
Tabla 2.6 Normatividad aplicable a la fabricación de algunas tuberías.	78
Tabla 2.7 Coeficiente de reducción de presión. Fuente: AWWA C905.	79
Tabla 2.8 Pruebas a las tuberías de PVC según la AWWA C905.	80
Tabla 2.9 Dimensiones de zanjas y plantillas. Fuente: Normas Técnicas Complementarias (6 de octubre de 2004).	81
Tabla 2.10 Tiempo de llenado. Fuente: NOM 001-CONAGUA-2011.	82
Tabla 2.11. Resumen de los estudios del Dr. Palermo en EU entre los años 2004 y 2013. Fuente: Palermo, 2010. <i>How to design against long running cracks in plastic pipe for water applications.</i> ... 84	
Tabla 3.1 Ubicación de las VAEA´s a lo largo del acueducto Conejos-Médanos (2011-2013).....	95
Tabla 3.2 Ubicación de las fallas en el acueducto Conejos-Médanos (2011-2013).....	96
Tabla 3.3 Diámetro de la tubería del acueducto Conejos-Médanos de acuerdo a la AWWA-C905. 96	
Tabla 3.4 Gastos mensuales registrados. Fuente: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS).	97
Tabla 3.5 Distribución del gasto de diseño por las derivaciones del conducto. Fuente: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS).	97
Tabla 3.6 Coeficientes del polinomio que representa la curva de operación de la válvula de mariposa.....	99
Tabla 3.7 Datos para el primer caso de simulación.	101
Tabla 3.8 Datos para el segundo caso de simulación.	101
Tabla 3.9 Datos para el tercer caso de simulación.	102
Tabla 4.1 Resumen de las cargas máximas en el análisis estático.....	105
Tabla 4.2 Presiones de pruebas de la AWWA C905 a la tubería PVC RD25.	106
Tabla 4.3 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.	106

Tabla 4.4 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m ³ /s.	111
Tabla 4.5 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m ³ /s.	116
Tabla 4.6 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	121
Tabla 4.7 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 1.075m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013... ..	122
Tabla 4.8 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 1.62 m ³ /s.....	127
Tabla 4.9 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 1.62 m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.	127
Tabla 4.10 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 0.542 m ³ /s.....	132
Tabla 4.11 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 0.542 m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013..	133
Tabla 4.12 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.	138
Tabla 4.13 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.	138
Tabla 4.14 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m ³ /s.....	141
Tabla 4.15 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.....	141
Tabla 4.16 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m ³ /s.	144
Tabla 4.17 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.	144
Tabla 4.18 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 30s en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.075m ³ /s.....	147
Tabla 4.19 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 1min en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.....	148
Tabla 4.20 Cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 30s en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s.	149
Tabla 4.21 Cargas máximas resultado de la maniobra de cierre total simulada en 30s en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.	150
Tabla 4.22 Cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 1min en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s.	151
Tabla 4.23 Cargas máximas resultado de la maniobra de cierre simulada en 1min en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C-T.A. para el gasto 1.075 m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.	151
Tabla 4.24 Cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 30s en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.	153
Tabla 4.25 Cargas máximas resultado de la maniobra de cierre simulada en 30s en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.	153
Tabla 4.26 Cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 1min en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m ³ /s.	154
Tabla 4.27 Cargas máximas resultado de la maniobra de cierre simulada en 1min en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075m ³ /s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.	155



INTRODUCCIÓN

Para que exista vida en el planeta y la supervivencia de la humanidad es vital el agua. Este recurso se ve amenazado por su sobreexplotación con proyectos de desarrollo urbano e industrial no planificados, la deforestación y el cambio del uso de suelo. Además, la seguridad del agua llega a verse comprometida por intereses ajenos a los de índole social.

México presenta un serio desequilibrio entre la disponibilidad hídrica y la demanda de agua en algunas de las más importantes cuencas, en algunas de las cuales se utiliza más del 100% de la disponibilidad natural, lo que pone en riesgo las condiciones del desarrollo.

Otros dos factores que influyen en el recurso hídrico del país son el cambio climático y las sequías que afectan directamente la disponibilidad de este recurso. Las sequías principalmente se presentan al norte del país, en donde el clima se caracteriza por ser árido y extremo.

Por lo anterior, las aguas subterráneas desempeñan un papel de importancia en el crecimiento socioeconómico del país, aunado a que, debido a sus características físicas, permiten ser aprovechadas de manera versátil. Por la capacidad de almacenamiento de la mayor parte de los acuíferos es posible extraer agua en cualquier época del año de cualquier punto.

Considerando la cobertura actual y el crecimiento de la población en México, es primordial garantizar la disponibilidad de agua potable. Para ello, serán necesarias diversas iniciativas vinculadas al buen gobierno del agua. Además, la provisión de agua para el consumo humano en la cantidad y calidad necesaria incide directamente en la salud y bienestar de la población.

En el 2015, la cobertura nacional de acceso al agua entubada era del 95.3% (97.8% urbana, 87.0% rural) y la cobertura nacional de agua entubada en la vivienda o predio era de 94.4% (97.2% urbana, 85.0% rural).

Para lograr la cobertura del recurso hídrico en México, existen más de 3,000 km de acueductos que llevan agua a diversas ciudades y comunidades rurales, y tienen una capacidad total de más de 112 m³/s. Los principales acueductos por longitud y caudal se pueden ver en las Tablas 0.1 y 0.2.



Tabla 0.1 Principales acueductos en México, 2017. Fuente: Estadísticas del Agua en México 2018.

No.	Acueducto	Región	Longitud (km)	Caudal de diseño (l/s)	Año de término	Abastece a	Responsable de la operación
1	Lerma	VIII Lerma-Santiago-Pacífico y XIII Aguas del Valle de México	60	14,000	1975	Ciudad de México con agua de los acuíferos localizados en la zona alta del Río Lerma.	Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
2	Chicbul-Ciudad del Carmen	XII Península de Yucatán	122	390	1975	Sabancuy, Isla Aguada y Ciudad del Carmen, Camp.	Sistema Municipal de Agua Potable de Ciudad del Carmen, Campeche.
3	Río Colorado-Tijuana	I Península de Baja California	130	4,000	1982	Ciudades de Tijuana y Tecate y al poblado La Rumorosa en Baja California.	Comisión de Servicios de Agua del Estado de Baja California (COSAE).
4	Linares-Monterrey	VI Río Bravo	133	5,000	1984	Área Metropolitana de la ciudad de Monterrey, N.L., con agua de la presa Cerro Prieto.	Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D.
5	Uxpanapa-La Cangrejera	X Golfo Centro	30	20,000 diseño (5,000 máximo de operación registrado)	1985	22 industrias ubicadas en la parte sur del estado de Veracruz.	Conagua
6	Yurivia-Coatzacoalcos y Minatitlán	X Golfo Centro	64	2,000	1987	Coatzacoalcos y Minatitlán, Ver. con agua del Río Ocotál y Tizizapa.	Comisión Municipal de Agua y Saneamiento de Coatzacoalcos, Ver. (CMAPS Coatzacoalcos).
7	Armería-Manzanillo	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	50	250	1987	Manzanillo, Colima.	Comisión de Agua Potable, Drenaje y Alcantarillado de Manzanillo, Colima.
8	Vizcaino-Pacífico Norte	I Península de Baja California	206	62	1990	Localidades de Bahía Asunción, Bahía Tortugas y poblados pesqueros de Punta Abrejos en Baja California.	Organismo operador del municipio de Mulegé, B.C.



Tabla 0.2 Principales acueductos en México, 2017 (continuación). Fuente: Estadísticas del Agua en México 2018.

No.	Acueducto	Región	Longitud (km)	Caudal de diseño (l/s)	Año de término	Abastece a	Responsable de la operación
9	Chapala-Guadalajara	VIII Lerma-Santiago-Pacífico	42	7,500	1991	Zona Metropolitana de Guadalajara con agua del Lago de Chapala.	Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA).
10	Presa Vicente Guerrero-Ciudad Victoria	IX Golfo Norte	54	1,000	1992	Ciudad Victoria, Tamaulipas con agua proveniente de la presa Vicente Guerrero.	Comisión Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (Comapa Victoria).
11	Sistema Cutzamala	IV Balsas y XIII Aguas del Valle de México	162	19,000	1ªEtapa 1982 2ªEtapa 1985 subsistema Chilesdo 1993 3ªEtapa 1995	Zona Metropolitana del Valle de México con agua de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque, entre otras.	CONAGUA
12	El Cuchillo-Monterrey	VI Río Bravo	91	5,000	1994	Área metropolitana de la ciudad de Monterrey con agua proveniente de la presa el Cuchillo.	Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D.
13	Río Huitzilapan-Xalapa	X Golfo Centro	55	1,000	2000	Xalapa-Enriquez, Ver.	Comisión Municipal de Agua y Saneamiento de Xalapa (CMAS Xalapa).
14	Conejos-Médanos	VI Río Bravo	25.3	1,075	2009	Ciudad Juárez, Chih.	Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez, Chihuahua - Administradora de Proyectos Hidráulicos de Ciudad Juárez, S.A. de C.V. (Grupo CARSO).
15	Acueducto II Querétaro	VIII Lerma-Santiago-Pacífico y IX Golfo Norte	122	1,500	2011	Santiago de Querétaro, Qro.	Comisión Estatal de Aguas - Controladora de Operaciones de Infraestructura S.A. de C.V. (ICA).
16	Independencia	II Noroeste	135	2,380	2013	Hermosillo, Son.	CONAGUA
17	Lomas de Chapultepec	V Pacífico Sur	34	1,250	2014	Acapulco, Gro.	Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Estado de Guerrero (Capaseg).
18	Paralelo Chicbul-Ciudad del Carmen	XII Península de Yucatán	120	420	2014	Sabancuy, Isla Aguada y Ciudad del Carmen, Camp.	Sistema Municipal de Agua Potable de Ciudad del Carmen, Campeche.
19	Realito-San Luis Potosí		133	1,000	2015	San Luis Potosí	Comisión Estatal del Agua de San Luis Potosí - Aquos El Realito S.A. de C.V.
Total			1768.3	86,827			

Los acueductos son infraestructura que permite el transporte de agua, los cuales deben garantizar continuidad, presión y calidad en su operación. El principal componente de los acueductos son las tuberías y representan el mayor costo, de ellas depende en gran medida su eficiencia, por lo que deben estar en óptimas condiciones.

Las tuberías pueden presentar fallas. Ellas corresponden a una condición no deseada que hace que la tubería no desempeñe la función para la cual existe. Un modo de falla de las tuberías es la rotura.



En este trabajo se analizan las posibles causas de roturas en tuberías plásticas, principalmente los transitorios hidráulicos, la presencia de aire atrapado, la fatiga del material y la propagación rápida de falla.

El caso de estudio es el acueducto Conejos-Médanos en Ciudad Juárez, Chihuahua. Este acueducto está hecho de tubería plástica (PVC) y presentó varias fallas durante su operación entre junio de 2011 y enero de 2013, dichas fallas pudieron ser causadas por transitorios hidráulicos debido a que no parece tener diseño inadecuado, incorrecta instalación o presentar asentamientos en el suelo (Tzatchcov y Alcocer, 2013).

La hipótesis es que las fallas fueron causadas por el fenómeno propagación rápida de falla. Se planteó esta hipótesis después de que una muestra de los tubos de PVC que fallaron se probara en laboratorios en Estados Unidos y se cumplieran las normas correspondientes de la AWWA. Además, se observó que el sistema de tuberías era relativamente nuevo y la magnitud de la variación de la presión era relativamente baja, por lo que era poco factible que su causa haya sido por fatiga.

El propósito de este trabajo es por medio de los resultados proponer recomendaciones que reduzcan el riesgo de nuevas fallas en el acueducto del caso de estudio.

Planteamiento del problema

Las obras de conducción permiten desplazar el agua desde la fuente hasta los usuarios. Para ello, emplean tuberías que son fabricadas en diferentes materiales. En el caso de las tuberías plásticas, son clasificadas por clase de acuerdo a su resistencia a la presión de trabajo. Cuando se diseña un acueducto, es importante que la clase elegida sea para una presión mayor a la presión transitoria máxima. A pesar de esto, en la práctica las tuberías llegan a sufrir fallas.

Existen tres aspectos principales para que se genere una falla en la tubería: la propiedad estructural, que incluye el tipo de material, interacción entre el suelo y la tubería, la calidad de la instalación y la calidad de la fabricación; las cargas internas y externas que son debidas a la presión de operación y a sobrecargas del suelo, transitorios hidráulicos, y por injerencia de terceros; y el deterioro del material, debido en gran parte a factores químicos internos y externos, ambientes bioquímicos y electroquímicos.

En este trabajo se analizan las causas de las roturas en tuberías plásticas, tomando como caso de estudio el acueducto Conejos-Médanos en Ciudad Juárez. La hipótesis es que éstas se originan por el fenómeno conocido como “propagación rápida de falla”.

Objetivos

El objetivo del presente estudio es analizar las causas de las roturas en tuberías plásticas. Como objetivos secundarios están los siguientes:

- Conocer el funcionamiento y operación de un acueducto para agua potable.
- Conocer el marco regulatorio para tuberías de PVC.
- Analizar un caso de estudio de fallas en un acueducto en México.



1 ANTECEDENTES

Introducción

Los primeros pobladores del territorio mexicano se ubicaron a orillas de los lagos, lagunas, ríos, etc. Con el paso del tiempo y el aumento demográfico, con mucho ingenio vieron la posibilidad de traer agua a sus tierras y conducirla hasta aquellos lugares donde el hombre la necesitaba para convertirla en su mejor aliada, con el fin de aprovechar el agua como consecuencia de la distribución tan irregular de la precipitación en el país.

Actualmente en México, las principales complicaciones en materia de gestión del agua se concentran en las ciudades por el incontrolable y desordenado crecimiento urbano. Ante la rápida urbanización y la demanda creciente de agua para las ciudades son necesarios proyectos ambiciosos para garantizar el abasto de agua. Entre estos proyectos se encuentran los relacionados con los acueductos, tanto para la construcción de los mismos como en el mantenimiento para reducir la posibilidad de fallas en alguno de sus componentes.

Por la importancia que tienen los conductos de agua potable, este capítulo abarcará la información relacionada con los mismos, se hace una presentación de los tipos de conductos que existen y sus principales componentes. Además, de la descripción de los componentes que conforman un conducto.

1.1 Clasificación de las líneas de conducción de agua potable

El abastecimiento del agua consiste en dotar de este recurso a los asentamientos humanos. Inicia con el transporte del agua desde una fuente y posteriormente a un tratamiento se distribuye en la mancha poblacional. Para realizar la distribución del agua, se utiliza un sistema de agua potable dentro del cual se encuentran todas aquellas obras de conducción que permiten desplazar el agua desde su origen hasta los usuarios, y de acuerdo al diseño de dicho sistema variará el impacto económico en la operación de éste.

La función de un conducto es importante debido a que transporta un fluido de un lugar a otro, en este caso el agua. Las obras de conducción permiten desplazar el agua desde la fuente hasta los usuarios.

El transporte del agua a los usuarios puede realizarse de las siguientes maneras (CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 10-Conducciones):

- Gravedad
- Bombeo
- Combinado

1.1.1 Conductos a gravedad

Existen conductos en donde el depósito aguas arriba está ubicado en una cota superior al depósito de descarga, se aprovecha que existe mayor elevación en el punto de captación que en el de entrega. En este caso, el transporte del fluido se logra por la diferencia de energía disponible, se hace uso de la topografía existente para que la conducción se lleve a cabo sin necesidad de bombeo y alcanzar un nivel aceptable de presión. La energía potencial del fluido, representada por su altura estática, hace que el líquido fluya hacia el depósito aguas abajo gracias a la acción de la gravedad.



La mayoría de los conductos operan a gravedad. Las ventajas que tienen estos conductos son: la inexistencia de costos de energía, operación sencilla, bajos costos de mantenimiento y cambios de presión reducidos. La Figura 1.1 ilustra un esquema de un conducto a gravedad.

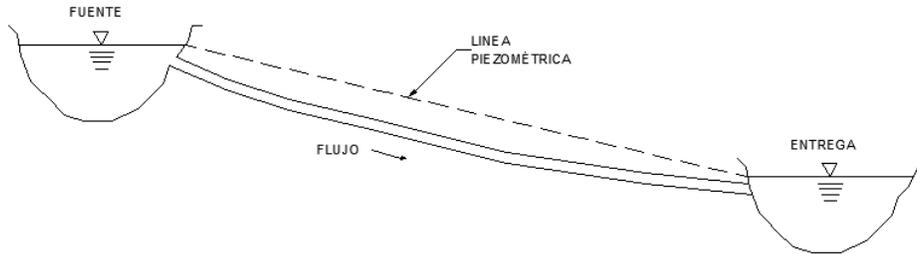


Figura 1.1 Esquema de un conducto a gravedad.

1.1.2 Conductos a bombeo

Otra parte importante de los conductos funcionan a bombeo (Figura 1.2), en los que la fuente de captación se ubica, por lo general, a una elevación menor que el punto de entrega, caso en el que es necesario un bombeo para vencer la diferencia de elevaciones y las pérdidas de carga que se presentan en el trayecto. Por ello, una conducción por bombeo es necesaria cuando se requiere adicionar energía para transportar el gasto de diseño y el equipo de bombeo proporciona la energía necesaria para lograr el transporte del agua.

Los conductos a bombeo representan un papel fundamental en la vida diaria para el transporte de fluidos, principalmente del agua. Es importante en el abastecimiento de agua potable en donde se requiere vencer grandes desniveles ascendentes, así como en la explotación de agua subterránea.

En el caso de grandes ciudades, como la Ciudad de México, el agua es transportada desde grandes distancias y resulta necesario vencer desniveles ascendentes debido a la topografía del terreno por el que pasa la tubería. Además, en mayor porcentaje el abastecimiento de agua se extrae de agua subterránea, la cual es llevada, de gran profundidad en algunos casos, a la superficie por bombeo.

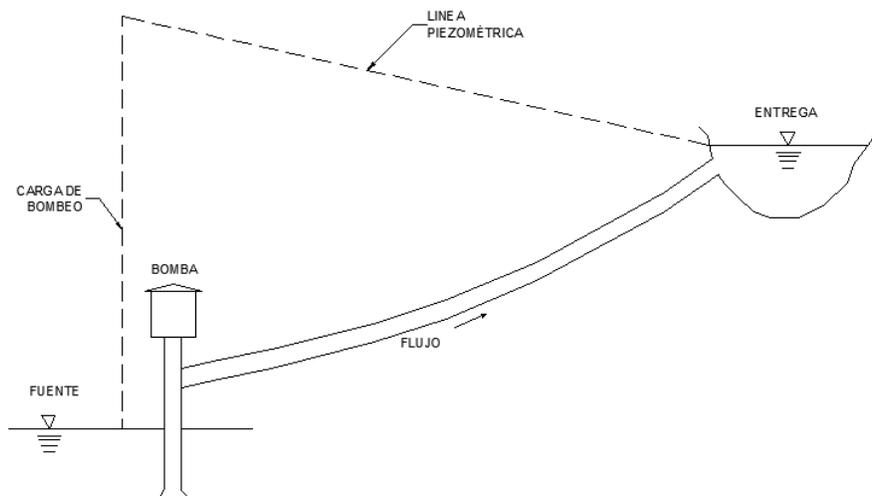


Figura 1.2 Esquema de un conducto a presión.



1.1.3 Conductos a gravedad y a bombeo

En los casos donde la topografía del terreno obliga al trazo de la conducción a cruzar por partes con mayor elevación que la superficie del agua en el tanque de entrega, es conveniente la colocación de un tanque intermedio (tanque de regulación). Una conducción bombeo-gravedad (Figura 1.3) es causada por la instalación de dicho tanque, donde la primera parte es por bombeo y la segunda por gravedad.

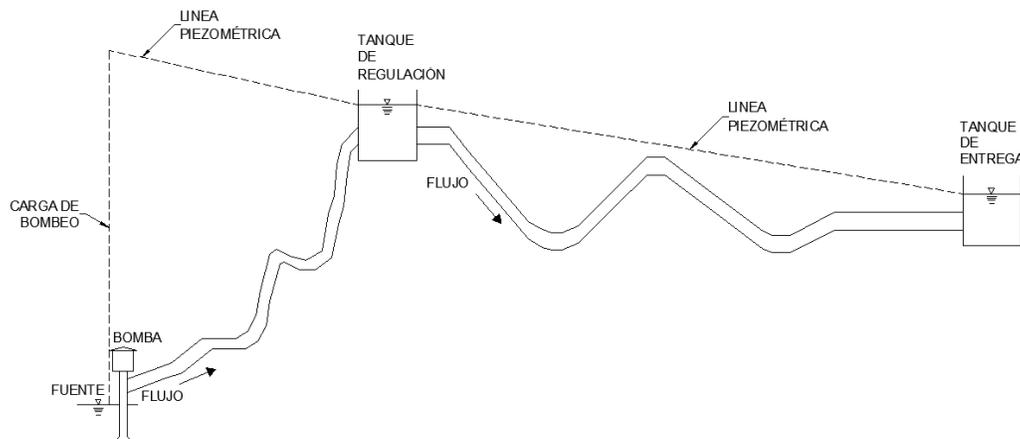


Figura 1.3 Arreglo típico de un acueducto.

1.2 Componentes de una línea de conducción

Además de los conductos que enlazan el origen y destino del transporte de agua, son necesarios los tanques de entrega, las conexiones y los accesorios para la regulación y control, como son las válvulas y los dispositivos de control de transitorios.

Es importante la definición de la carga de trabajo, diámetros, longitudes, parámetros de construcción, ubicación de válvulas de aire y válvulas o compuertas de control, pérdidas locales y pérdidas por fricción en la tubería. Además, la descarga y nivel son muy importantes en el diseño de un conducto, debido a que su conocimiento permite prever obras tales como disipadores de energía o depósitos de bombeo o rebombeo (CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 10-Conducciones).

1.2.1 Tuberías

Los conductos se componen de dos o más tubos ensamblados mediante un sistema de unión que permite el transporte de un fluido. En el caso de los conductos de agua potable se fabrican de diferentes materiales, por mencionar algunos están: acero, fibrocemento, concreto presforzado, cloruro de polivinilo (PVC), hierro dúctil, polietileno de alta densidad, poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y el fierro galvanizado, entre otros (CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 10-Conducciones).

Los factores que influyen en la selección del material adecuado de la tubería son: resistencia mecánica, durabilidad, resistencia a la corrosión, capacidad de conducción, economía, facilidad de conexión y reparación, y, principalmente, la conservación de la calidad del agua.

La resistencia mecánica se refiere a que la tubería tiene que soportar cargas internas por la operación así como las resultantes de los transitorios hidráulicos, además de las cargas externas como el peso del relleno de la zanja y el tráfico automovilístico.



La durabilidad se refiere al grado con el cual la tubería provee servicio satisfactorio y económico bajo las condiciones de uso. Este aspecto considera una larga vida útil y hermeticidad en la tubería y uniones.

La resistencia a la corrosión es la capacidad de resistir suelos y aguas agresivos, los cuales provocan reacciones químicas adversas entre la pared del tubo (interna y externamente) reduciendo la capacidad de conducción de la tubería.

La capacidad de conducción depende de lo liso del interior de la tubería. Este aspecto se considera en las pérdidas por fricción por medio de un coeficiente de rugosidad, el cual depende del material, la edad y las condiciones en las que se encuentra la tubería.

En cuanto a los costos de adquisición y de instalación, en los primeros interviene la disponibilidad inmediata de tubos y piezas especiales, y su transporte al lugar de instalación. Otros factores a considerar son tiempo de entrega, material adicional y regresar piezas en malas condiciones porque incrementan el tiempo y costo del proyecto. Durante la instalación debe considerarse la longitud, material y peso de la tubería, si lleva revestimiento (interno y externo), el tipo de unión, flexibilidad y facilidad de instalación. Además, deberán considerarse los factores como la topografía, lugares de la trayectoria del conducto y los cruces con otras instalaciones.

La facilidad de conexión y reparación se refiere a considerar el material de la tubería para saber qué tipo de unión y conexiones se emplearán para enlazar los tubos o tramos de tubería. Es importante que la tubería pueda ser reparable o al menos fácilmente reemplazable.

Por último, la tubería deberá mantener la calidad del agua sin añadir sabores, olores, o sustancias químicas al agua transportada. Por ello, las conexiones y uniones entre tubos no deben permitir la infiltración de sustancias contaminantes.

En el caso de México para abastecimiento de agua potable, los conductos son elaborados de: plástico, que puede ser policloruro de vinilo (PVC) o polietileno de alta densidad (PEAD), fibrocemento (FC), antes denominado asbesto-cemento (AC), hierro fundido, concreto presforzado y acero (Tabla 1.1).

Se recomienda tuberías de cloruro de polivinilo (PVC) para conducciones con gastos pequeños y con un diámetro menor o igual a 0.15 m. En el caso de conducciones con diámetros superiores a 0.15 m y con presiones menores de 14 kg/cm² se recomiendan las tuberías de asbesto-cemento. Para una conducción con diámetro mayor a 0.60 m y presiones mayores a 10 kg/cm², es recomendable elegir una tubería de asbesto-cemento, concreto presforzado o acero. Y cuando se tienen conducciones con presiones de trabajo superiores a 14 kg/cm² deberá hacerse un estudio económico entre tuberías de acero y concreto presforzado.



Tabla 1.1 Resumen de las ventajas y desventajas en los materiales de las tuberías. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.

Materiales y diámetros usuales	Sistema de unión	Piezas especiales	Ventajas	Desventajas
Policloruro de vinilo (PVC) (50 a 630mm)	Acoplamiento espiga-campana con anillo de hule	Se fabrican de PVC. Pueden usarse piezas de hierro fundido con adaptadores bridados de PVC.	<ul style="list-style-type: none"> * Bajo coeficiente de rugosidad * Ligereza * Instalación rápida, fácil y económica * Flexibilidad * Alta resistencia a la tensión * Alta resistencia a la corrosión y al ataque químico de ácidos, álcalis y soluciones salinas * Puede realizarse la prueba hidrostática inmediatamente después de su instalación * Mantenimiento nulo. 	<ul style="list-style-type: none"> * Susceptible a daños durante su manejo * Con temperaturas menores a 0°C se reduce su resistencia al impacto * Cuando conduce agua a temperatura superior a 25°C, disminuye la presión máxima de trabajo que puede soportar * La exposición prolongada a los rayos solares afecta sus propiedades mecánicas
Poliétileno de alta densidad (PEAD) (12 a 1,000mm)	Termofusión	Se fabrican de polietileno y se unen por termofusión. Pueden acoplarse a piezas especiales de hierro fundido por medio de adaptadores de polietileno.	<ul style="list-style-type: none"> * Bajo coeficiente de rugosidad * Flexibilidad * Ligereza * Instalación rápida, fácil y económica * Se puede instalar en zanjas poco profundas sin plantilla * No presenta corrosión * En diámetros menores a 100mm no se requiere válvulas de seccionamiento * Mantenimiento nulo 	<ul style="list-style-type: none"> * La presión de trabajo especificada puede alterarse al aumentar la temperatura exterior o interior * Se deteriora si se expone a la intemperie por periodos prolongados
Fibroceso (FC) (antes Asbesto-cemento, AC) (75 a 2,000mm)	Coples de fibrocemento con anillos de hule Junta Gibault	<p>Piezas de hierro fundido con bridas que se unen con extremidades bridadas y juntas Gibault a la tubería de fibrocemento.</p> <p>Piezas de hierro fundido con extremos lisos que se unen con juntas Gibault.</p> <p>Piezas de fibrocemento (en diámetros pequeños)</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Bajo costo * Ligereza * Hasta cierto grado es resistente al ataque de ácidos, sales y otras sustancias químicas. * Generalmente no se corroe * No favorece la formación de incrustaciones en las paredes 	<ul style="list-style-type: none"> * Frágil; puede agrietarse o romperse durante las maniobras de transporte, manejo, almacenaje e instalación
Hierro fundido (HF) (100 a 1,600mm)	Acoplamiento espiga-campana con anillo de hule. Extremos bridados. Junta mecánica. Junta Gibault	Se fabrican de hierro fundido con extremos lisos, campanas, campana para junta mecánica, y bridados	<ul style="list-style-type: none"> * Larga vida útil * Alta resistencia al impacto durante el transporte, manejo e instalación * Alta resistencia a la corrosión, pero susceptible a la tuberculización * Alta resistencia al aplastamiento o fracturas por cargas externas * Puede ser cortado o perforado en la obra * Mantenimiento casi nulo 	<ul style="list-style-type: none"> * Susceptible a la corrosión eléctrica o química si no es protegido * Alto peso por lo que es difícil su manejo * Mayor costo que otros tipos de tubería * En caso de requerirse, debe importarse, lo cual implica mayor costo
Concreto presforzado (760 a 2,750mm)	espiga-campana con anillo de hule. Uniones bridadas.	Piezas alma de acero recubierta de concreto, con extremos espiga-campana, extremos lisos o bridados	<ul style="list-style-type: none"> * Alta capacidad de conducción * Alta resistencia mecánica a presiones internas y cargas externas * Larga vida útil * Bajo mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> * Pueden ser atacadas por sulfatos si no se usa cemento resistente * Difícil de reparar * Conexiones complicadas
Acero (50.4 (2") a 355.6mm (14")), galvanizado (50.4 (2") a 152.4 (6"))	Soldadura. Extremos bridados. Juntas mecánicas para extremos lisos o ranurados	En general, se fabrican de tramos de tubería unidos con soldadura.	<ul style="list-style-type: none"> * Resiste presiones internas elevadas * Mayor ligereza y bajo costo en comparación con tuberías de hierro fundido o de concreto * Fácil adaptación a cualquier tipo de montaje 	<ul style="list-style-type: none"> * Es susceptible a la corrosión por lo que debe protegerse tanto el interior como el exterior (en el caso de tubería no galvanizada) * No soporta cargas externas ni vacíos parciales, pues es susceptible al aplastamiento * Requiere mantenimiento periódico

1.2.1.1. Tuberías de fibrocemento (FC)

Este tipo de tuberías se fabrican a base de cemento, fibras de asbesto y sílice (Figura 1.4) y deben cumplir con lo establecido en la Norma Mexicana NMX-C-012 vigente. El sistema de unión es con coples de fibrocemento. Los tubos se fabrican de cuatro o cinco metros de longitud útil en diámetros nominales desde 75 hasta 2 000 mm, donde los diámetros nominales de los tubos corresponden al diámetro interior, los tubos son de extremos espiga (Figura 1.5).



Figura 1.4 Tubería de fibrocemento.

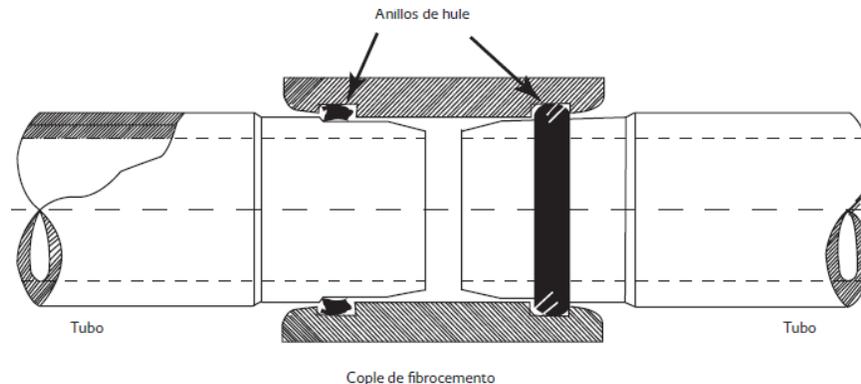


Figura 1.5 Unión de tubos de fibrocemento. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.

De acuerdo con la presión de trabajo, los tubos de fibrocemento se clasifican en cinco clases como se observa en la Tabla 1.2. Además, este tipo de tubos tienen otra clasificación dependiendo de la alcalinidad. El tipo I, son tubos con contenidos de hidróxido de calcio mayores al 1.0% y; el tipo II, son tubos con contenidos de hidróxido de calcio menores al 1.0%. La elección del tipo de tubería de fibrocemento dependerá de la agresividad del agua, el tipo II es más resistente.

Tabla 1.2 Clases de tubos de fibrocemento. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.

Clase	Presión interna de trabajo	
	MPa	kg/cm ²
A-5	0.5	5
A-7	0.7	7
A-10	1.0	10
A-14	1.4	14
A-20	2.0	20

Las ventajas que tienen los tubos de fibrocemento son:

- Ligereza
- Generalmente no se corroe ni se forman incrustaciones de óxido en las paredes del tubo.

Entre sus desventajas están:

- Requiere cuidados adicionales durante su transporte e instalación por su fragilidad.
- A menor longitud de tubo se requiere mayor número de coples.
- Requiere uso de mascarillas protectoras para evitar la inhalación del polvo en caso de que los tubos sean cortados en obra.



1.2.1.2. Tubería de hierro fundido (HF)

Las tuberías de este material (Figura 1.6) no son muy utilizadas en México en los acueductos debido al costo comparado con otras tuberías. Sin embargo, aún se utilizan en estaciones de bombeo e instalaciones donde se requiere rigidez y resistencia al impacto y a la corrosión. Principalmente, el hierro fundido se emplea en la fabricación de piezas especiales y válvulas, las cuales pueden ser usadas en tubería de diversos materiales. Existen dos tipos de hierro fundido: el hierro gris y el hierro dúctil. El hierro dúctil es una mejora al hierro gris, metal de mayor dureza y resistencia, es más utilizado.

Los tubos de hierro dúctil pueden ser unidos con varios tipos de juntas: bridas, mecánica, submarina, y espiga-campana con anillo de hule. Cada una consiste en:

- Las juntas bridadas poseen dos anillos idénticos hechos del material de la tubería (bridas) y perforados para fijarse entre sí por medio de tornillos. Cada uno se fija en los extremos de los tubos por unir, a través de algún método como el soldado o el roscado. Para mantener la hermeticidad de la junta se coloca un anillo de sellado entre ambas bridas.
- Las juntas mecánicas consisten en unir un tubo con un extremo bridado (brida fija) y en disposición campana con otro tubo espiga o liso, empleando una contrabrida (brida móvil) y un anillo de sellado.
- La junta submarina se emplea cuando se requiere que la tubería soporte fuertes deflexiones, como en el cruce de un río.

Las ventajas que tienen las tuberías de hierro dúctil son:

- Larga vida útil de aproximadamente 100 años.
- Alta resistencia mecánica a impactos y a cargas normales y extraordinarias, así como a la presión interna.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Es prácticamente libre de mantenimiento.
- El hierro dúctil puede ser soldado en forma económica.

Las desventajas que tienen los tubos de hierro dúctil son:

- Es susceptible a formaciones de óxido por aguas agresivas y suelos alcalinos. Para ello, se le aplican diversos revestimientos, en el interior se le aplica usualmente mortero de cemento, lo cual evita las formaciones de óxido y en el exterior una capa asfáltica.
- Peso relativamente alto, lo cual dificulta su manejo.
- Deben importarse porque no se fabrican en México.



Figura 1.6 Tubería de hierro fundido.

1.2.1.3. Tubería de concreto

La tubería de concreto (Figura 1.7) que se utiliza en agua potable es de concreto presforzado que puede ser con o sin cilindro de acero. Los tubos sin cilindro de acero se fabrican a partir de un tubo



primario, el cual puede o no contener acero de presfuerzo longitudinal y una vez que el concreto ha alcanzado su resistencia a la compresión, se le enrolla el acero de presfuerzo transversal en forma helicoidal y finalmente se le reviste con concreto. Estas tuberías deben cumplir con las especificaciones de la Norma Mexicana NMX-C-252-ONNCCE-2011, donde se detalla la calidad de los materiales.

En los tubos de concreto presforzado con cilindro de acero el tubo primario es un cilindro de lámina de acero con anillos soldados a sus extremos. El cilindro de acero, una vez sometido a una presión de prueba, es ahogado en un cilindro de concreto y una vez que el concreto logra su resistencia, se le somete al presfuerzo transversal y se le aplica el revestimiento de mortero o concreto. Estas tuberías deben cumplir con la Norma Mexicana NMX-C-253-ONNCCE-2011.

En ambos casos de tuberías de concreto se fabrican en diámetros entre 760 y 2,750 mm, con longitud útil entre 4 y 8 m. La tubería se diseña y fabrica de acuerdo a la presión de trabajo requerida y por las condiciones del proyecto. El sistema de unión de estas tuberías es espiga-campana con anillo de hule autocentrables y con flexibilidad suficiente para mantener su contracción y expansión así como asentamientos diferenciales del suelo.

Las ventajas de la tubería de concreto son:

- Alta resistencia mecánica, resiste el peso del relleno de la zanja, así como altas presiones.
- Alta capacidad de conducción.
- Larga vida útil.
- Bajo mantenimiento.

Entre las desventajas que presentan estas tuberías están:

- Posible corrosión cuando se encuentra en condiciones ácidas o alcalinas.
- Difícil de reparar en caso de sufrir daños.
- Puede resultar complicado realizar conexiones en la instalación.



Figura 1.7 Tubería de concreto.

1.2.1.4. Tubería de acero

La tubería de acero (Figura 1.8) y la tubería de concreto son utilizadas cuando se tienen altas presiones y se requieren grandes diámetros. La diferencia entre su uso es que las tuberías de concreto generalmente van enterradas mientras que las de acero se pueden emplear en instalaciones expuestas. El acero es una aleación de hierro-carbono para ser deformada en frío y en caliente.

Estas tuberías pueden tener diámetros de 50.4 mm (2") hasta 152.4 mm (6"), los cuales son generalmente revestidos con zinc tanto en el interior como en el exterior, en cuyo caso se les denomina galvanizados. Si no poseen tal recubrimiento se les llama tubos negros. Usar tuberías de acero obliga a su protección interior y exterior contra la corrosión. Estas tuberías deben cumplir con lo establecido en las Normas Mexicanas NMX-B-10 y NMX-B-177, las cuales se refieren a los tubos



de acero con o sin costura (longitudinal o helicoidal), negros o galvanizados. La NMX-B-10 trata de tubos de acero al carbono en diámetros de 3.175 mm (1/8") hasta 406.4 mm (16"), y la NMX-B-177 a los tubos de acero en diámetros de 3.175 mm (1/8") hasta 660.4 mm (26").

Estos tubos se clasifican según su proceso de fabricación en tres tipos:

- F Soldado a tope con soldadura continua por calentamiento en horno
- E Soldado por resistencia eléctrica
- S Sin costura

Los tipos E y S a su vez se dividen en grados A y B según la norma NMX-B-177.

La NMX-B-179 define las dimensiones normales en las cuales pueden fabricarse los tubos. En esta norma, se clasifican los tubos de acuerdo a su espesor de pared en tres clases denominadas: peso estándar E, extrafuerte XE y doble extrafuerte XXE. También, de acuerdo al espesor, se puede obtener el número de cédula, el cual representa en cierta forma una relación entre el espesor y el diámetro de la tubería. El número de cédula se estableció debido a la necesidad de usar tuberías a diferentes temperaturas y presiones.

El sistema de unión empleado en las tuberías de acero puede ser: soldadura, bridas, coples o ranuras con junta mecánica. El final de una tubería se prepara de acuerdo a la unión de la tubería y/o a los accesorios. Los tipos de extremos más comunes son:

- extremos planos o lisos (PE), usados para diámetros de tubería pequeños para unión con bridas *slip-on* y *socket weld*;
- extremos biselados (BE), es el más común y la unión es mediante soldadura;
- extremos roscados (TE), también es para diámetros pequeños con unión de brida roscada;
- roscado y acoplado (T&C), se usan en distribución de gas y la unión es con cople de acero; y,
- extremos ranurados (GE), permiten una conexión rápida.

Las ventajas de las tuberías de acero son:

- Alta resistencia mecánica. Resiste cargas de impacto y altas presiones internas
- Es más ligera que la tubería de concreto
- Fácil transporte e instalación

Las desventajas que tienen estas tuberías son:

- No soporta cargas externas grandes ni vacíos parciales, por lo que es susceptible al aplastamiento.
- Presenta corrosión, en este caso la corrosión es más severa que en el hierro fundido. Se requieren revestimientos internos y externos.
- Altos costos de mantenimiento y menor vida útil.



Figura 1.8 Tubería de acero.



1.2.1.5. Tuberías plásticas

El uso de tuberías plásticas para conductos se ha incrementado recientemente. Estas tuberías son fabricadas por un proceso de extrusión de materiales plásticos. El plástico se divide en dos categorías principales: termoplásticos y termoestables. Los primeros son aquellos donde el plástico expuesto a altas temperaturas puede fundirse y ser moldeado, este tipo de plásticos se derrite cuando se calienta y se endurece cuando se enfría, es posible volver a recalentarlos y que tomen otra forma; en el caso de los segundos, asumen una forma de manera permanente tras haber sido moldeados a altas temperaturas, no pueden volverse a fundir porque se queman, haciendo imposible volver a moldearlos (Tolentino, 2015).

En el mercado existen diferentes tipos de plásticos divididos en categorías por su composición. Entre los más importantes para la fabricación de tuberías se encuentran:

- Policloruro de vinilo (PVC)
- Policloruro de vinilo clorado (CPVC)
- Policloruro de vinilo con orientación molecular (PVCO)
- Polietileno (PE)
- Polipropileno (PP)
- Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV)

Principalmente las tuberías plásticas se fabrican de policloruro de vinilo (PVC) y de polietileno de alta densidad (PEAD). Las tuberías de CPVC y PVC son dos de los materiales más usados, el CPVC tiene mayor resistencia a la temperatura y a la presión que el PVC.

Las tuberías de plástico son aptas para la conducción de agua potable, porque no transmiten ningún tipo de sabor, olor o color al agua que transportan en su interior. Además, son de menor peso y menor densidad frente al resto de los materiales para la construcción de tuberías. Tienen menor rugosidad absoluta, lo que hace que las tuberías de plástico no presenten ninguna deformación.

Debido a la ausencia de incrustaciones en estos plásticos, a las tuberías no se adhieren materiales ni sedimentos en el transporte de líquidos en el interior ni en el exterior del tubo, es decir, que los tubos son totalmente lisos tanto en el interior como en el exterior.

El plástico es una alternativa a las tuberías de acero por el alto costo y son más fáciles de instalar. Durante un evento de presión alta, una tubería de plástico se expande al absorber un incremento en la presión.

PVC

El PVC fue inventado a finales del siglo XIX. Los tubos de policloruro de vinilo (PVC serie métrica) se fabrican en color blanco, de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-E-143 vigente, la cual considera el sistema de unión (un solo tipo) y el grado de calidad (también único) y lo denomina espiga-campana; por su resistencia a la presión de trabajo, clasifica los tubos en cinco clases (Tabla 1.3).

Tabla 1.3 Clases en tubos de PVC. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.

Clase	Presión máxima de trabajo	
	MPa	kg/cm ²
5	0.5	5
7	0.7	7
10	1.0	10
14	1.4	14
20	2.0	20



Como se observa en las Figuras 1.9 y 1.10, la junta espiga-campana se forma al insertar el extremo liso del tubo en el extremo campana del siguiente tubo, la unión es reforzada con un anillo de material elástico, misma que permite deflexiones y realizar la prueba hidrostática al terminar su instalación.

Los tubos de PVC en México se fabrican comúnmente con seis metros de longitud y en los siguientes diámetros en milímetros: 50, 63, 80, 100, 160, 200, 250, 315, 355, 400, 450, 500 y 630. El diámetro nominal de esta tubería es igual al diámetro exterior de la misma. La diferencia que existe entre las cinco clases de tubo ya mencionadas, es el espesor de la pared de la tubería.

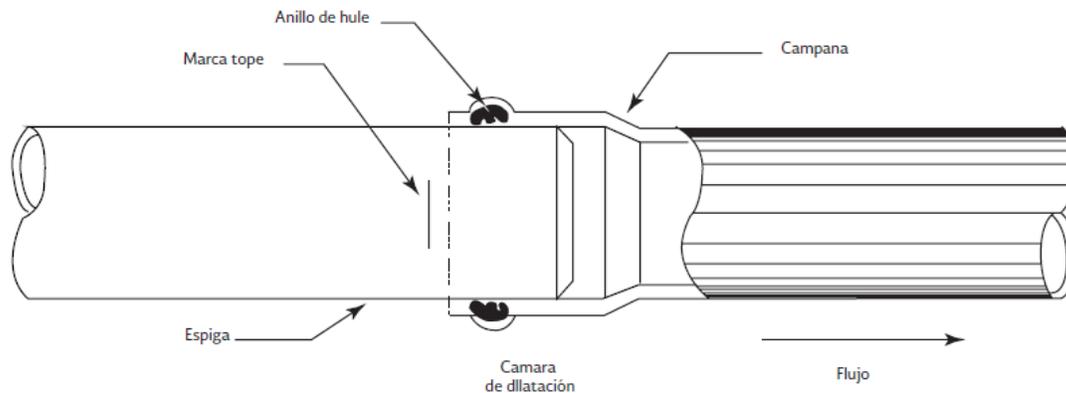


Figura 1.9. Junta espiga-campana. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.



Figura 1.10 Tubería de PVC.

En Estados Unidos las tuberías se fabrican de acuerdo a la norma de la AWWA (*American Water Works Association*), que establece las características de las tuberías de PVC y los accesorios para el transporte y distribución de agua. La tubería de PVC y los accesorios deben estar fabricados con resina de PVC virgen y deberá calificar para una base de diseño hidrostático de 4,000 psi (27.58 MPa) a 73.4°F (23°C). Las tuberías se suministrarán en longitudes de 20 ft ±1 in (6.1 m ± 25 mm) a menos que se indique lo contrario. Los diámetros en los que se fabrican son los mostrados en la Tabla 1.4.



Tabla 1.4 Dimensiones de la tubería de PVC. Fuente: AWWA-C905.

Diámetro nominal in	Relación de dimensión (RD)	Diámetro exterior - in(mm)		Espesor de pared - in(mm)	
		Promedio	Tolerancia	Mínimo	Tolerancia
14	41	15.300 (388.6)	±0.015 (0.38)	0.373 (9.47)	+0.052 (1.32)
	32.5	15.300 (388.6)	±0.015 (0.38)	0.471 (11.96)	+0.056 (1.42)
	25	15.300 (388.6)	±0.015 (0.38)	0.612 (15.54)	+0.073 (1.85)
	21	15.300 (388.6)	±0.015 (0.38)	0.729 (18.51)	+0.088 (2.22)
	18	15.300 (388.6)	±0.015 (0.38)	0.850 (21.59)	+0.102 (2.59)
16	41	17.400 (442.0)	±0.020 (0.51)	0.424 (10.77)	+0.059 (1.50)
	32.5	17.400 (442.0)	±0.020 (0.51)	0.535 (13.59)	+0.064 (1.63)
	25	17.400 (442.0)	±0.020 (0.51)	0.696 (17.68)	+0.084 (2.13)
	21	17.400 (442.0)	±0.020 (0.51)	0.829 (21.05)	+0.100 (2.54)
	18	17.400 (442.0)	±0.020 (0.51)	0.967 (24.56)	+0.116 (2.95)
18	41	19.500 (495.3)	±0.020 (0.51)	0.424 (10.77)	+0.059 (1.50)
	32.5	19.500 (495.3)	±0.020 (0.51)	0.527 (13.39)	+0.074 (1.88)
	25	19.500 (495.3)	±0.020 (0.51)	0.780 (19.81)	+0.094 (2.39)
	21	19.500 (495.3)	±0.020 (0.51)	0.929 (23.60)	+0.111 (2.82)
	18	19.500 (495.3)	±0.020 (0.51)	1.083 (27.51)	+0.130 (3.30)
20	41	21.600 (548.6)	±0.025 (0.64)	0.424 (10.77)	+0.059 (1.50)
	32.5	21.600 (548.6)	±0.025 (0.64)	0.527 (13.39)	+0.074 (1.88)
	25	21.600 (548.6)	±0.025 (0.64)	0.864 (21.95)	+0.104 (2.64)
	21	21.600 (548.6)	±0.025 (0.64)	1.029 (26.14)	+0.123 (3.12)
	18	21.600 (548.6)	±0.025 (0.64)	1.200 (30.48)	+0.144 (3.66)
24	41	25.800 (655.3)	±0.030 (0.76)	0.506 (12.85)	+0.071 (1.80)
	32.5	25.800 (655.3)	±0.030 (0.76)	0.794 (20.17)	+0.095 (2.41)
	25	25.800 (655.3)	±0.030 (0.76)	1.032 (26.21)	+0.124 (3.15)
	21	25.800 (655.3)	±0.030 (0.76)	1.229 (31.22)	+0.147 (3.73)
	18	25.800 (655.3)	±0.030 (0.76)	1.433 (36.40)	+0.172 (4.37)
30	41	32.000 (812.8)	±0.040 (1.02)	0.627 (15.93)	+0.088 (2.24)
	32.5	32.000 (812.8)	±0.040 (1.02)	0.780 (19.81)	+0.109 (2.77)
	25	32.000 (812.8)	±0.040 (1.02)	0.985 (25.02)	+0.118 (3.00)
	21	32.000 (812.8)	±0.040 (1.02)	1.280 (32.51)	+0.154 (3.91)
	18	32.000 (812.8)	±0.040 (1.02)	1.524 (38.71)	+0.183 (4.65)
36	41	38.300 (972.8)	±0.050 (1.27)	0.751 (19.08)	+0.105 (2.67)
	32.5	38.300 (972.8)	±0.050 (1.27)	0.934 (23.72)	+0.131 (3.33)
	25	38.300 (972.8)	±0.050 (1.27)	1.178 (29.92)	+0.141 (3.58)
	21	38.300 (972.8)	±0.050 (1.27)	1.532 (38.91)	+0.184 (4.67)
	18	38.300 (972.8)	±0.050 (1.27)	1.824 (46.33)	+0.219 (5.56)
42	41	44.500 (1,130.3)	±0.060 (1.52)	0.872 (22.15)	+0.122 (3.10)
	32.5	44.500 (1,130.3)	±0.060 (1.52)	1.085 (27.56)	+0.152 (3.86)
	25	44.500 (1,130.3)	±0.060 (1.52)	1.369 (34.77)	+0.164 (4.17)
	21	44.500 (1,130.3)	±0.060 (1.52)	1.780 (45.21)	+0.214 (5.44)
	18	44.500 (1,130.3)	±0.060 (1.52)	2.032 (51.61)	+0.244 (6.20)
48	41	50.800 (1,290.3)	±0.075 (1.90)	0.996 (25.30)	+0.139 (3.53)
	32.5	50.800 (1,290.3)	±0.075 (1.90)	1.239 (31.47)	+0.173 (4.39)
	25	50.800 (1,290.3)	±0.075 (1.90)	1.563 (39.70)	+0.188 (4.78)
	21	50.800 (1,290.3)	±0.075 (1.90)	1.932 (49.18)	+0.224 (5.69)
	18	50.800 (1,290.3)	±0.075 (1.90)	2.301 (58.45)	+0.264 (6.70)

De acuerdo con la AWWA la presión nominal (PR) es la capacidad de diseño designada de una tubería, en libras por pulgada cuadrada (psi), que corresponde a su funcionamiento máximo seguro recomendado de presión (Tabla 1.5). Las designaciones de presión nominal se basan en pruebas de presión a largo plazo a 23°C.



Tabla 1.5 Presión nominal en tuberías de PVC. Fuente: AWWA C905.

Relación de dimensión (RD)	Presión nominal (PR)	
	psi	kPa
51	80	(550)
41	100	(690)
32.5	125	(860)
26	160	(1,100)
25	165	(1,140)
21	200	(1,380)
18	235	(1,620)
14	305	(2,110)

Emplear tubería de PVC tiene las siguientes ventajas:

- La hermeticidad, el PVC impide filtraciones y fugas, lo cual se garantiza si los tubos cuentan con una junta hermética. Se recomienda la unión espiga-campana con anillo de hule integrado porque actúa como junta de dilatación.
- Pared interior lisa. Debido a esta condición, presenta bajas pérdidas por fricción, por lo cual tiene alta eficiencia en la conducción de fluidos.
- Resistencia a la corrosión y resistencia química. La tubería de PVC no puede ser dañada por aguas agresivas o suelos corrosivos. El PVC no tiene corrosión, por lo que no requiere recubrimientos, forros ni protección catódica. Además, no se forman incrustaciones ni formaciones de óxido. El PVC es altamente resistente a suelos agresivos, ácidos, álcalis y soluciones salinas. También, resiste el ataque de algas, hongos y bacterias.
- Las tuberías de PVC son ligeras. Por ello, son fáciles de transportar, manejar y colocar.
- Flexibilidad, lo que ayuda en la instalación.
- Resistencia a la tensión, tiene un mejor comportamiento frente a movimientos sísmicos, cargas extremas y sobrepresiones momentáneas como las generadas por los transitorios hidráulicos.
- Fácil instalación, como se mencionó anteriormente por ser flexible puede manejarse y cortarse en obra.
- No se tienen registros de que estas tuberías se vean afectadas por microorganismos como bacterias u hongos.
- No altera la calidad del agua.

Por otro lado, entre las desventajas que tienen las tuberías de PVC están:

- Son susceptibles a dañarse durante su manejo, afectando propiedades como su resistencia por raspaduras, aplastamiento por rocas o relleno de zanjas. Por ello, se recomienda que si la raspadura es mayor al 10% del espesor del tubo se reemplace o repare la tubería.
- No son recomendadas en lugares donde serán continuamente expuestas al sol sin algún recubrimiento como pintura, debido al efecto de degradación ultravioleta que ocurre cuando la radiación UV causa excitación de los enlaces moleculares del plástico, produce un cambio en el color del PVC a amarillo y reduce la resistencia del material.
- Las tuberías de PVC modifican sus condiciones por la temperatura, debido a que es un termoplástico. Sometidas a temperaturas menores a 0 °C reducen su resistencia al impacto y en temperaturas mayores a 25°C reducen su presión de trabajo. También, si son expuestas de manera prolongada a los rayos solares reducen su resistencia mecánica.
- Son susceptibles a ser permeadas por solventes orgánicos y productos del petróleo de muy bajo peso molecular en caso de que la tubería pase por un área subterránea con contaminación.



PVCO

El PVCO (Policloruro de vinilo con orientación molecular) es una nueva alternativa en tuberías plásticas (Figura 1.11) que ha sido instalada en Europa desde 1970 y en Estados Unidos desde 1991. El PVCO es fabricado a partir de PVC convencional pero mediante un proceso que orienta las moléculas. Es una tubería de pared más delgada, más resistente, con mayor capacidad hidráulica, más liviana, más fácil de instalar, más económica y resistente al sol. Actualmente se consiguen en el mercado tuberías de PVCO de hasta 850 mm de diámetro y para presiones de trabajo de hasta 250 mca.

Entre las ventajas de estas tuberías se encuentran:

- No pueden ser fácilmente destruidas por impactos ordinarios.
- Mayor vida útil que el PVC.
- Resistencia a la corrosión, no puede ser dañada por aguas agresivas o suelos corrosivos.
- La calidad del fluido transportado permanece inalterada.
- Mayor capacidad hidráulica por la disminución en el espesor de pared provocado por la orientación molecular.
- Tiene mayor flexibilidad y ligereza.
- Mejor comportamiento ante fenómenos de transitorios hidráulicos.
- Menor costo de instalación y de mantenimiento.

En cuanto a las desventajas, son las siguientes:

- Al igual que las tuberías de PVC, no son recomendadas en lugares donde serán continuamente expuestas al sol sin algún recubrimiento como pintura.
- Modifican sus condiciones por la temperatura, debido a que es un termoplástico.
- Son susceptibles a ser permeadas por solventes orgánicos y productos del petróleo de muy bajo peso molecular en caso de que la tubería pase por un área subterránea con contaminación.



Figura 1.11 Tubería de PVCO.

Polietileno (PE)

Los tubos de polietileno (PE serie métrica) (Figura 1.12), se fabrican de acuerdo con las especificaciones contenidas en la Norma Mexicana NMX-E-144 vigente, en color negro, cilíndricos y sin costura. Por la densidad de la materia prima se clasifican en tres tipos:



Figura 1.12 Tubería de polietileno.



Tipo I. Tubos de polietileno de baja densidad (PEBD) (0.91 a 0.925 g/cm^3) con un esfuerzo de diseño de 2.45 MPa (25 kg/cm^2).

Tipo II. Tubos de polietileno de media densidad (PEMD) (0.926 a 0.940 g/cm^3) con un esfuerzo de diseño de 3.13 MPa (32 kg/cm^2).

Tipo III. Tubos de polietileno de alta densidad (PEAD) (mayor o igual a 0.941 g/cm^3) con un esfuerzo de diseño de 4.90 MPa (50 kg/cm^2) y por su presión máxima de trabajo en cinco clases como se observa en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6 Clases de las tuberías Tipo III de PE. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.

Clase	Presión máxima de trabajo	
	MPa	kg/cm^2
2.5	0.25	2.5
4	0.39	4
6	0.6	6
8	0.78	8
10	1.0	10

El diámetro nominal de las tuberías de polietileno es el mismo que el diámetro interior y se encuentran en los siguientes diámetros en milímetros: 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 75, 90, 110, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 560, 630, 710, 900 y 1000. Los tubos de PE en diámetros menores a 75mm vienen en rollos y para diámetros mayores son por tramo. El espesor de la pared de estos tubos depende del tipo y de la clase del tubo. En el caso de los conductos de agua potable es recomendable emplear tubería de polietileno de alta densidad (PEAD).

Entre las ventajas de estas tuberías están: la hermeticidad, alta capacidad de conducción, resistencia a la corrosión y resistencia química, ligereza, flexibilidad, fácil instalación y no alteran la calidad del agua. Otras ventajas que tienen son:

- Termofusión. Las uniones se logran aplicando calor, uniendo las piezas con herramientas específicas y fáciles de utilizar. Por ello, no se requieren piezas especiales de hierro fundido, se utilizan conexiones especiales de polietileno unidas por termofusión como las que se observan a continuación en la Figura 1.13;

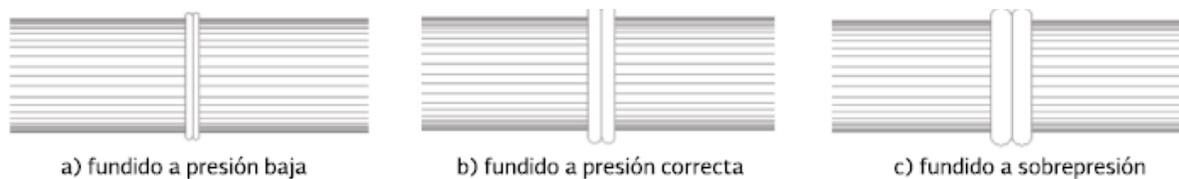


Figura 1.13 Uniones por termofusión. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.

- Economía. Las zanjas son más reducidas que para otras tuberías, por lo que es menor el costo de las excavaciones y el relleno.
- Compresibilidad. En el caso de diámetros menores a 100 mm no son necesarias las válvulas de seccionamiento, en su lugar se utiliza una prensa portátil que al ejercer presión en la tubería corta el flujo. En el caso de diámetros mayores a 100 mm se emplean válvulas conectadas a la tubería mediante un adaptador bridado de polietileno.



- Rapidez de instalación. Para diámetros menores a 75 mm solamente requiere una unión por venir en rollos.
- Compatibilidad. Existen adaptadores especiales para cada tipo de unión (brida, rosca interna o externa, soldadura o compresión) y materiales a los que se une (PVC, cobre, FC o acero).
- Durabilidad. Aún con mantenimiento nulo, puede tener una vida útil de 50 años y en caso de estar a la intemperie 15 años.

Entre las desventajas que presentan está un mayor costo que las tuberías de otros materiales.

Polipropileno (PP)

El polipropileno (PP) es un material duro, resistente al calor, es un material semi-rígido ideal para la transferencia de líquidos calientes o gases. Además, es económico con propiedades térmicas que no se encuentran en otros termoplásticos.

El PP tiene una resistencia menor al impacto, pero la temperatura de trabajo es superior y tiene mejor resistencia a la tensión. Las tuberías a base de polipropileno son muy ligeras y generalmente tiene mejor resistencia química que otros plásticos.

El principal uso de estas tuberías es en líneas de baja presión. Con la estabilización ultravioleta (UV), las tuberías de PP ofrecen 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.

Hace más de 30 años, investigadores alemanes desarrollaron el Polipropileno Copolímero Random (PP-R). Esta tubería (Figura 1.14) soporta altas presiones y temperaturas, tiene buena resistencia a los impactos, gran durabilidad y ausencia de corrosión. Su sistema de unión es con termofusión.



Figura 1.14 Tubería de Polipropileno Copolímero Random. Fuente: Rotoplas®.

Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV)

El PRFV es un material compuesto de resina de poliéster combinada con fibras de vidrio y cargas de arena (Figura 1.15), que al unirse crean un producto con buenas propiedades mecánicas. El uso de materiales reforzados con fibra de vidrio comenzó a usarse a partir de los años 1930's. Entre sus ventajas se encuentran: resistente a la corrosión, alta resistencia mecánica, no necesita revestimiento, larga vida útil, bajo costo de mantenimiento, menor celeridad de onda, ligero y flexible. Su fabricación debe cumplir con la AWWA C-950.



Figura 1.15 Tubería de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio.



1.2.2 Conexiones y piezas especiales

Las piezas especiales son todos aquellos accesorios de la tubería que permiten formar cambios de dirección, ramificaciones e intersecciones, así como conexiones incluso entre tubería de diferente material y diámetros. También permiten la inserción de válvulas y la conexión con estaciones de bombeo y otras instalaciones hidráulicas.

Juntas

Estas conexiones se utilizan para unir dos tuberías. Pueden ser de materiales rígidos, semi-rígidos o flexibles. Por ejemplo, dentro de las primeras que se encuentran, están las de metal como: Gibault (Figura 1.16) o Dresser.

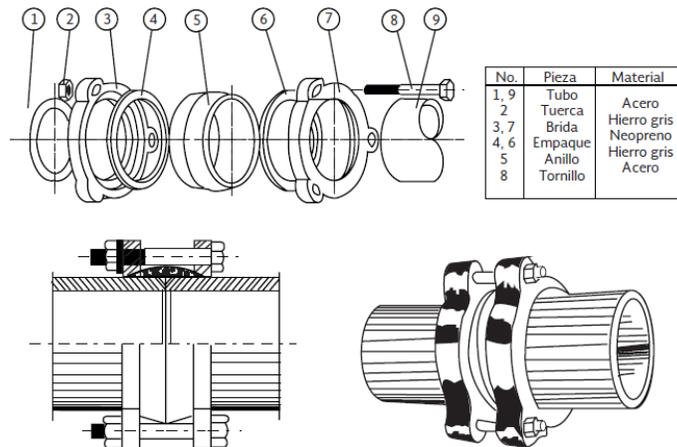


Figura 1.16 Junta Gibault. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12-Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable.

Carretes

Tubos de pequeña longitud provistos de bridas en los extremos para su unión (Figura 1.17). Se fabrican de fierro fundido con longitudes de 25, 50, y 75 cm.



Figura 1.17 Carrete.

Extremidades

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

Tees

Éstas se utilizan para unir tres conductos en forma de T (Figura 1.18), donde las tres uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos de igual diámetro y uno menor, cuando esto último ocurre se le llama tee reducción.



Figura 1.18 Tee en diferentes materiales.

Cruces

Estas conexiones se utilizan para unir cuatro tuberías en forma de cruz (Figura 1.19), donde las cuatro uniones pueden ser del mismo diámetro, o dos mayores de igual diámetro y dos menores de igual diámetro, cuando esto último ocurre se le llama cruz reducción.



Figura 1.19 Cruces en diferentes materiales.

Codos

Estas conexiones tienen la función de unir dos tuberías del mismo diámetro en un cambio de dirección ya sea horizontal o vertical, entre las más comunes se encuentra de 22.5, 45 y 90 grados (Figura 1.20). Sin embargo, los ángulos disponibles varían en función del material y el diámetro de la tubería. Incluso es recomendable consultar con el fabricante aquellas tuberías que pueden adoptar deflexiones diferentes a las mencionadas.



Figura 1.20 Codos en diferentes materiales.

Reducciones

Se emplean para unir dos tuberías de diferente diámetro (Figura 1.21). En algunos materiales, como el PVC, las reducciones pueden ser en forma de espiga o de campana.



Figura 1.21 Reducciones en diferentes materiales.



Coples

Pequeños tramos de tubo de PVC o de fibrocemento que se utilizan para unir las espigas de dos conductos del mismo diámetro (Figura 1.22). Los cuales pueden ser también de reparación, en cuyo caso se deslizan libremente sobre los tubos para facilitar la unión.



Figura 1.22 Coples en diferentes materiales.

Tapones y tapas

Estos se colocan en los extremos de un conducto con la función de evitar la salida de flujo (Figura 1.23). En materiales de PVC, es costumbre llamarlos tapones, pudiendo ser en forma de campana o espiga. En materiales de fierro fundido, se acostumbra llamarlos tapas ciegas.



Figura 1.23 Tapones en diferentes materiales.

1.2.3 Tanques

Los tanques (Figura 1.24), también llamados almacenamientos, son utilizados en la distribución de agua para asegurar la cantidad y la presión del agua disponible en el sistema.

Las conducciones entregan el agua a un tanque de entrega ubicado al final de la conducción. Los tanques de regulación con ubicación intermedia permiten un mejor control.

Los tanques pueden estar enterrados, semienterrados, en superficie o elevados, dependiendo de su construcción y las condiciones topográficas. Emplean comúnmente tubos separados de entrada y de salida, o un solo tubo por donde el agua puede entrar y salir al almacenamiento, este es el caso de los tanques elevados.

El volumen de almacenamiento de los tanques se compone principalmente de un volumen para regular y otro volumen para almacenar en caso de falla en la fuente. El primer volumen es para regular un abastecimiento constante de la fuente y la demanda variable de la zona de servicio. El segundo es en caso de una falla de energía por ejemplo que afecte el bombeo.

Un tanque de regulación permite regular las presiones en la red y con ello reducir las fluctuaciones de presión debidas a las variaciones de la demanda. También, permite elevar la presión en puntos lejanos de los tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo. Y, permite regular la carga de las bombas, debido a que las cargas de bombeo son más uniformes.



Figura 1.24 Esquema de un tanque.

1.2.4 Válvulas

Las válvulas son una parte importante en el diseño de conductos. Se emplean para regular el gasto y la presión, para proteger el tubo y el equipo de bombeo si es el caso, ayudan a aminorar las presiones generadas en un transitorio, evitan el flujo inverso, remueven el aire, entre otras funciones. Seleccionar y operar una válvula correctamente es indispensable para evitar problemas. Los factores para la selección correcta de una válvula son:

- Las condiciones en las que operará la válvula.
- Definir una especificación compatible con lo que existe comercialmente o requiere una válvula de fabricación especial en particular.

Además, las válvulas son colocadas en puntos intermedios de los acueductos por lo que es importante revisar la ubicación de la válvula, las condiciones de presión y temperatura a las que operará, el tipo de válvula, material y tamaño. Las principales válvulas usadas en los acueductos son: de control, cuya función es controlar el flujo o disipar el exceso de energía, para seccionar o para permitir el llenado y vaciado de la conducción; y, de control de aire, cuya función es remover o admitir aire durante el transitorio o durante el llenado o vaciado del conducto.

Las válvulas para el control de flujo deben ser capaces de operar parcialmente cerradas sin tener daño, dentro de este tipo entran las válvulas de aguja (Figura 1.25), de globo (Figura 1.26) y de paso anular (Figura 1.27).

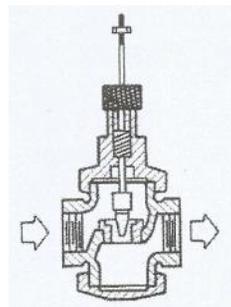


Figura 1.25 Válvula de aguja. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.

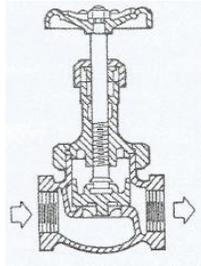


Figura 1.26 Válvula de globo. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.

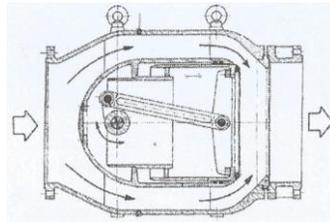


Figura 1.27 Válvula de paso anular. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Las válvulas de seccionamiento presentan una pérdida de carga muy baja, por lo que al operar totalmente abiertas prácticamente no perturban el flujo. Entre este tipo de válvulas se encuentran las de compuerta (Figura 1.28), esfera (Figura 1.29) y mariposa (Figura 1.30).

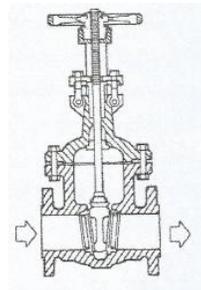


Figura 1.28. Válvula de compuerta. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.

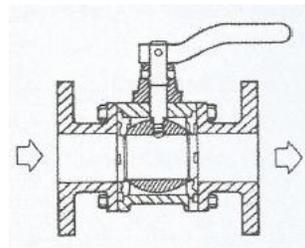


Figura 1.29. Válvula de esfera. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.

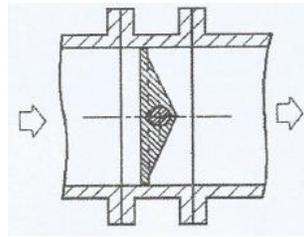


Figura 1.30. Válvula de mariposa. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Las válvulas de retención o check (Figura 1.31) permiten que la dirección del flujo sea en una sola dirección. Los diseños más sofisticados de estas válvulas permiten un cierre controlado para evitar un golpe de ariete por un cierre brusco.

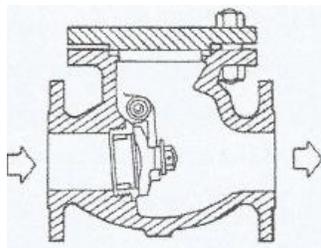


Figura 1.31. Válvula de retención. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.

También están las válvulas de aire que son comúnmente usadas para el control de transitorios. En la Tabla 1.7 se resumen las válvulas y sus funciones.

Tabla 1.7 Tabla resumen de las válvulas de uso frecuente. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 10-Conducciones.

Tipo de válvula	Función
Válvula de control - Disipación de energía y control de cavitación - Seccionamiento	- Controlan el flujo y disipan los excesos de energía, además de limitar la cavitación a niveles aceptables - Para aislar bombas o secciones de tubería Para mantenimiento
Válvulas reguladoras de presión -Aliviadoras de presión - Reductora o sostenedora de presión - Anticipadora de transitorio	- Protegen a la tubería de presiones excesivas -Mantienen constante la presión en la conducción, se activa hidráulicamente -Protege anticipadamente de sobrepresiones generadas por el transitorio, al activarse cuando se inicia éste
Válvulas de no retorno	Impiden el retroceso del flujo
Válvulas de aire - Válvulas de admisión y expulsión - Válvula eliminadora de aire	-Admiten y expulsan aire durante el vaciado y llenado respectivamente - Eliminan el aire que contiene el agua en solución y que al separarse se acumula en los puntos altos del perfil



1.2.4.1 Válvulas de aire

Las válvulas de aire son dispositivos diseñados para liberar o admitir aire automáticamente durante el llenado, vaciado, o el funcionamiento de un conducto de agua. El funcionamiento seguro y eficiente de un conducto depende de la continua extracción de aire de la tubería.

Un volumen de agua contiene aproximadamente dos por ciento de aire disuelto en condiciones estándar (1 kg/cm^2 a 21°C), pero puede contener más, dependiendo de la presión y la temperatura del agua dentro de la tubería (Pozos, 2012). Cuando el agua se presuriza, su capacidad para retener el aire se amplía considerablemente.

El aire en solución en un ducto sale a causa de la baja presión en zonas creadas por válvulas parcialmente abiertas, las variaciones en la velocidad de flujo causada por el cambio de diámetros y pendientes, y los cambios en la elevación del conducto. El aire también puede entrar a la tubería por fugas en las juntas donde la presión dentro de la tubería cae por debajo de la presión atmosférica (Pozos, 2012).

Si se forma una bolsa de aire, ésta puede reducir el flujo de agua en un conducto al reducir el área transversal de la tubería, y podrá, si el volumen de la bolsa de aire es suficiente, completamente detener el flujo de agua.

Las bolsas de aire aumentan la pérdida de carga en el conducto, disminuyen el flujo de agua y, en el caso de conductos a presión, incrementa el consumo de energía en el bombeo de agua. Las bolsas de aire también pueden contribuir a problemas de golpe de ariete, además de roturas, ruido y corrosión en las tuberías y puede causar un mal funcionamiento de las válvulas de control, medidores y equipo.

La ubicación apropiada de las válvulas de aire es tan importante como el tamaño adecuado de las mismas, ya que una ubicación inadecuada puede resultar en una válvula de aire ineficaz.

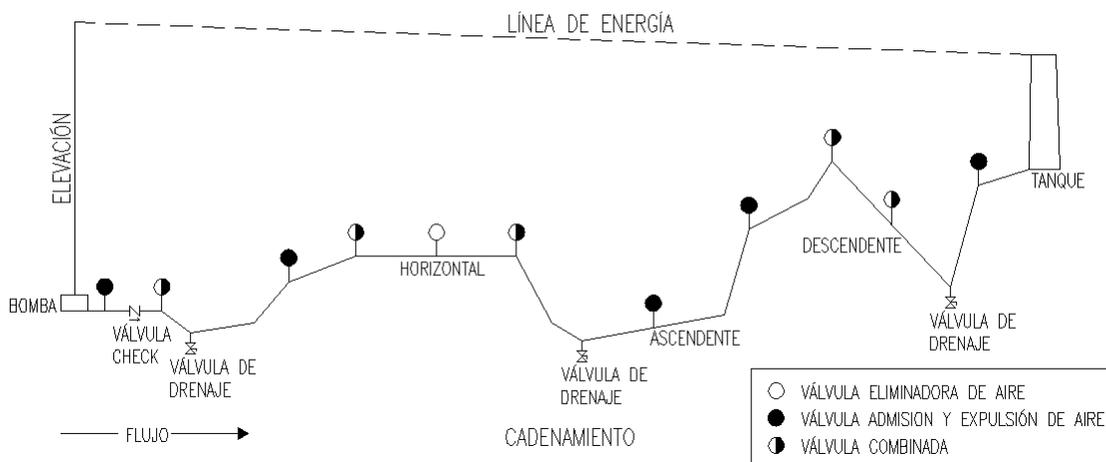


Figura 1.32 Ubicación de las válvulas de aire a lo largo de un conducto. Fuente: AWWA, 2001. *Manual of Water Supply Practices M51*.

Es recomendable que las válvulas de aire se instalen en las siguientes ubicaciones (Figura 1.32):

- En los puntos altos son mejores las válvulas de admisión, expulsión y eliminación de aire (válvulas combinadas, ver descripción de operación más adelante) para proporcionar ventilación, durante el llenado, durante la operación normal del conducto y para protección de vacío, mientras que la tubería es vaciada.



- Las válvulas de admisión y expulsión de aire o una válvula combinada pueden ser utilizadas para facilitar el vaciado de la tubería.
- En los cambios bruscos de pendiente en un tramo descendente es recomendable el uso de una válvula de aire combinada.
- En una disminución de pendiente repentina es mejor instalar una válvula de admisión y expulsión de aire o una válvula de aire combinada.
- En tramos ascendentes largos instalar una válvula de admisión y expulsión de aire o una válvula de aire combinada debe ser considerada en intervalos de 400 m a 800 m de longitud en conductos.
- En tramos descendentes largos instalar una válvula eliminadora de aire o una válvula de aire combinada para intervalos de 400 m a 800 m de longitud en conductos.
- Las válvulas de aire combinadas deben ser consideradas al comienzo y al final de largas secciones horizontales, y las válvulas eliminadoras de aire o una válvula de aire combinada debe ser considerada en intervalos de 400 m a 800 m a lo largo de secciones horizontales del conducto. Es difícil evacuar el aire de una larga tubería horizontal a bajas velocidades de flujo.
- Las válvulas eliminadoras de aire deben instalarse antes de un Venturi para eliminar errores de medición causados por el aire atrapado.
- Las válvulas de admisión y expulsión de aire deben instalarse en el lado de descarga en bombas verticales para extraer el aire de la columna del pozo durante el arranque de la bomba y para permitir que el aire vuelva a introducirse en la línea después del paro de la bomba.
- En el caso de un sifón es recomendable instalar una válvula eliminadora de aire en el punto más alto del sifón para expulsar el aire.

Válvulas Eliminadoras de Aire (VEA)

Las válvulas eliminadoras de aire o válvulas de orificio pequeño (Figura 1.33), están diseñadas para liberar automáticamente pequeñas bolsas de aire acumulado en un conducto mientras el sistema funciona a una presión superior a la presión atmosférica. Estas válvulas de aire se caracterizan por los orificios de salida, que son mucho más pequeñas que la conexión de entrada o el tamaño del tubo. Los tamaños del orificio generalmente van de 1/16" (1.6 mm) a 1" (25 mm) de diámetro, mientras que las conexiones de la entrada pueden variar de 1/2" (13 mm) a 6" (150 mm) de diámetro (AWWA, 2001).

Cuando el agua entra en la válvula, el flotador sube, cerrando el orificio. Una vez que el aire acumulado en la tubería entra en la válvula, éste reemplaza el agua, causando la caída de flotación y permitiendo que el aire a través del orificio sea expulsado.

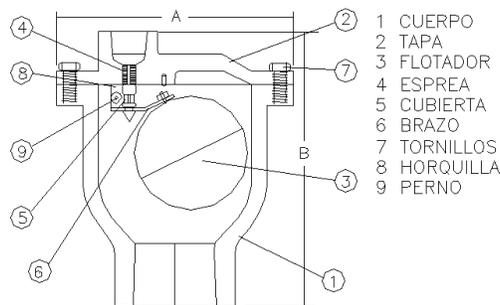


Figura 1.33. Válvula de Eliminación de Aire. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Anexos Instalaciones electromecánicas.



Válvulas de Admisión y Expulsión de Aire (VAEA)

Las válvulas de admisión y expulsión de aire o también llamadas válvulas de orificio grande (Figura 1.34), están diseñadas para expulsar grandes cantidades de aire automáticamente durante el llenado del conducto y para admitir igualmente grandes cantidades de aire automáticamente cuando la presión interna desciende por debajo de la presión atmosférica. La depresión puede ser causada por un transitorio, vaciado de la tubería, falla de la bomba, o una rotura en el conducto. Estas válvulas se caracterizan por orificios entre ½" (13 mm) a 20" (500 mm) de diámetro nominal. En el llenado de la conducción con agua, esta válvula debe ser capaz de expulsar el aire dentro de la tubería de manera uniforme para evitar los picos de presión y, cuando exista una falla en la alimentación del conducto, debe ser capaz de admitir aire para evitar la formación de un vacío que pueda colapsar la tubería (AWWA, 2001).

En cuanto al funcionamiento de la válvula, es similar a la de expulsión de aire pero con un diámetro de orificio mayor. Cuando el agua entra en la válvula durante el llenado del conducto, el flotador sube y cierra el orificio, una vez cerrada no se vuelve a abrir mientras esté operando el conducto a una presión mayor a la presión atmosférica.

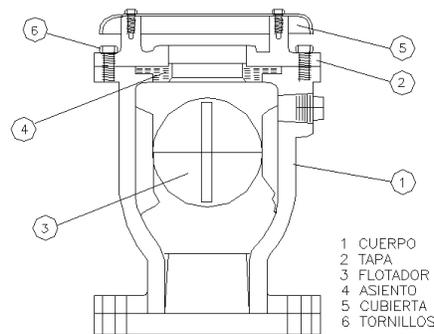


Figura 1.34. Válvula de Admisión y Expulsión de Aire. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Anexos Instalaciones electromecánicas.

Válvulas de Admisión, Expulsión y Eliminación de Aire (VAC)

Estas válvulas de aire combinadas están diseñadas para realizar la misma función que la válvula de admisión y expulsión de aire y, además, liberan automáticamente pequeñas bolsas de aire de la tubería mientras está bajo presión como una válvula eliminadora de aire (AWWA, 2001). Este tipo de válvulas pueden ser de un solo cuerpo (Figura 1.35) o en una configuración de doble cuerpo (Figura 1.36).

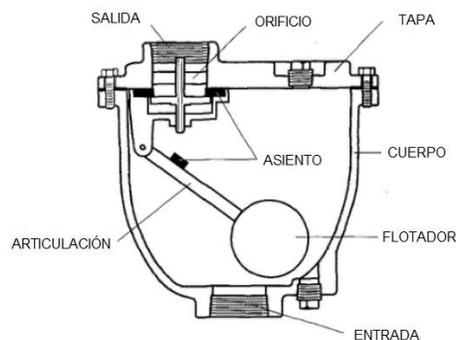


Figura 1.35. Válvula de Admisión, Expulsión y Eliminación de Aire de un solo cuerpo. Fuente: AWWA, 2001. *Manual of Water Supply Practices M51*.

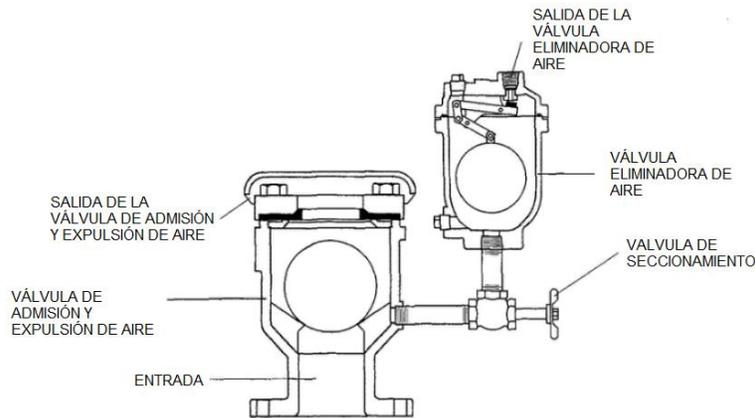


Figura 1.36. Válvula de Admisión, Expulsión y Eliminación de Aire de doble cuerpo. Fuente: AWWA, 2001. *Manual of Water Supply Practices M51*.

1.2.5 Dispositivos para control de transitorios

Las envolventes de cargas extremas, mínimas y máximas, deben ubicarse entre el perfil de la conducción y la línea de resistencia de la tubería. En caso de que no suceda lo anterior, el conducto deberá contar con dispositivos de control de transitorios hidráulicos que pueden ser simples accesorios o estructuras complejas. Además, en ocasiones basta con un solo dispositivo de control a lo largo de toda la conducción y en otros casos es necesario instalar dispositivos adicionales.

1.2.5.1. Torre de oscilación

Dispositivo que permite confinar un transitorio hidráulico rápido, donde las perturbaciones son reflejadas y no se propaga hacia aguas abajo de la conducción. Es un depósito abierto a la atmósfera cuya área transversal no necesariamente es constante y está conectado de manera directa al conducto (Figura 1.37). En este caso se producirá un transitorio lento o un fenómeno de oscilación de masa entre la torre y el tanque de almacenamiento ubicado al final de la conducción. En la Tabla 1.8 se observan las ventajas y desventajas del tanque de oscilación.

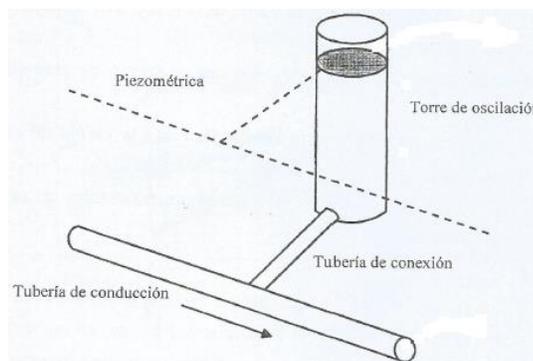


Figura 1.37 Esquema de una torre de oscilación. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.



Tabla 1.8 Ventajas y desventajas del tanque de oscilación.

Ventajas	Desventajas
No requiere mantenimiento eléctrico ni mecánico.	Por estar abierta a la atmósfera y conectada directamente a la conducción, requiere que su coronamiento esté por encima del nivel piezométrico.
	El desplante de la torre debe estar por debajo de la línea piezométrica correspondiente a gasto nulo, esto para evitar el vaciado.
	Estructura de gran altura con un gran costo.

1.2.5.2. Tanque unidireccional

En el caso de este dispositivo, la conexión a la conducción requiere una válvula de retención que permite el flujo únicamente en la dirección del tanque a la conducción y con ello, el nivel de la superficie libre en el interior del tanque puede ubicarse por debajo de la línea piezométrica de operación normal (Figura 1.38). Este tipo de tanque permite el paso de una onda de baja presión de menor magnitud hacia aguas abajo de la conducción debido a que sólo refleja en forma parcial la onda incidente. Al ocurrir la onda de depresión el tanque está aislado por la válvula de retención, una vez que la piezométrica desciende lo necesario para que la válvula se abra es entonces que el tanque actúa como deflector parcial de la onda de baja presión, el tanque aporta un volumen de agua para el control parcial de la onda de baja presión. Después de realizar su función debe llenarse nuevamente el tanque para otra operación futura. En la Tabla 1.9 se observan las ventajas y desventajas del tanque unidireccional.

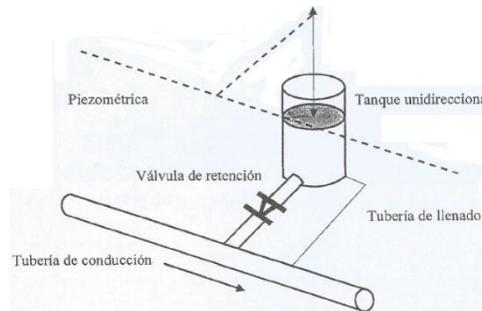


Figura 1.38 Esquema de un tanque unidireccional. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Tabla 1.9 Ventajas y desventajas del tanque unidireccional.

Ventajas	Desventajas
Baja altura debido a que su coronamiento está por debajo de la línea piezométrica.	Requiere mantenimiento mecánico periódico en la válvula de retención y la tubería de llenado.
	Comúnmente requiere de dispositivos de control secundarios, por ello son usados frecuentemente como dispositivos secundarios.

1.2.5.3. Cámara de aire

Estructura hermética en cuyo interior se almacena agua y aire comprimido, es un recipiente hidroneumático (Figura 1.39). La cámara de aire se conecta directamente a la conducción, funciona parecido a la torre de oscilación salvo que ésta tiene un volumen de aire comprimido en el interior a una presión equivalente a la columna de agua que impone en ese punto la línea de cargas piezométricas. Además, requiere de un compresor de aire para suministrar y manejar el aire.



Comúnmente se le conoce como cámara de oscilación, traduce el fenómeno transitorio rápido en un fenómeno de oscilación de masa. En ella se presentan ciclos de expansión y compresión de aire hasta que por la fricción el nivel de agua se estabiliza a la presión correspondiente a la condición de gasto nulo. En la Tabla 1.10 se observan las ventajas y desventajas de la cámara de aire.

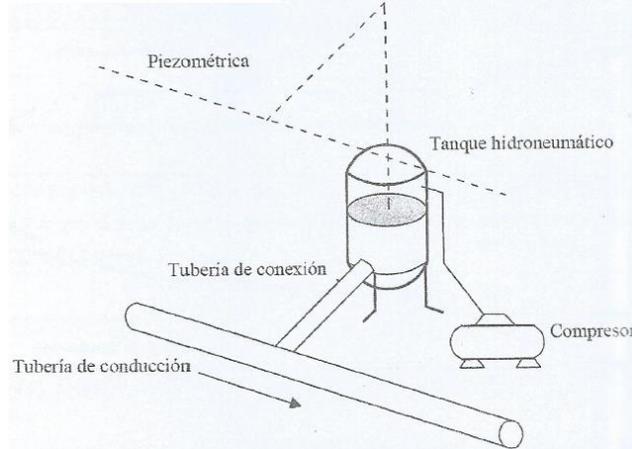


Figura 1.39 Esquema de una cámara de aire. Fuente: Sistemas de bombeo, Segunda edición, 2016, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Tabla 1.10 Ventajas y desventajas de la cámara de aire.

Ventajas	Desventajas
Permite reducir a voluntad la magnitud de las oscilaciones de presión en la conducción dependiendo del volumen inicial de aire.	Requiere mantenimiento eléctrico y mecánico periódico del compresor y cuando se requieren, el mantenimiento mecánico de las válvulas de retención.
El control de las presiones transitorias no depende de la cota inicial de la superficie libre de agua dentro de la cámara de aire.	Puede requerir dispositivos secundarios.
Estructuras de menor tamaño.	

1.2.5.4. Válvula de alivio

Dispositivo mecánico comercial (Figura 1.40), cuando la presión interior del conducto sobrepasa un valor límite establecido, tiene la función de abrir una conexión entre el interior de la conducción y la atmósfera. Permite limitar las presiones máximas en la conducción, controla las sobrepresiones y no las depresiones. Puede que la válvula esté comandada por una válvula solenoide que, al interrumpirse el suministro de energía eléctrica en las bombas, habilita un circuito hidráulico o neumático que abre la válvula instantes antes de que ocurra el ascenso de presión para una operación oportuna.

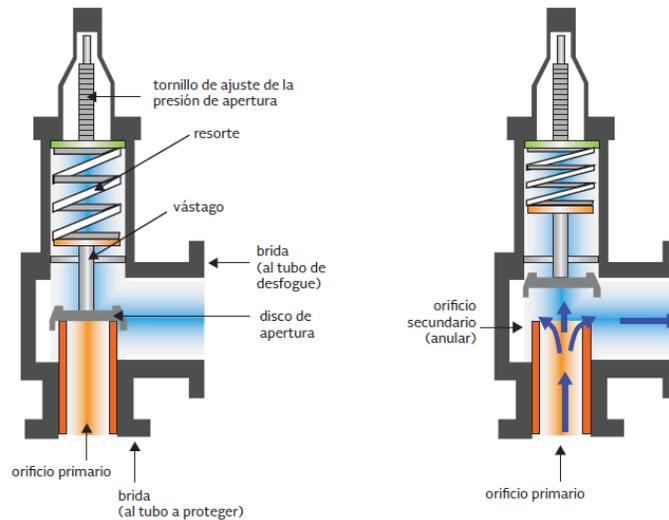


Figura 1.40 Esquema de una válvula de alivio. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 11-Fenómenos transitorios en líneas de conducción.

1.2.5.5. Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA)

Dispositivo mecánico comercial que permite el ingreso de aire a la conducción cuando la presión se sitúa por debajo de la presión atmosférica, por lo que también se les conoce como válvulas rompedoras de vacío. Una vez que la presión aumenta y supera la presión exterior, el aire admitido es expulsado por la válvula para mantener la continuidad de la columna líquida.

Son instaladas normalmente en los puntos altos de los conductos en donde puede existir burbujas de aire atrapadas durante el llenado de la conducción o en el caso de un vaciado de la conducción es el primer punto de ingreso de aire. La función principal de la válvula es evitar que exista aire atrapado en la conducción durante el llenado y que en el vaciado la tubería no esté sometida a depresiones.

La ventaja de este dispositivo es su eficacia para la prevención de depresiones y la principal desventaja es que permite la entrada de aire a la tubería y, si no es evacuado eficazmente, puede generar inestabilidad del flujo o reducir la capacidad de conducción.

1.2.5.6. Válvulas anticipadoras del golpe de ariete

Las válvulas anticipadoras se abren en el periodo inicial de presión baja en la tubería. Una vez que baja la presión hasta cierto valor, el piloto de baja presión hace que la válvula se abra rápidamente y comunica el agua de la tubería con el exterior. Si la presión continúa disminuyendo y tiende a producirse un vacío, entra aire a la tubería a través de la válvula. Una vez que la presión en el sistema se estabiliza, la válvula anticipadora se cierra lentamente, en caso de que la presión en la línea suba durante el cierre de la válvula el piloto de alta presión detiene brevemente el proceso para evitar que la presión siga elevándose. Este tipo de válvulas se utilizan solo en el caso de que un transitorio inicie con depresiones como en un paro accidental de bombas en una línea de bombeo. En el caso de que durante todo el transitorio no se presente una presión por debajo del valor en que está ajustada la válvula, ésta permanece inactiva.

1.2.5.7. Membranas protectoras o fusibles hidráulicos

Son discos finos de metal u otro material que se destruyen en presencia de una determinada presión. Se ubican en desviaciones de la tubería, en sostenedores especiales después de una válvula de



paso constantemente abierta. La membrana se rompe en caso de sobrepresiones, parte del líquido se expulsa y la presión se reduce. Después, la válvula se cierra hasta cambiar la membrana por una nueva. Las membranas se colocan cerca de una planta de bombeo.

1.2.5.8. Volante de inercia

Mientras más lento sea el paro en los equipos de bombeo disminuyen las depresiones y sobrepresiones del transitorio. Con este fin se adhieren volantes como se observa en la Figura 1.41, para aumentar la inercia y hacer más lento el paro. Esta adición es posible en bombas de eje horizontal y en tramos cortos de tubería. El uso de este dispositivo no es común debido a que el peso del volante aumenta la fuerza de fricción y reduce la eficiencia del equipo, haciendo que la bomba tarde más tiempo en alcanzar las revoluciones nominales después del arranque y que el motor necesite más potencia para el arranque.

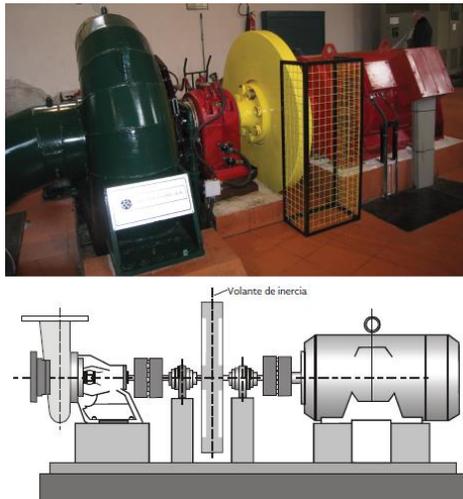


Figura 1.41 Esquema de un volante de inercia instalado entre el motor y la bomba. Fuente: Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 11-Fenómenos transitorios en líneas de conducción.



2 FALLAS EN TUBERÍAS

Introducción

El elemento del acueducto con mayor costo son las tuberías, las cuales se ven afectadas por las roturas y por la corrosión si son de materiales metálicos. Una pequeña rotura en una tubería con el tiempo se traduce en grandes orificios por donde escapa el agua.

Por ello, es importante identificar las fallas para evitar su desarrollo o, cuando menos, reducir la velocidad del deterioro que pueda afectar el abastecimiento de agua y garantizar el mantenimiento constante de los acueductos para un mejor funcionamiento.

Una falla se define como una condición no deseada que provoca que la tubería no cumpla con la función para la cual existe. Dependiendo del tipo de falla, puede haber impactos importantes económica y socialmente. El tiempo de servicio es un factor fundamental para que se presenten fallas en las conducciones.

Los conductos pueden presentar fallas catastróficas o graduales. En el caso de las primeras interrumpen la funcionalidad de algún elemento o de todo el sistema. Ellas requieren de atención inmediata; mientras que las graduales son difíciles de detectar, de ahí que no se atiendan en su momento.

Una falla catastrófica proviene de una o más fallas graduales no identificadas ni atendidas con oportunidad. Estas son debidas a la presencia de fenómenos como el desgaste, la corrosión o un transitorio hidráulico, estas fallas pueden provocar la reducción de la capacidad de conducción debido al crecimiento de roturas.

La falla se asocia a una condición límite que no necesariamente involucre la pérdida de continuidad del material. La condición bajo la cual se daría la rotura, está ligada a los esfuerzos o a las deformaciones que experimenten las tuberías cuando se les somete a ciertas sollicitaciones, o bien, cuando involucre tanto los esfuerzos, como las deformaciones.

Existen tres aspectos principales para que se genere una falla en la tubería (Tabla 2.1): la propiedad estructural, que incluye el tipo de material, interacción entre el suelo y la tubería, la calidad de la instalación y la calidad de la fabricación; las cargas internas y externas que son debidas a la presión de operación y a sobrecargas del suelo, transitorios hidráulicos, y por injerencia de terceros; y el deterioro del material, debido en gran parte a factores químicos internos y externos, ambientes bioquímicos y electroquímicos. En este capítulo se presentan las posibles causas por las que puede fallar una tubería y los modos de falla.



Tabla 2.1 Clasificación de las causas de falla. Fuente: Martínez, Á., 2018, Relación entre las causas y los modos de falla de tuberías en la red de distribución de Canal de Isabel II en Madrid.

Agrupación	Modo de fallo	Causa de fallo
Agentes externos a la tubería	rotura circunferencial	Presencia de raíces Provocada
	rotura longitudinal	Heladas u otras condiciones climáticas extremas
	voladura	Sobrecargas externas (árboles, tráfico pesado, etc.)
	Perforación mínima	Incendios, roedores, etc.
Características intrínsecas del material	Perforación	Corrosión
	Fuga	Defecto del material causa desconocida
		Defecto del material por edad avanzada
Operación de la red		Presiones o maniobras no habituales
Condiciones de instalación		Vibraciones o fuerzas continuadas
		Asentamientos del terreno Defecto de instalación de la tubería

2.1 Cargas y esfuerzos a los que está sometida una tubería

En el caso de las tuberías existen varios tipos de esfuerzos a los que se encuentran sometidas provocados por diferentes tipos de cargas, éstas pueden ser clasificadas como primarias y secundarias. Las primarias se deben a cargas sostenidas como el peso muerto, mientras que las cargas secundarias son llamadas auto limitantes como la carga de expansión térmica.

Dentro de las cargas estáticas que influyen en una tubería se encuentran:

- El efecto del peso (peso del fluido, peso de accesorios y cargas permanentes sobrepuestas)
- Efectos de expansión y contracción térmica
- Efectos de soporte y anclaje
- Cargas de presión interna y externa

En las cargas dinámicas que influyen en la tubería están:

- Fuerzas de impacto
- Cargas sísmicas
- Vibración
- Cargas de descarga

La tubería debe proyectarse para que no se dañe en ninguna condición de operación estacionaria o transitoria del acueducto y para resistir la carga total que consiste en carga estática más sobrecarga por golpe de ariete.

La tubería es susceptible de alteración significativa en su dimensión longitudinal por variaciones de temperatura, situación que exige que en caso de una falla los elementos de reparación deberán ser resistentes a la tracción axial. También, habrá tubería sin esfuerzos axiales, que por sus características o sistema de montaje, no presenta alteración significativa en su dimensión longitudinal por variaciones de temperatura, por lo que en caso de una falla los elementos de reparación no deban ser necesariamente resistentes a esfuerzos axiales a menos que la instalación lo requiera.



Los materiales de las tuberías consideradas como no flexibles son: hierro dúctil, hierro fundido, fibra de vidrio, fibrocemento, PVC, concreto y acero. Un material de tubería flexible es polietileno de alta densidad (PEAD).

Los esfuerzos de tensión en las tuberías deberán ser soportados dentro de los límites del comportamiento elástico de los materiales de la tubería. En relación a las depresiones (presión interior menor que la atmosférica), la tubería debe soportarlas sin colapsar, la presión mínima posible en el interior de un acueducto será la presión de vapor del agua a la temperatura de trabajo.

Los esfuerzos de trabajo deben garantizar la seguridad de la instalación en cualesquier circunstancia de operación. Entre los principales esfuerzos a los que se somete una tubería que transporta agua están:

- **Esfuerzos primarios.** Cargas debidas a peso propio de la tubería, cargas vivas (fluido interno), presión, vibraciones, fuerzas concentradas y distribuidas. Se trata de esfuerzos que su acción es suficiente para causar deformación plástica o rotura del material. El control de estos esfuerzos es sencillo mediante un buen soporte del sistema.
- **Esfuerzos circunferenciales.** El esfuerzo circunferencial de tensión en una placa delgada de una tubería debido a presión interna.
- **Esfuerzos longitudinales.** Son esfuerzos originados por cambios de temperatura en tuberías ancladas rígidamente contra movimientos longitudinales. El esfuerzo unitario por cada grado de cambio de temperatura es igual al coeficiente de dilatación del material de la tubería multiplicado por su módulo de elasticidad.
- **Esfuerzos como consecuencia de la deformación radial.** Existe una expansión radial en una tubería causada por la presión interna, la cual tiende a provocar una contracción longitudinal, con el correspondiente esfuerzo longitudinal de tensión, igual a 0.303 del esfuerzo circunferencial, y quedando establecido que la tubería tiene anclajes en los extremos que restringen los desplazamientos en tal sentido.
- **Esfuerzos de viga.** Cuando una tubería se coloca sobre apoyos trabaja como una viga continua. Las cargas de trabajo serán el peso de la tubería propiamente dicha y el peso del agua.
- **Esfuerzos ocasionales.** Son esfuerzos provocados por efectos naturales tales como los sismos, los cuales son de corta duración pero que pueden llegar a ser muy severos.

Se deberán hacer varias combinaciones de los esfuerzos obtenidos que actúan sobre la tubería con el fin de determinar la condición más crítica que se debe considerar de esfuerzos totales en el diseño definitivo.

Las causas de falla se pueden relacionar con los esfuerzos a los que está sometida la tubería. Los esfuerzos longitudinales están ligados a las roturas circunferenciales, y los esfuerzos transversales provocan roturas longitudinales. Además, la causa de roturas de presiones internas se asocia al tipo de rotura longitudinal, porque la presión del agua da lugar a tensiones axiales sobre las paredes de la tubería que hace que se rompa según este modo de falla, y el asentamiento de terreno podría estar ligado al mismo tipo de modo de fallo, porque provoca tensiones radiales en sentido opuesto. Es posible que el asentamiento de terreno dé lugar a un momento de flexión que provoca que las tuberías se rompan de forma circunferencial, es importante verificar si el asentamiento del terreno genera fuerzas distribuidas a lo largo de la tubería o fuerzas puntuales. Las sobrecargas externas han sido relacionadas principalmente con la forma de falla circunferencial. En el caso del tráfico vehicular provoca, además de flexión, una acción cortante en la tubería, esfuerzos axiales, que generan roturas longitudinales.



2.2 Modos de falla

A la configuración geométrica que adopta el elemento estructural cuando falla se le conoce como modo de falla. Las tuberías que transportan agua generalmente se rompen cuando el nivel de degradación es suficiente para que la tubería ya no pueda resistir las fuerzas que actúan sobre ella.

Las Figuras 2.1 a 2.3 muestran los tipos más comunes de roturas de tuberías que transportan agua, así como las fuerzas que actúan sobre la tubería que provocan la rotura.

De acuerdo con algunas investigaciones, la falla en una tubería a menudo tiene lugar en múltiples etapas en lugar de en un solo episodio. Una tubería que experimenta una falla en la viga puede agrietarse parcialmente, posiblemente con una fuga asociada, y luego agrietarse el resto de su longitud.



Figura 2.1 Modos de falla en tuberías. Fuente: CONAGUA, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 42- Mantenimiento y reparación de tuberías y piezas especiales.

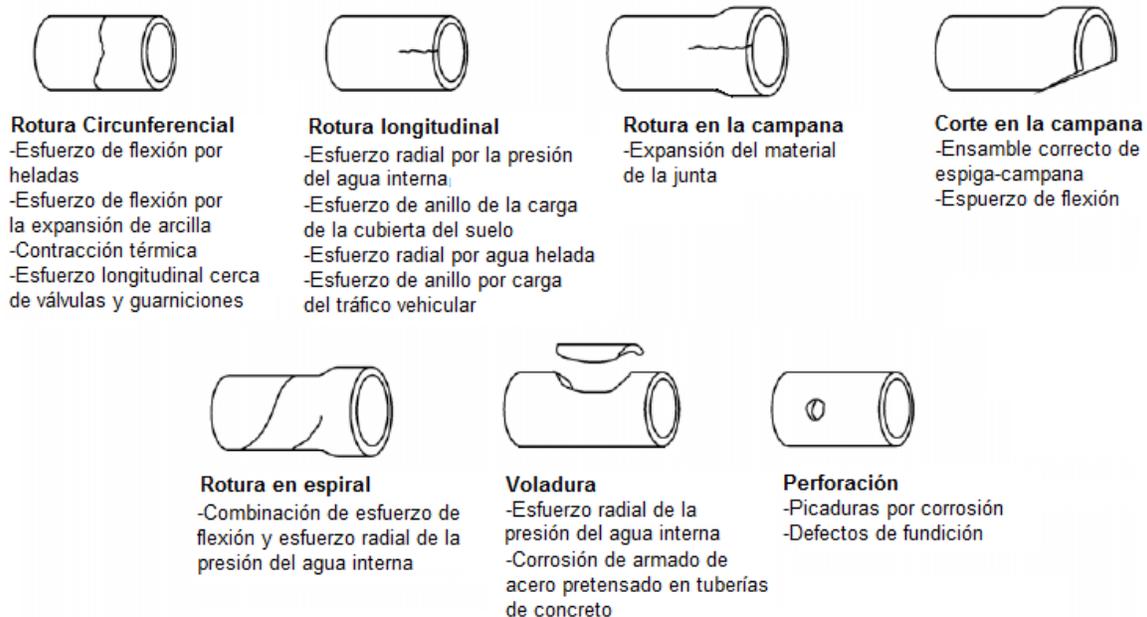


Figura 2.2 Modos de falla estructural en tuberías que transportan agua. Fuente: *Federation of Canadian Municipalities and National Research Council. 2003. Deterioration and inspection of water distribution systems.*

En la Tabla 2.2 se resumen los modos de falla estructural para cada uno de los materiales más comunes de tuberías que transportan agua.

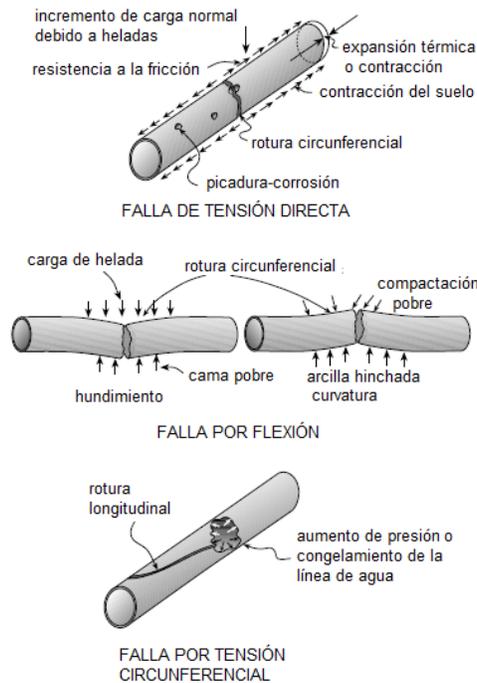


Figura 2.3 Modos de falla para tuberías enterradas. Fuente: Balvant, R. & Yehuda K., 2011. *Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models.*

Tabla 2.2 Modos de falla estructural para materiales más comunes de tuberías que transportan agua. Fuente: *Federation of Canadian Municipalities and National Research Council. 2003. Deterioration and inspection of water distribution systems.*

Material de la tubería	Modo de falla estructural
Hierro fundido Diámetro pequeño (<375mm) Diámetro grande (>500mm) Diámetro mediano (375-500mm)	-Rotura circunferencial, rotura en la campana, corrosión a través de agujeros. -Rotura longitudinal, corte en la campana, corrosión a través de agujeros. -Lo mismo que el pequeño, más rotura longitudinal, rotura en espiral y sección hinchada
Hierro dúctil	-Corrosión a través de agujeros
Acero	-Corrosión a través de agujeros, las tuberías con diámetro grande son susceptibles a colapsar
Policloruro de vinilo (PVC)	-Rotura longitudinal debida a excesivo esfuerzo mecánico -Susceptible a fallar por impacto en condiciones de frío extremo
Poliétileno de alta densidad (PEAD)	-Imperfecciones en la unión, degradación mecánica de métodos de instalación inapropiados, susceptible a colapsar por vacío debido a índices muy bajos de presión.
Asbesto cemento	-Rotura circunferencial, degradación de la tubería en aguas agresivas -Divisiones longitudinales
Concreto reforzado	-Tuberías con armado pretensado pueden experimentar rotura debida por pérdida de pretensado en caso de falla de varias varillas. -Degradación de la tubería en suelos particularmente agresivos, corrosión, daño del concreto debido a inapropiados métodos de instalación.

En el caso particular de las tuberías de plástico, en la Tabla 2.3 se muestran los modos de falla, sus características y los mecanismos de falla relacionados. Las fallas se agrupan según sus modos de falla. Estos modos de falla consisten principalmente en roturas circunferenciales, en roturas longitudinales, en voladuras y en perforaciones.



Tabla 2.3 Varios modos de falla en tuberías plásticas y sus causas potenciales: Fuente: Farshad, M., 2006. *Plastic pipe systems*.

Tipo de falla	Bosquejo del modo de falla	Características del modo de falla	Causas potenciales
Resquebrajamiento		Pequeñas grietas	Presión interna, carga puntual químicos
Grietas longitudinales		Grietas transversales, grietas en el lado interno o externo	Presión interna
Grietas circunferenciales		En la circunferencia completa o un sector de la misma	Flexión, efectos térmicos
Grietas irregulares		Racimos irregulares de grietas del lado interno o externo	Grietas por esfuerzos ambientales
Agrietamiento mixto		Grietas a través de la superficie, grietas en el lado interno o externo	Flexión por presión interna
Propagación rápida de falla (FRF)		Grietas quebradizas con o sin ramificación	Carga dinámica a bajas temperaturas
Sección de pared de una tubería con PRF		Superficie vidriosa detrás de la grieta	Presión interna, intervención externa
Fractura total de la tubería		Modos mixtos	
Grietas en circunferencia en un punto curvado			Curvatura (Poco radio de curvatura)
Grietas en una tubería termoplástica empotrada en concreto			Flexión, grietas por esfuerzos ambientales
Pandeo (ovalización)		Quebrado	Presión externa, flexión
Pandeo			Presión externa, flexión dura externa
Pandeo en dos lados			Presión externa
Pandeo no simétrico			Flexión longitudinal
Pandeo longitudinal		Forma de pandeo no simétrico	Compresión axial, efectos térmicos (pandeo térmico)
Pandeo de la tercera capa de la tubería		Delaminación de la capa interna, capa usualmente acompañada por gran pandeo interno	Alta temperatura, coeficiente de expansión térmica
Pandeo en una tubería embebida en concreto		Pandeo de la tubería interior no simétrico	Presión hidrostática externa, asentamiento de la tubería, empuje sobre el suelo
Larga deformación longitudinal			Asentamiento parcial, empuje de la tubería
Cambio de color		Cambio de color cerca de la unión por fusión	Entrada de gas a través de la unión
Delaminación		Desprendimiento de capas	Unión débil, corte
Arranque de tubería		Relativamente grandes pedazos de arranques de tubería	Osmosis
Vacios		Desordenados espacios de vacío	Problemas de fabricación, aire atrapado
Agujero		Agujero de forma irregular	Carga externa puntual, impacto, daño de terceros
Abrasión y desgaste		Signos de erosión, a veces exposición de fibras	Materiales sólidos en medio fluido
Obstrucción		Escombros dentro de la tubería	Objetos extraños
Falla en la junta: junta de fusión		Falta de tensión, separación de dos partes de tubería en la unión de fusión	Unión de fusión débil, corte y fuerzas de flexión
Falla en la junta: junta de electro-fusión		Falta de tensión, separación de dos partes de tubería en la unión de electro-fusión	Tensión axial, flexión, presión interna, unión inapropiada
Falla en la junta: junta de brida		Falta de tensión, separación de dos partes de tubería en la unión de brida	Unión inapropiada, tensión axial, flexión
Falla en un punto fijo		Cizallamiento de la tubería en los soportes, global, pandeo de la tubería, pandeo local	Acción de corte en la tubería



2.2.1 Roturas

Una rotura se define como un seccionamiento en un plano de una tubería o conducción. La rotura en las tuberías puede estar dentro de tres tipos: rotura circunferencial, causada por tensión longitudinal; rotura longitudinal, causada por tensión transversal; finalmente, rotura de campana o de unión, causada por tensión transversal en la unión de la tubería.

La rotura circunferencial y longitudinal puede producirse cuando la suma de la presión estacionaria más la sobrepresión producida por un transitorio hidráulico rebasa la presión de diseño o resistencia de la tubería. Las conducciones se dimensionan a partir de las condiciones de flujo permanente, mientras que las presiones durante el transitorio establecen la resistencia que debe poseer la tubería para evitar la rotura.

En el caso de la rotura circunferencial puede deberse a tensiones longitudinales producidas por una contracción térmica actuando en una tubería y a esfuerzos por una baja temperatura (heladas) en el agua que conduce. Otra causa es un esfuerzo de flexión sobre la tubería por un movimiento diferencial del suelo, especialmente en suelos arcillosos, o por huecos cerca de la cama de la zanja de la tubería. También puede deberse a una zanja inadecuada o por interferencia de terceros. Además, la presión interna de la tubería influye en el riesgo de una rotura circunferencial.

Las roturas longitudinales pueden ser el resultado de tensión transversal por la presión del agua en el interior en la tubería, tensión por el peso del suelo de cubierta, por cargas vivas debidas al tráfico vehicular, fuerzas de compresión que ejerce el agua congelada del terreno sobre la tubería o por penetración de escarcha debida al incremento de heladas y humedecimiento del suelo.

Las roturas en la unión son una abertura o fisura en la junta que puede extenderse a lo largo del cuerpo de la tubería. Comúnmente se producen por la acción exterior de maquinaria o por acción de una sobrepresión en la tubería. La Figura 2.4 muestra tres ejemplos de roturas.



Figura 2.4 a) Rotura circunferencial en una tubería de hierro; b) Rotura longitudinal en una tubería de PVC; c) Rotura en la unión en una tubería de PVC.

2.2.2 Voladuras o rotura por estallido

Este modo de falla es un estallido de la tubería formando un orificio de gran proporción (Figura 2.5). Las voladuras son debidas generalmente a sobrepresión interna de la tubería, en tuberías metálicas por corrosión o a la acción exterior de la maquinaria. Se producen cuando la pared de la tubería se rompe de manera violenta o explosiva por el efecto de exceso de presión o acción exterior de maquinaria pesada.



Figura 2.5 Voladura en una tubería de PVC.



2.2.3 Perforaciones

Las perforaciones son agujeros pequeños en una tubería, frecuentemente causados por la corrosión en tuberías metálicas o por la acción exterior de maquinaria (Figura 2.6). En ocasiones, se presentan agujeros en antiguas abrazaderas, que al ser retiradas dejan al descubierto el agujero.



Figura 2.6 a) Perforación en una tubería de polietileno; b) Perforación en una tubería de hierro dúctil.

2.3 Mecanismos de falla

Un mecanismo de falla es el proceso responsable del evento o condición de falla. Evaluar el mecanismo del fallo no es tan difícil como establecer por qué la parte ha fallado. Evaluar el por qué de la falla generalmente requiere pruebas analíticas más allá de lo visual. En muchos casos, una sola causa no puede ser identificada, porque múltiples factores integrados pueden haber contribuido al fracaso.

El deterioro de las tuberías que transportan agua puede hacerse evidente en alguna de las siguientes manifestaciones:

- Deterioro de la calidad del agua, esto ocurre generalmente en tuberías metálicas debido a la corrosión interna sin revestimiento; acumulación de biopelículas y/o malas prácticas de mantenimiento.
- Reducción en la capacidad hidráulica, debido a la corrosión interna de componentes metálicos sin revestimiento o precipitación de carbonato de calcio.
- Alto índice de fugas, también puede deberse a la corrosión a través de los orificios en las tuberías o a las juntas deterioradas.
- Roturas frecuentes debido a la corrosión, degradación del material, malas prácticas de instalación, defectos de fabricación y condiciones de funcionamiento.

Existen muchos factores que pueden afectar el deterioro de las tuberías de distribución de agua y provocar su falla. Todos los factores que afectan el desempeño de una tubería pueden clasificarse dentro de cuatro categorías: material, diseño, procesamiento y condiciones de servicio. Algunos de ellos se resumen en la Tabla 2.4.

Recientemente se ha visto que la biocapa que se forma en las paredes de la tubería puede causar deterioro en la tubería, y eventualmente puede ser de un espesor capaz de reducir la capacidad de conducción. Las incrustaciones se deben principalmente al transporte de agua dura con altos contenidos de carbonatos de calcio, cuyos depósitos pueden alcanzar capas que reduzcan hasta el 50% de la capacidad de conducción.

En general, la relación entre las causas y los modos de falla concluye lo siguiente:

- La corrosión está ligada al modo de falla perforación y rotura longitudinal.
- Las presiones o maniobras no habituales provocan esfuerzos axiales y están asociadas a las roturas longitudinales, así como a las voladuras.



- Los asentamientos de terreno y sobrecargas externas se relacionan con la rotura en forma circunferencial.
- El defecto de instalación se ha relacionado con las fugas, que incluyen las fallas en las uniones.

Tabla 2.4 Factores que contribuyen al deterioro de tuberías que transportan agua. Fuente: *Federation of Canadian Municipalities and National Research Council, 2003. Deterioration and inspection of water distribution systems.*

	Factor	Descripción
Físico	Material de la tubería	Las tuberías fabricadas de diferentes materiales fallan en diferentes maneras.
	Espesor de pared de la tubería	La corrosión penetrará más rápidamente en tuberías de paredes más delgadas.
	Edad de la tubería	Los efectos de degradación en la tubería serán más aparentes con el tiempo.
	Tubería clásica	Las tuberías fabricadas en un momento y lugar determinados pueden ser más vulnerables a fallar.
	Diámetro de la tubería	Tuberías con diámetro pequeño son más susceptibles a fallar en el lomo.
	Tipo de unión	Algunos tipos de unión han experimentado falla prematura (p.ej. Juntas de plomo).
	Restricción de empuje	Inadecuada restricción puede incrementar las tensiones longitudinales.
	Revestimiento interno y externo de la tubería	Las tuberías con revestimiento interno y externo son menos susceptibles a la corrosión.
	Metales disímiles o aleaciones	Los metales disímiles (aleaciones) son susceptibles a corrosión galvánica.
	Instalación de la tubería	Malas prácticas de instalación pueden dañar las tuberías, haciéndolas vulnerables a fallar.
Ambiental	Fabricación de tubería	Defectos en las paredes de la tubería producidos por errores de fabricación pueden hacer vulnerables a las tuberías a fallar. Este problema es más común en tuberías de hierro fundido.
	Cama de la tubería	Una cama inapropiada puede resultar en una falla prematura.
	Relleno de la zanja	Algunos materiales de relleno son corrosivos o susceptibles a heladas.
	Tipo de suelo	Algunos suelos son corrosivos; algunos suelos experimentan cambios de volumen significativos en respuesta a cambios de humedad, resultando en cambios en la carga sobre la tubería. Presencia de hidrocarburos y solventes en el suelo pueden resultar en algún deterioro de la tubería.
	Agua subterránea	Algunas aguas subterráneas son agresivas hacia ciertos materiales de tuberías.
	Clima	El clima tiene influencia en la penetración de escarcha y la humedad del suelo. Las heladas deben ser consideradas en regiones del norte.
	Ubicación de la tubería	Migración de la salinidad de la carretera al suelo puede incrementar la corrosión.
	Perturbaciones	Perturbaciones subterráneas en la vecindad inmediata donde hay una tubería puede conducir a un daño real o cambios en el soporte y carga sobre la tubería.
	Pérdida de corriente eléctrica	Pérdida de corriente produce corrosión electrolítica.
	Actividad sísmica	La actividad sísmica puede incrementar los esfuerzos sobre la tubería y causar un aumento de presión.
Operación	Presión de agua interna, presión transitoria	Cambios en la presión del agua interna cambiará los esfuerzos que actúan sobre la tubería.
	Fuga	Las fugas erosionan la cama de la tubería e incrementan la humedad del suelo en la zona de la tubería.
	Calidad del agua	Algunas aguas son agresivas, promoviendo la corrosión.
	Velocidad de flujo	La velocidad interna de corrosión es mayor en tuberías sin revestimiento.
	Potencial de reflujo	Las conexiones cruzadas con tuberías que no contienen agua potable pueden contaminar el agua de la conducción.
	Prácticas de organización y métodos	Prácticas pobres pueden comprometer la integridad estructural y la calidad del agua.



Específicamente en el caso de las tuberías plásticas, los factores que influyen en su deterioro son los que aparecen en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Factores que influyen en el envejecimiento y deterioro de las tuberías plástica. Fuente: Farshad, M., 2006. *Plastic pipe systems*.

Causas de envejecimiento y deterioro	Factores
Desgaste	Radiación (solar, térmica)
	Temperatura (aire, superficie)
	Humedad: fijo (heladas), fluido (lluvia), vapor
	Elementos en el aire (oxígeno, ozono, dióxido de carbono), partículas, niebla, aerosol
Esfuerzos	Condiciones subterráneas: agua subterránea y contaminación.
	Cargas estáticas: corta o larga duración
	Cargas dinámicas: corta o larga duración
	Condiciones térmicas: corta o larga duración
Biológico	Esfuerzos residuales
	Microbios, plantas, insectos, residuos biológicos.
Incompatibilidad	Mecánica, física, térmica
	Diseño
Aplicación	Producción
	Almacenamiento
	Transporte
	Instalación
	Sobrecarga
	Uso
	Degradación

Además, algunos materiales plásticos presentan el llamado efecto del crecimiento lento de grietas que está asociado a una transición dúctil-frágil que se presenta cuando el material está sometido a esfuerzos de tensión, esto puede generar fugas en tuberías plásticas y eventualmente generar una falla debido a la disminución de la rigidez de la tubería.

En el caso de las tuberías y sus componentes pueden fallar a través de diferentes mecanismos, incluidos mecanismos catastróficos, como propagación rápida de falla, sobrecarga dúctil, ruptura por fluencia, agrietamiento por estrés ambiental, corrosión, erosión, corrosión-fatiga, degradación molecular y fatiga. Algunos mecanismos de falla se deben a errores en el diseño del elemento estructural (excepto en el caso en que la falla se produzca como consecuencia de una carga superior a las máximas previstas en el diseño), otros pueden deberse muchas veces a factores introducidos durante las etapas de fabricación del elemento. Los problemas de fatiga, corrosión y propagación rápida de falla suelen estar estrechamente relacionados con las operaciones de unión que se hayan utilizado.

2.3.1 Defectos de Fabricación

Los defectos de fabricación son los que están ligados a una etapa en la producción en serie, los cuales se deben a una falla mecánica, error humano o anomalías de materia prima, y que no son detectados en los controles de calidad existentes. Estos defectos dan origen a un defecto, fragilidad o deficiencia de las tuberías.

Cuando el defecto se debe a las materias primas significa que hay variaciones en la mezcla de materias primas empleadas, cambios de lote, selección incorrecta de materias primas, degradación, incompatibilidad entre materiales o problemas de contaminación. También puede haber problemas en la manipulación de las tuberías ya fabricadas, en cuanto a impresión de datos. Puede existir un error en el diseño inicial de la tubería derivado en defectos en el diseño de forma, dimensiones o en la selección de materias primas, proceso de transformación y procesos de acabado.



Durante el proceso de fabricación, las tuberías metálicas pueden tener errores en la fundición causados porque se dispone de insuficiente metal para llenar las áreas de contracción a medida que se enfría el metal y comienza a solidificarse, o si el diseño del molde es incorrecto, las fundiciones pueden contener vacíos, llamadas cavidades o bolsas de contracción. Mientras que las tuberías con tratamiento térmico pueden tener fracturas que se producen por enfriamiento rápido del material o por no templar las piezas que lo necesitan.

Algunas tuberías plásticas son producidas por proceso de extrusión, el cual tendrá un impacto en el producto, donde influyen consideraciones como la temperatura, contrapresión y diseño de matrices con posibles defectos en las líneas de unión. Además, la resina debe manejarse de tal manera que se dispersen homogéneamente los constituyentes de la formulación en toda la resina, sin impartir calor excesivo o tensión cortante que podría conducir a una degradación. En la fabricación de PVC y CPVC se crea un ambiente altamente gaseoso, que debe ventilarse adecuadamente para permitir que el aire y gas escapen o pueden formarse bolsas de aire, lo que disminuye la resistencia de la tubería.

También puede suceder que el fabricante haya incluido en un lote otros minerales o componentes en la mezcla, lo que hizo que la mezcla con la que se hizo la tubería fuera deficiente o también fallas en el derretimiento de los materiales, como hacerlo a una temperatura baja, lo que resultó en una fusión incompleta de los materiales (Figura 2.7).

Otras casusas de defectos en las tuberías pueden deberse al uso incorrecto del producto, lo cual implica condiciones de almacenamiento inadecuadas, someter las tuberías a la influencia de variables ambientales no especificadas (incorrecta temperatura, humedad, luz ultravioleta, etc.) e instalación inadecuada.

Es importante una atención por la calidad de las tuberías que transportan agua para que durante la instalación y el uso posterior no cause problemas. Es recomendable que se instalen de manera profesional y que la instalación sea realizada por personal calificado.

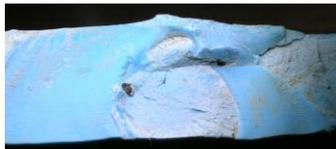


Figura 2.7 Material extraño dentro de la pared de una tubería de PVC. Fuente: Beamer, R. et al. 2009. *Several Failures of a 16-inch PVC Transmission Main within 12 Years*.

2.3.2 Corrosión

En el caso de los conductos metálicos y sus componentes, uno de los principales problemas es la corrosión. Las tuberías de concreto reforzado también son susceptibles de sufrir agresiones por corrosión. La corrosión reduce gradualmente la capacidad de conducción tuberías que transportan agua y es una causa de fallas en tuberías al perder su capacidad estructural. Los factores que influyen en la corrosión son: el tipo de relleno de la zanja (suelo), la presencia de corrientes vagabundas inducidas y aguas corrosivas.

La corrosión se define como el desgaste o la alteración de un metal o aleación, ya sea por ataque químico directo o por reacción electroquímica. En las tuberías que transportan agua se puede presentar corrosión de manera externa e interna. La corrosión externa incluye los tipos de corrosión: galvánica, electrolítica e inducida microbiológicamente. De los cuales, la galvánica y la electrolítica son los tipos más comunes.

La corrosión galvánica puede ocurrir cuando metales disimilares (aleaciones) son conectados eléctricamente e inmersos en un suelo uniformemente conductivo, o cuando un metal es inmerso en



un suelo conductivo de una naturaleza no uniforme. En este proceso hay flujo eléctrico de un ánodo a un cátodo a través de la conexión, como consecuencia el ánodo pierde electrones y es oxidado e iones son liberados en el electrolito, esto da origen a la corrosión del ánodo. Cuando se completa el circuito eléctrico, los iones del cátodo en el electrolito son reducidos y depositados en la superficie del cátodo, lo que protege al cátodo de la corrosión.

Los suelos corrosivos son la principal causa de corrosión externa en tuberías que transportan agua (Romer y Bell, 2001). El tipo de suelo y su grado corrosivo pueden ser un factor para determinar la probabilidad de deterioro de los conductos y sus componentes que distribuyen agua. Los suelos llegan a tener gran variedad de sales solubles, que pueden migrar de las carreteras, estas sales afectarán a diferentes materiales de tubería de diferentes maneras.

Los principales componentes del suelo que aceleran la corrosión son cloruros, sulfatos y acidez del suelo (Peabody, 2001). Algunos componentes del suelo como el calcio, magnesio y bicarbonatos en un entorno básico pueden servir para proteger la tubería de la corrosión. Para comprobar el grado de corrosión del suelo se pueden tomar muestras del mismo, ya que pueden variar sus condiciones aunque sea la misma área de excavación, por lo que son mejores las muestras de suelo a depender de mapas de tipos de suelo.

La corrosión electrolítica puede ocurrir en las tuberías que transportan agua, si ésta recoge corriente eléctrica de una fuente de corriente continua, como los sistemas de protección catódica en una tubería adyacente, ferrocarril eléctrico, sistema de metro y sistemas de soldadura eléctrica. En este caso las fuentes de corriente externas impulsan la celda electrolítica, mientras que las reacciones químicas impulsan la celda galvánica. Hay corrosión si la corriente eléctrica es forzada a través de una tubería de agua por una fuente de corriente externa, esto ocurre en el ánodo.

No solamente la corriente continua produce corrosión sino también la corriente alterna. En el caso de la conexión a tierra eléctrica de las fuentes de corriente alterna, la Fundación de Investigación AWWA indicó que la corriente alterna causa corrosión aunque en menor grado en comparación con la corriente continua.

La corrosión interna en tuberías metálicas se da principalmente en tuberías que no tienen revestimiento. Esta corrosión la causan las interacciones químicas y físicas entre los materiales de la tubería y el agua. Todas las aguas son corrosivas en cierto grado, esto dependerá de sus características químicas, físicas y biológicas, además del tipo de material de la tubería con la cual el agua está en contacto (Figura 2.8).

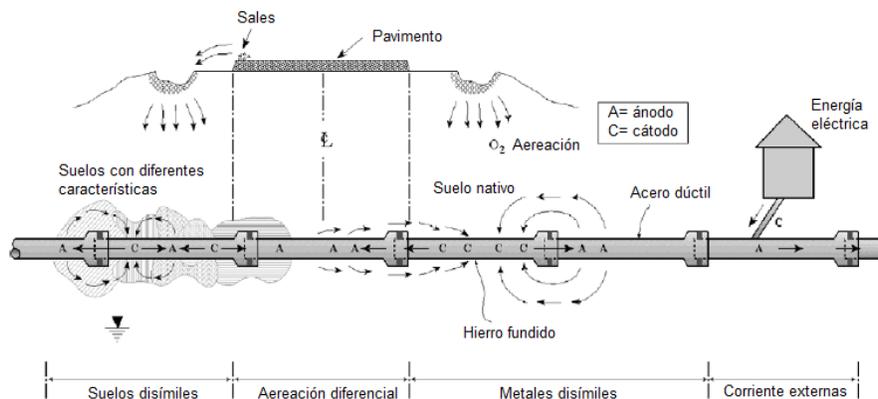


Figura 2.8 Condiciones principales de corrosión. Fuente: Balvant, R. & Yehuda K., 2011. *Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models*.

Esta corrosión interna puede manifestarse en las siguientes formas:



- degradación de la tubería, que puede verse como picaduras que resultan en fugas o vulnerabilidad a fallas mecánicas;
- tuberculación y la formación de escamas que llega a reducir la capacidad hidráulica y perjudicar la calidad del agua; y
- liberación de subproductos de la corrosión, lo cual afecta la calidad del agua volviéndola de color rojizo.

Los óxidos metálicos resultantes de la degradación de la tubería pueden formar tubérculos, los cuales crecerán gradualmente y restringirán la capacidad hidráulica de la tubería. Además de esto, si el agua que fluye a través de una tubería está sobresaturada con carbonato de calcio, el carbonato de calcio puede precipitar y provocar incrustaciones en la tubería. También, la corrosión interna provoca el deterioro de la calidad del agua debido a los productos y contaminantes que se generan, disminuye el desempeño hidráulico y aumenta los costos de distribución y de mantenimiento.

La corrosión y las incrustaciones en tuberías que transportan agua pueden dar lugar a:

- Contaminación del agua por desprendimiento de partículas metálicas.
- Llegan a producir perforaciones y obstrucciones en las tuberías. En el punto de mayor presión se forma un agujero en la pared de la tubería, el cual se hace cada vez más grande y da paso a la fuga de agua. La rotura en las tuberías con contenido de hierro implicaba una pérdida de capas de óxidos marrones derivando en la formación de agujeros o zonas débiles con fisuras.

Algunas formas de controlar la corrosión en las tuberías que transportan agua son:

- Seleccionar apropiadamente los materiales de la tubería, ya que algunos materiales son más resistentes a la corrosión que otros en un ambiente específico, y entre menos reactivo sea el material con su ambiente tendrá más resistencia a la corrosión.
- Modificar la calidad de agua con tratamiento químico. Sería factible realizar análisis químicos del agua para conocer qué tan corrosiva es.
- Usar revestimientos y pinturas resistentes a la corrosión. Usualmente, los revestimientos son aplicados mecánicamente cuando la tubería es fabricada o antes de ser instalada, aplicarlos cuando se encuentra en servicio es más costoso. Los revestimientos más comunes son los esmaltes de alquitrán de hulla, pinturas epóxicas, cemento y polietileno. Algunos problemas en caso de no aplicar cuidadosamente el revestimiento son: el crecimiento microbiológico, sabor, olor y lixiviado de solventes.

En el caso de las tuberías plásticas, la reducción de la plasticidad del material es comparable al fenómeno de corrosión en las tuberías metálicas y de concreto reforzado. Todas las tuberías llegan a sufrir el deterioro de un material como resultado de la reacción con su entorno, los plásticos también pueden reaccionar con algunos agentes ambientales externos, reacción que puede verse en la superficie o puede ocurrir internamente, los tubos de plástico reforzado con fibra de vidrio sufren la acción de agentes químicos externos que pueden provocar el deterioro de las fibras de vidrio. El producto de la corrosión en tuberías plásticas es el agrietamiento y el cambio de propiedades físicas y mecánicas de la tubería, y sus revestimientos.

Algunos agentes que causan deterioro en las tuberías plásticas son:

- Absorción de algunos agentes ambientales en el plástico, lo cual produce hinchazón, cambio de peso y color. Algunos agentes ambientales agresivos pueden reaccionar con las cadenas de polímero y producir la distorsión del polímero.
- La oxidación de la resina que puede ocurrir en la atmósfera o por otros oxidantes, resultando en endurecimiento y el agrietamiento del plástico, incluido el crecimiento lento de grietas.
- Acción bacteriana, causada por microorganismos.



2.3.3 Degradación molecular

Las tuberías plásticas tienen una resistencia notable a la corrosión. Sin embargo, después de un tiempo de operación también se degradan y en ciertas condiciones se deterioran de otras formas. En el caso de estas tuberías, la capacidad de servicio se ve reducida a menudo por hinchamiento y agrietamiento. La degradación puede ocurrir a lo largo de su vida útil.

Las tuberías plásticas se ven afectadas por la oxidación, el ozono, la radiación ultravioleta, las cargas y la humedad. Su degradación resulta en el cambio de las propiedades físicas, químicas o mecánicas causadas por las reacciones que inciden en los enlaces. Puede ser degradación térmica, mecánica, química, fotoquímica, química y biológica.

La degradación molecular es una de las principales causas de falla de las tuberías plásticas, es la alteración perjudicial de la estructura molecular dentro del polímero como resultado de una reacción química, lo que implica principalmente una reducción permanente en el peso molecular.

Los mecanismos más comunes que dan origen a una degradación molecular son:

- Oxidación térmica
- Radiación ultravioleta
- Ruptura de cadena
- Hidrólisis

El grado de degradación molecular dependerá de la composición de la resina plástica de la tubería (estructura del polímero), resistencia a sustancias químicas, las cargas a las que se encuentra sometida la tubería (los esfuerzos internos y externos combinados) y las condiciones ambientales a su alrededor (las temperaturas más altas dan como resultado un incremento en la velocidad de deterioro). Todas las formas de degradación dan lugar a cambios estructurales moleculares que originan cambios notables en las propiedades físicas. La reducción en el peso molecular y longitud de las cadenas moleculares disminuyen la ductilidad del material produciendo una fractura por fragilidad.

Las manifestaciones de la degradación molecular en una tubería plástica pueden ser:

- Pérdida de propiedades mecánicas (resistencia al impacto, fragilidad y agrietamiento).
- Disminución de la resistencia química.
- Decoloración, apariencia blanquecina, pérdida de brillo, pérdida de transparencia, generación de malos olores y formación de carbonilo.

2.3.4 Sobrecarga dúctil

Las fracturas llamadas dúctiles generalmente son el resultado de una sobrecarga (Figura 2.9). Comúnmente las tuberías de plástico experimentan fallas por rotura dúctil debido a la presencia de altas presiones. El modo de falla se manifiesta en grandes deformaciones plásticas permanentes localizadas de la pared de la tubería. Las presiones crecientes hacen que la tubería experimente grandes expansiones resultando en el adelgazamiento y estiramiento de la pared hasta un punto donde el ligamento de la pared restante no es suficientemente grande para soportar las elevadas tensiones circunferenciales inducidas.

En el caso de los materiales dúctiles, presentan deformación plástica antes de llegar a la fractura, se requiere una gran fuerza para llegar a la falla debido a que sus átomos pueden deslizarse unos sobre otros estirando el material sin romperse y la falla llega después de una intensa deformación plástica. El PVC puede sufrir falla dúctil en servicio al igual que las tuberías de PE, en estas últimas se producen como resultado del aumento de la presión a niveles superiores a 400 psi o 28.12 kg/cm².



Figura 2.9 Falla dúctil resultado de una prueba. Fuente: Gas Technology Institute. 2009. *Plastic Pipe Failure, Risk, and Threat Analysis*.

2.3.5 Rotura por fluencia

La fluencia es la deformación plástica que tiene lugar a temperatura elevada bajo una carga constante y durante un periodo largo de tiempo. La rotura por fluencia es una deformación que a temperatura elevada aumenta gradualmente con el tiempo, la cual inicia como una deformación elástica instantánea y posteriormente se vuelve una deformación plástica. Los polímeros muestran deformación y fractura por temperatura.

2.3.6 Transitorios Hidráulicos

Los problemas que genera un transitorio hidráulico son:

- ✓ *Sobrepresión*, toda presión superior a la de trabajo en cualquier punto de una conducción, la cual provoca un incremento de tensiones en el material de la tubería que se puede prever para evitar deformaciones plásticas o roturas en la instalación (Figura 2.10). Desde el diseño, se deberá establecer una cota de cargas máximas permisibles a lo largo de la tubería, lo cual determinará la clase o resistencia a la presión en cada tramo de la tubería. La línea de resistencia es el resultado de sumar la cota de elevación de cada uno de los puntos más la resistencia.

Los fabricantes no establecen diferencias entre presiones estacionarias y transitorias; por ello, desde el diseño, la clase de cada tramo de tubería debe señalarse por encima de la presión manométrica máxima, estacionaria o transitoria, que el tramo deberá soportar durante su operación.

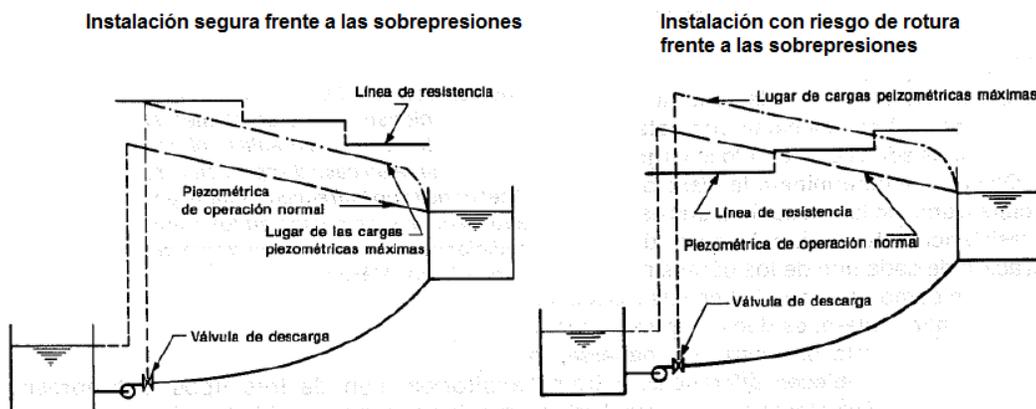


Figura 2.10 Esquema de la influencia de las sobrepresiones. Fuente: Carmona, R., 1987. *Transitorios hidráulicos en conductos a presión*.

- ✓ *Depresión*, decremento de presión con respecto a la que se presenta en operación estacionaria. Durante un transitorio hidráulico puede ocurrir un vacío, dentro una sección de la tubería la presión se ubica por debajo de la presión atmosférica o una presión manométrica negativa.

En tuberías enterradas, además de la presión atmosférica, también actúa el empuje del terreno, la presión media exterior que toleran es mayor que la atmosférica, dependiendo del

tipo de suelo y de la profundidad. Por ello, la tubería debe ser suficientemente rígida en su sección transversal para soportar las presiones, sino puede que la sección pierda su estabilidad y se colapse la tubería, considerando la condición de tubería vacía. Esta estabilidad de la tubería frente al colapso depende de la relación entre su diámetro y el espesor de la pared (relación de dimensión), entre mayor sea esta relación menor será la estabilidad, en este caso la tubería de plástico por ser más deformable es más vulnerable.

La depresión puede tener los siguientes efectos:

- **Colapso de la tubería**, debido a que la presión en el exterior es superior a la interior, el tramo de tubería afectado trabajará a la compresión en el sentido de las tensiones según la circunferencia. Si las depresiones son suficientemente altas, se producirá un fenómeno de pandeo hasta llegar al colapso, establecer la depresión mínima que pueda provocar esto último no es fácil de establecer (Figura 2.11).

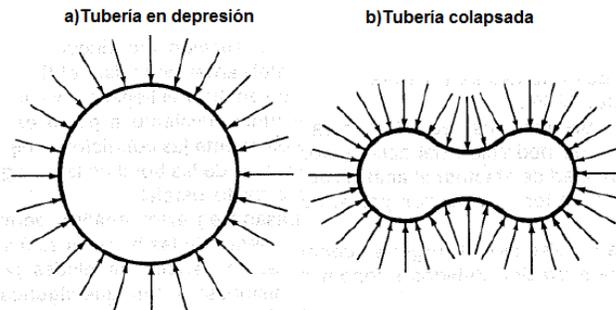


Figura 2.11 Colapso de la tubería por depresión. Fuente: Carmona, R., 1987. Transitorios hidráulicos en conductos a presión.

- **Separación de la columna líquida**, volumen de vapor de agua liberado. Debido a que en una sección de la conducción se presenta una depresión transitoria de cierta magnitud que alcanza la presión de vapor del líquido a la temperatura ambiente, se producirá este fenómeno si la cantidad de energía presente es grande.

El descenso de la presión interior en la tubería puede producir la vaporización del agua a la temperatura ambiente cuando la presión absoluta se aproxima a 0.25 mca para una temperatura de 20°C, esto hace que el líquido se transforme en gas y se crean burbujas en el agua. Esto se convierte en un problema cuando la burbuja producida inicialmente por una onda de depresión sea sometida a una presión levemente superior a la vaporización, lo que reducirá con mucha rapidez su volumen, provocando que las columnas líquidas separadas por ella choquen violentamente (Figura 2.12). Por esto, debe evitarse el fenómeno de la reintegración de la columna líquida (Figura 2.13).

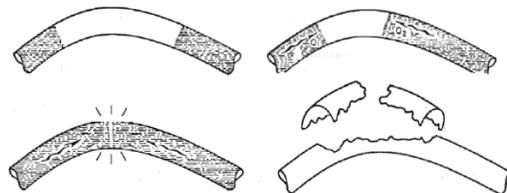


Figura 2.12 Proceso de separación y reintegración de la columna líquida.

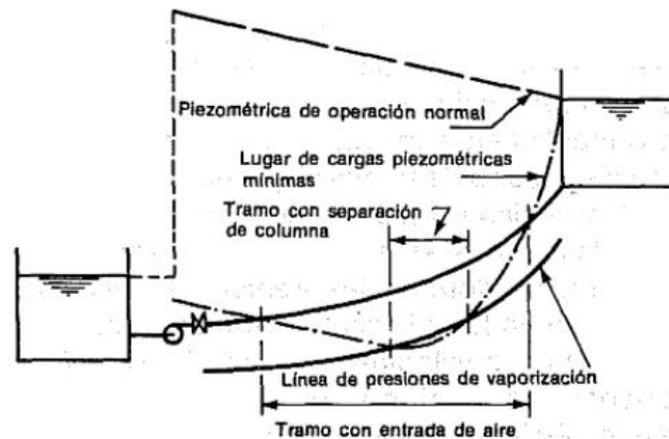


Figura 2.13 Instalación con riesgo de separación de columna. Fuente: Carmona, R., 1987. Transitorios hidráulicos en conductos a presión.

- Entrada de aire a la tubería, puede realizarse a través de válvulas de admisión y expulsión de aire cuando la presión en el interior de la tubería es menor que la exterior. Además, las juntas de tuberías con empaques así como los sellos de las válvulas y accesorios son elementos que ante una depresión pueden fallar antes que la tubería, lo que puede permitir el acceso de aire. El problema del aire admitido es su evacuación y permanencia en el interior del conducto formando burbujas de aire que durante una maniobra transitoria resulte en gran sobrepresión.

En la Figura 2.14 se observa cómo operaría un acueducto bien diseñado.

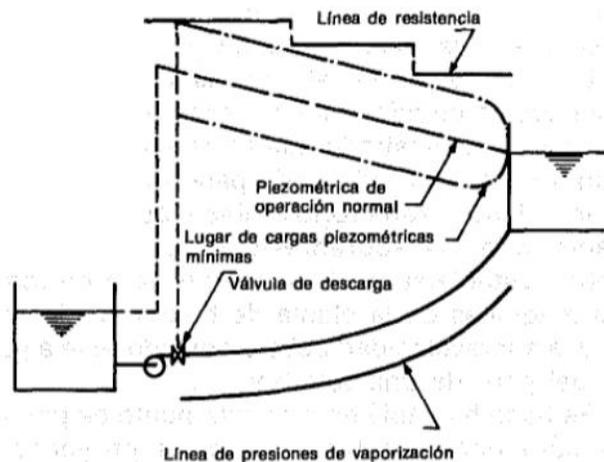


Figura 2.14 Acueducto bien diseñado. Fuente: Carmona, R., 1987. Transitorios hidráulicos en conductos a presión.

- ✓ *Fatiga del material*, se origina por la acción repetida de cargas dinámicas fuertes durante un periodo de tiempo prolongado, lo que disminuye la resistencia del material del que está constituida la tubería y sus accesorios. En el caso de presentarse un transitorio de mayor consideración, pueden generarse vibraciones en la tubería, las cuales se transmiten a los apoyos o cimientos que estarían sujetos a falla por fatiga. Si se disminuye la magnitud y la frecuencia de los transitorios, puede reducirse al mínimo la fatiga.



Los efectos de los transitorios hidráulicos se asocian a los siguientes riesgos para la tubería y para los accesorios:

- Falla por sobrepresiones o por depresiones (aplastamiento de la tubería).
- Falla por fatiga del material, debida al daño acumulativo que pueden ocasionar las variaciones de presiones repetidas un gran número de veces.

En el diseño de cada acueducto se deben analizar los posibles transitorios para obtener la presión máxima y la presión mínima que en ellos se producen, y poder tomar las medidas necesarias. Entre algunas medidas contra las presiones producidas durante un transitorio están:

- Usar tubería y accesorios de una clase mayor que soportan sin problema las presiones que se producen en los transitorios.
- Medios de control de los transitorios como cámara de aire, válvulas de alivio, torres de oscilación, tanques unidireccionales, y otros.
- Hacer los transitorios menos bruscos por medio del paro de las bombas o el cierre de las válvulas más lentos.

2.3.6.1 Fatiga

Los transitorios hidráulicos generados por operaciones con las válvulas en las tuberías de conducción y arranque o paro de bombas se caracterizan por cierto número de ciclos de cambio de presión altamente variable y generalmente son de corta duración, provocan un deterioro en la infraestructura. Al deterioro gradual progresivo de un material que está sometido a un gran número de esfuerzos o cambios de presión variables cíclicos de cierta magnitud se le conoce como fatiga del material.

El fenómeno de fatiga es considerado responsable aproximadamente de más del 90% de las fallas por rotura de uniones soldadas y precede muchas veces a la propagación rápida de falla.

Las condiciones de fatiga en las tuberías, válvulas y otros equipos instalados en los conductos pueden fallar bajo un esfuerzo considerablemente menor en comparación con su esfuerzo de diseño. En el caso de las tuberías, los cambios de presión reducen su vida útil, llegan a romperse con una presión mucho menor a la presión nominal (de diseño). Además, las sobrepresiones ocasionan en gran medida un aumento de la frecuencia de roturas.

El proceso de fatiga inicia en un defecto interno o en la superficie del material donde hay concentración de esfuerzos, y consiste inicialmente en desarrollo de cortantes a lo largo de planos de deslizamiento. Después ciertos ciclos, este deslizamiento genera intrusiones y extrusiones que dan lugar a una grieta, la cual crece lentamente con los ciclos posteriores de esfuerzo y puede llegar a ser lo suficientemente grande como para producir una fractura rápida al satisfacer los criterios de la energía o la intensidad de esfuerzo para una rápida propagación. La fatiga es posible cuando el número de ciclos es grande.

Las tuberías a presión están sometidas a un esfuerzo de tensión constante, correspondiente a su presión de operación, el cual durante el transitorio hidráulico tiende a abrir las grietas iniciales y el esfuerzo de compresión tiende a cerrarlas. Las sobrepresiones y depresiones generadas durante los transitorios hidráulicos producen una variación de esfuerzos superpuestos en el esfuerzo medio constante. Los esfuerzos de diferente amplitud contribuyen de forma diferente al daño por fatiga.

Es importante evaluar la posible fatiga y diseñar correspondientemente. Sin embargo, actualmente las normas de diseño de tuberías para transporte de agua no toman en cuenta la fatiga, la evaluación por fatiga es obligatoria para las tuberías de las plantas nucleares y de procesos industriales, pero el riesgo de fatiga del material no es considerado en los manuales y normas de diseño de tuberías para agua potable y residual. Es muy posible que no se considere debido a que en la práctica del



diseño supone implícitamente una operación casi interrumpida, considerando pocos arranques y paros durante la vida útil de las tuberías.

Para predecir los efectos de la fatiga del material, es importante estimar el número de ciclos de presión y la magnitud de su variación. Esto puede ser obtenido por medio de medición en el acueducto una vez en operación, o por medio de un modelo matemático del transitorio durante el diseño de la conducción. Otra forma son unas curvas obtenidas experimentalmente del esfuerzo de tensión que rompe una muestra de material para diferentes números de ciclos aplicados de tensión variable, a las cuales se les conoce como curvas S-N por sus siglas en inglés “*Stress – Number of cycles*”.

En el caso de tuberías plásticas, la ecuación que se muestra a continuación, obtenida experimentalmente por Vinson en 1981, por mucho tiempo fue un estándar en la estimación de la vida de tuberías de PVC sometidas a presión cíclica:

$$C = (5.05 \times 10^{21}) S^{-4.906} \quad (1)$$

Donde:

C: número de ciclos que resistirá la tubería

S: esfuerzo en la pared del tubo, psi

Posteriormente, usando el concepto de la curva S-N, Marshall, Brogden, y Shepherd (1998) estudiaron los efectos de fatiga derivada por transitorios en tuberías de PVC y polietileno. En la Figura 2.15 se muestra la curva S-N obtenida por ellos para tuberías de PVC.

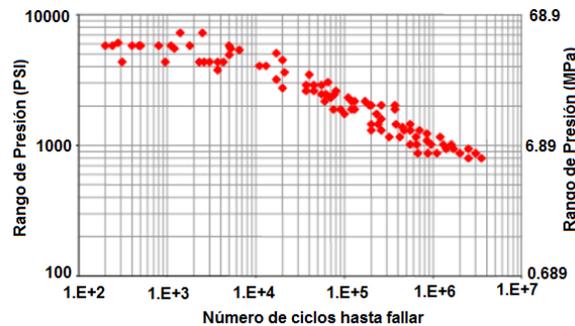


Figura 2.15 Datos de resistencia contra fatiga en tubería de PVC (Curva S-N) de Marshall, Brogden, y Shepherd (1998). Fuente: Tzatchkov, Velitchko et. al., 2006. Diseño de acueductos seguro contra fatiga del material en los transitorios hidráulicos.

A partir de otros estudios sobre los efectos de fatiga en tuberías plásticas se llegó a la conclusión que es necesario incluir dos variables independientes en la curva S-N, la amplitud del esfuerzo y el esfuerzo medio. En la Figura 2.16 se muestra la curva S-N con algunas recomendaciones para el diseño (Tzatchkov, 2006).

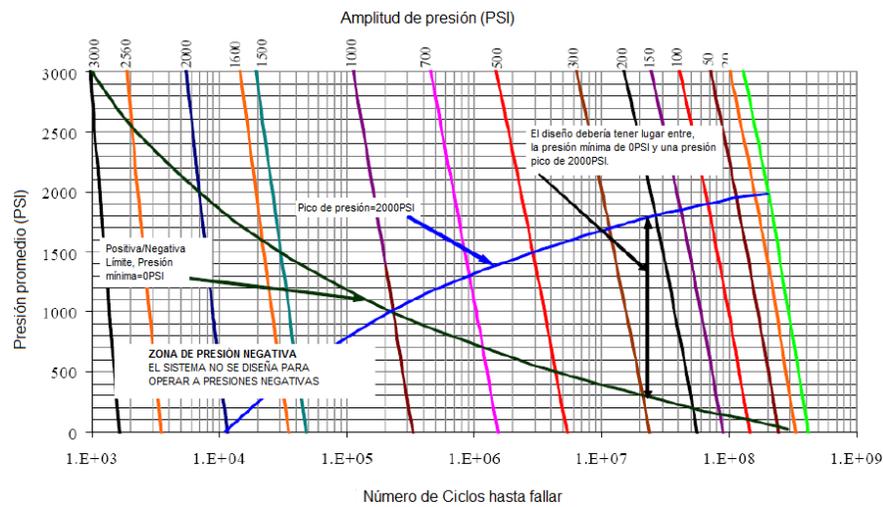


Figura 2.16 Curva de diseño contra fatiga en tuberías de PVC (Jeffrey, Moser y Folkman). Fuente: Tzatchkov, Velitchko et. al., 2006. Diseño de acueductos seguro contra fatiga del material en los transitorios hidráulicos.

Las recomendaciones para proteger una conducción contra la fatiga del material son:

- Diseñar o seleccionar una tubería con un espesor lo suficientemente grande, que asegure que los esfuerzos que se produzcan en la vida del acueducto no sobrepasen ciertos límites, arriba de los cuales puede producirse la fatiga del material.
- Un adecuado diseño de medios de control de transitorios que reduzcan el número de ciclos de presión y la amplitud de las variaciones de presión.

2.3.6.2 Cavitación

La cavitación es una intensa formación de burbujas de vapor en la zona de baja presión y posterior colapso de estas burbujas en la región de alta presión. Entonces, la cavitación se produce por el cambio de fase líquida a gaseosa cuando la presión absoluta disminuye por debajo de la presión de vapor del líquido transportado, es necesario que para que se dé la cavitación la presión en el punto de formación de burbujas caiga hasta la tensión de vapor del agua.

Las condiciones en las que puede darse la cavitación son: alta presión diferencial, baja contrapresión y(o) alta velocidad del fluido. Las burbujas que se formen pueden variar de tamaño, ser muy pequeñas o muy grandes, según la intensidad de la cavitación, también pueden ser discretas en puntos de curvatura o pueden ser distribuidas a lo largo de la longitud de una tubería.

Los factores que intervienen en la cavitación y dependen del fluido son: la densidad, temperatura, propiedades físicas y químicas, concentración de gases y ph. Los factores que dependen de la conducción son: altura de succión y presión atmosférica. Si hay equipo de bombeo, los factores que dependen de este son: caudal y velocidad de rotación.

El paso de líquido a vapor depende de dos parámetros: temperatura y presión. El agua que fluye por las tuberías está generalmente a presión, la cual es producida por una bomba o debida a una diferencia de alturas (proveniente de un tanque elevado) y es considerablemente mayor que la presión de vapor.

La energía total de un fluido está compuesta por la suma de: energía potencial, energía de presión, energía cinética y pérdida de carga. Debido al flujo que circula por la tubería, la energía potencial se convierte en la suma de energía cinética, energía de presión y pérdida de carga. Cuando se presenta



un estrechamiento, puede ser por una válvula reguladora, aumenta la velocidad y por tanto la energía cinética, también aumentan las pérdidas. Como la energía total debe mantenerse constante, la energía de presión disminuye. Si esta presión disminuye por debajo de la presión de vapor, el agua puede evaporarse y formar burbujas de vapor, las cuales se deforman al incrementar la presión y finalmente implotan y desaparecen (Figura 2.17).

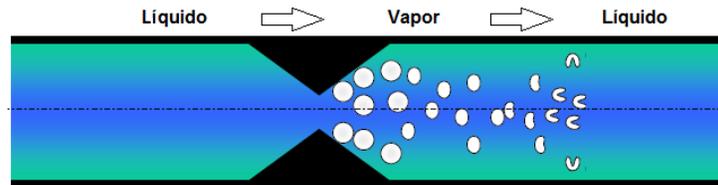


Figura 2.17 Aparición de cavitación en una tubería.

Los lugares en donde puede aparecer cavitación en equipos hidráulicos son: álabes de turbinas y rodetes de bombas. A lo largo de las conducciones puede aparecer en estrangulamientos bruscos, donde se tenga regulación mediante orificios y donde esté instalada una válvula reguladora.

La cavitación se da en dos etapas; la primera es la formación de las burbujas, que puede estar asociada a puntos de discontinuidad, si el líquido tiene poco contenido de aire el crecimiento es lento y se producen por difusión de vapor mientras que si es rápido se debe a la reducción brusca de presión; la segunda es la implosión de las burbujas de vapor, una vez formada la burbuja, aumenta de tamaño y disminuye la velocidad del flujo y la presión, la burbuja es arrastrada a los puntos de mayor presión donde estalla, lo cual induce una onda de presión en el medio que la rodea, el agua que rodea las burbujas que estallan golpea las paredes de la tubería sin amortiguación alguna, sus efectos pueden ser catastróficos por actuar sobre un espacio reducido, creando esfuerzos de fatiga, deformaciones plásticas y remoción de partículas de la tubería (erosión y corrosión por cavitación).

Las burbujas que se forman por la cavitación son de dos tipos: burbujas de vapor o de gas. Las primeras se forman debido a la vaporización del líquido, se forman donde la presión estática es menor que la presión de vapor del líquido. Las segundas se forman por la presencia de gases disueltos en el líquido (generalmente aire) y se da en la región donde la presión estática es menor que la presión del gas.

Los altos contenidos de aire favorecen el comienzo de la cavitación, debido a que originan una mayor cantidad de burbujas, aunque a su vez disminuye la velocidad de implosión de las mismas.

Existen dos tipos de cavitación: la cavitación por flujo y la cavitación por ondas. La primera, está presente en tuberías donde la presión del líquido alcanza valores próximos al de la presión de vapor del mismo. Y la segunda, aparece cuando el líquido está en reposo y por él se propagan ondas parecidas a las ultrasónicas o típicas ondas por reflexión sobre paredes o superficies libres debido a ondas de compresión o expansión fruto de explosiones u otras perturbaciones como el caso del Golpe de Ariete.

También se puede clasificar la cavitación según la forma en la que se produce, el grado de desarrollo de la misma y según la forma de manifestarse macroscópicamente.

Según la forma de producirse puede ser:

- De vapor, cuando la disminución local de la presión en el líquido, creada por depresiones locales u ondas de presión transmitidas en el fluido.
- Gaseosa, cuando hay introducción de energía en puntos del líquido (aumento de la temperatura).

Dependiendo del grado de desarrollo puede ser:



- Incipiente. Etapa inicial de la cavitación, empiezan a formarse burbujas.
- Desarrollada. Número de burbujas suficientemente elevado.
- Súper-cavitación, la cavitación se extiende ocupando la totalidad de la superficie.
- Separada. Etapa final de cavitación, se aproxima a desaparecer.

Y según su manifestación macroscópica puede ser:

- Burbujas aisladas. Cuando el número de burbujas es muy grande y da lugar a la llamada cavitación de nube.
- Lámina.
- Estría. Es un tipo de cavitación en la que la formación de las burbujas se produce siguiendo una línea.

Los efectos que llega a tener la cavitación dependen principalmente del tiempo de duración, intensidad de la cavitación, propiedad del líquido en la tubería y resistencia del material de la tubería a la erosión por la cavitación. Los efectos que causa son ruido y vibración, provocadas principalmente por la inestabilidad generada por el colapso de las burbujas. Además, puede haber pérdida de sólidos en las superficies límites de la tubería o equipos de bombeo, llamado erosión por cavitación. También causa pérdidas y alteraciones de las propiedades hidrodinámicas que pueden ser consideradas como perjudiciales.

Cuando hay equipos de bombeo, los efectos que tiene la cavitación sobre ellos son:

- Disminución del rendimiento. Con la formación de burbujas se reduce el espacio para el paso de líquido lo que disminuye el caudal, altura manométrica, rendimiento de la bomba. Además, las vibraciones después de cierto tiempo pueden dañar la tubería y el equipo de bombeo.
- Erosión. Se debe a la formación y al colapso de burbujas de vapor cerca de una superficie metálica. El daño provocado tiene un aspecto semejante a picaduras por corrosión, pero las zonas dañadas son más compactas y la superficie es más irregular en el caso de la cavitación. Las etapas en las que se da la erosión son (Figura 2.18):
 1. Se forma una burbuja de cavitación sobre la película protectora.
 2. El colapso de la burbuja causa la destrucción local de la película.
 3. La superficie no protegida del metal está expuesta al medio corrosivo y se forma una nueva película por medio de una reacción de corrosión.
 4. Se forma una nueva burbuja en el mismo lugar, debido al aumento de poder nucleante de la superficie irregular.
 5. El colapso de la nueva burbuja destruye otra vez la película.
 6. La película se forma de nuevo y el proceso se repite indefinidamente hasta formar huecos bastante profundos.

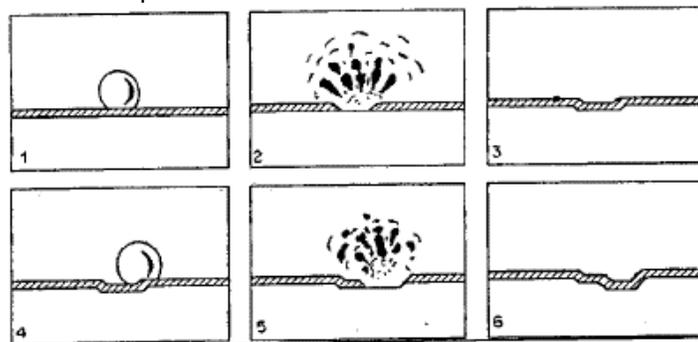


Figura 2.18 Etapas de la erosión por cavitación. Fuente: Aranibar, A., 2016. Determinación predictiva de la cavitación por parámetros sónicos.



No es fácil detectar cavitación, una forma es la observación de ruidos y vibraciones. En el caso de que haya equipo de bombeo puede ser visible cuando hay un cambio en el rendimiento del equipo, aunque esto no es suficientemente confiable por sí solo como indicación de la cavitación, ya que en ocasiones ruidos apreciables y tras indicaciones del fenómeno pueden aparecer sin acompañamiento de cambios en dicho rendimiento.

Prevenir la cavitación es mediante un buen diseño para evitar en lo posible las bajas presiones, sobre todo aquéllas que estén por debajo del punto de vaporización. Muchas veces existen factores externos que no están al alcance del diseñador, por lo que una opción es introducir pequeñas cantidades de aire en la zona donde se produzcan el fenómeno, otra solución puede ser la de usar protección catódica para evitar que el golpe de ariete dañe las paredes de la tubería o en los equipos de bombeo, o el recubrimiento de materiales especiales de alta resistencia.

Específicamente para prevenir la cavitación en los equipos de bombeo se recomienda diseñarlo con el fin de obtener una presión lo suficientemente grande a la entrada de la bomba o usar bombas multi-etapas para grandes alturas de bombeo o minimizando la distancia entre la fuente y la bomba. También puede funcionar pulir la superficie sujeta a efectos de cavitación debido a que es más difícil formar burbujas sobre una superficie muy plana.

2.3.6.3 Aire atrapado

Un volumen de agua contiene aproximadamente dos por ciento de aire disuelto en condiciones estándar (1 kg/cm² a 21°C), pero puede contener más, dependiendo de la presión y la temperatura del agua dentro de la tubería (Pozos, 2012). Cuando el agua se presuriza, su capacidad para retener el aire se amplía considerablemente.

Otra forma de que haya aire es cuando se libera el que está en solución a causa de la baja presión en zonas creadas por válvulas parcialmente abiertas, las variaciones en la velocidad de flujo causada por el cambio de diámetros y pendientes, y los cambios en la elevación del conducto. También, puede entrar aire a la tubería por fugas en las juntas donde la presión dentro de la tubería cae por debajo de la presión atmosférica.

El aire atrapado puede tener efectos perjudiciales en los acueductos, debido a que las tuberías de agua generalmente se diseñan asumiendo que no hay aire en el agua, no se tienen en cuenta las causas del arrastre de aire y el potencial problema que pueden surgir con el aire arrastrado.

Los problemas debidos al aire atrapado en las tuberías son:

- Si se forma una bolsa de aire dentro de la tubería, ésta puede reducir el flujo al reducir el área transversal de la tubería, y podrá, si el volumen de la bolsa de aire es suficiente, completamente detener el flujo de agua. Esta disminución de la capacidad debida al aire atrapado en una conducción a gravedad puede provocar derrames a través de tanques, torres de oscilación, etc.
- Las bolsas de aire también provocan un aumento de velocidad debajo de ellas y producir el desprendimiento de una porción de la bolsa o bien su completa remoción. Este cambio abrupto y rápido en la velocidad del fluido cuando se retira la bolsa y se detiene en otro punto alto podría provocar un aumento de presión y generar un golpe de ariete inducido por la evacuación del aire.
- Las sobrepresiones generadas por la compresión de bolsas de aire podrían inducir el fenómeno de la propagación rápida de falla lo que puede ser catastrófico.

El aire acumulado puede localizarse en tramos largos con pendientes uniformes, puntos altos con pendientes encontradas y en tramos medianos con puntos altos y pendientes fuertes y prolongadas aguas abajo. Lo anterior dependerá de los perfiles de las tuberías, los cuales a menudo son ondulados y las tuberías pueden contener aire en forma de bolsas que pueden acumularse en puntos



altos a lo largo del perfil. También se debe a que el aire es más liviano que el agua y, por lo tanto, tiende a migrar a los puntos altos.

El aire atrapado puede ser benéfico para prevenir la cavitación o para reducir los efectos perjudiciales causados por transitorios hidráulicos. Sin embargo, en cantidades no controladas también puede ser indeseable y perjudicial. El aire atrapado en acueductos no siempre puede ser expulsado por completo. Por ello, el uso, dimensión y la correcta ubicación de válvulas de aire en los puntos mencionados es muy importante para un buen funcionamiento del conducto.

2.3.7 Propagación Rápida de Falla

Diferenciar entre una fractura rápida dúctil de una frágil no es sencillo. Una fractura frágil es aquella en la cual la fisura se propaga con muy poca deformación plástica en su vértice, mientras que una fractura dúctil es aquella que progresa como consecuencia de una intensa deformación plástica asociada al extremo de la fisura. Además, es importante caracterizar el proceso de fractura según la velocidad con que se desarrolla. Una fractura rápida se caracteriza por la propagación acelerada de una fisura en una estructura. Las velocidades de propagación pueden ser desde unos centenares a algunos miles de metros por segundo. Esta fractura puede o no estar precedida por una extensión lenta de la fisura y una vez iniciada, pocas veces se detiene antes de producir la rotura completa de la tubería.

La propagación rápida de falla (PRF) es un mecanismo de falla, en este fenómeno una grieta frágil de movimiento rápido puede propagarse en una tubería a presión de todo tipo de material. La propagación de la grieta ocurre a gran velocidad, con velocidades de hasta 600m/s y las grietas pueden ser de cientos de metros. No se ha observado una PRF estable a menos de 100m/s. La falla por PRF es poco frecuente, pero es posible que ocurra. Este fenómeno se produce por esfuerzos circunferenciales y es más común que ocurra en lugares donde hay clima frío, donde la disminución de la temperatura causa un aumento del esfuerzo circunferencial porque a bajas temperaturas algunos materiales se vuelven más rígidos y frágiles. Generalmente se inicia por defectos internos y ocurre en sistemas presurizados con suficiente energía almacenada para impulsar la grieta más rápido que la energía que se libera.

La PRF a lo largo de una tubería se caracteriza por una propagación constante de grietas rápidas axiales, las cuales continuarán propagándose mientras la fuerza impulsora de grietas (G) sea mayor que la resistencia a la fractura dinámica (G_d). La fuerza impulsora de la grieta se obtiene básicamente de la energía disponible para conducir la grieta en una tubería de plástico, y depende de la presión interna u otro esfuerzo aplicado, el módulo de elasticidad de la tubería y el diámetro de la tubería. La resistencia a la fractura dinámica es la capacidad de la tubería para resistir el agrietamiento, y depende del tipo de material utilizado para hacer la tubería y la temperatura. Cuando $G > G_d$, entonces la grieta se propagará, generalmente hasta el final de la tubería, o hasta que G ya no sea mayor que G_d .

De acuerdo con un análisis de la mecánica de fractura elástica lineal (LEFM) hecho por Irwin y Corten en tuberías plásticas, llegaron a una expresión para la fuerza impulsora de la grieta (Greenshields y LeEVERS, 1996), la cual se muestra a continuación:

$$G \equiv G_0 = \frac{\pi p_0^2 (D - 2h)^2 (D - h)}{8 E_d h^2} = \frac{\pi p_0^2}{8 E_d} D \frac{(D^* - 2)^2 (D^* - 1)}{D^*} \quad (2)$$

Donde:

p_0 : presión manométrica inicial de la conducción, bar

D : diámetro exterior, in

h : espesor de la pared de la tubería, in



D^* : relación D/h

E_d : módulo de elasticidad del material, N/m^2

G_0 : fuerza impulsora de la grieta kJ/m^2

Si la ecuación anterior se iguala a la resistencia a la fractura dinámica (G_d) de la pared del material de la tubería, entonces resulta una expresión para una presión crítica como sigue:

$$p_{c0} = \frac{1}{(D^* - 2)} \sqrt{\frac{8 E_d G_d}{\pi D} \frac{D^*}{(D^* - 1)}} \quad (3)$$

Donde:

G_d : resistencia a la fractura dinámica kJ/m^2

p_{c0} : presión crítica, bar

Por encima del valor de presión crítica se produce PRF, mientras que por abajo de la presión crítica, la grieta inducida se desacelera y, en una distancia relativamente corta, se detiene. Para tuberías de plástico de menor resistencia influye en G : la salida de fluido a través de la grieta, reflujo de la tubería más adelante y la inercia de la pared de la tubería. En cambio, para termoplásticos duros, G_d depende en gran medida de la velocidad de fractura así como de la temperatura y espesor de pared del tubo.

Las tuberías más propensas a la propagación rápida de falla son especialmente en las que el aire se ha introducido debido a una instalación incorrecta o debido al funcionamiento de la tubería, este aire atrapado en la tubería aumenta la fuerza impulsora de grietas (G).

Dependiendo de la velocidad, la trayectoria de la grieta que se propaga rápidamente por la tubería puede ser bastante recta o puede ser fuertemente ondulada de una forma generalmente senoidal. En algunos casos, bajo ciertas circunstancias, la grieta puede bifurcarse o ramificarse en dos o varios caminos; también pueden producirse ramas secundarias.

Que ocurra este fenómeno en una tubería depende principalmente de la presión crítica, en la cual influyen los siguientes aspectos:

- La temperatura, debido a que la resistencia dinámica a la fractura disminuye con temperaturas decrecientes que hacen que los materiales plásticos sean más susceptibles a PRF. La temperatura también influye en la longitud de la grieta.
- Las dimensiones de la tubería (diámetro y espesor de pared), ya que la susceptibilidad de las tuberías plásticas a PRF crece con el aumento de la relación de dimensión ($RD = \text{diámetro}/\text{espesor de pared}$). Con un mayor espesor y diámetro en tuberías metálicas inicia la PRF.
- Las propiedades del material de la tubería (resistencia a la fractura), si es menor es más propensa a PRF. También es más susceptible si disminuye el módulo de elasticidad.
- Proceso de fabricación de la tubería y las tensiones residuales, las tuberías plásticas fabricadas por extrusión son más propensas a este fenómeno.
- Las condiciones de servicio y envejecimiento (mantenimiento y reparación), la PRF aumenta con el tiempo de servicio, lo que depende de la velocidad de deformación más que de la temperatura.
- Las propiedades del fluido.
- Las condiciones de instalación, son más susceptibles las uniones por fusión y las que se colocan en lugares con climas fríos.
- La presión interna y los esfuerzos generados, si hay mayor presión interna.



Generalmente, que se produzca PRF en tuberías plásticas se debe a un evento de inicio, como una grieta o un daño en la pared de la tubería, además de que la fuerza impulsora debe exceder la resistencia dinámica a la fractura del material. Esta grieta inicial o daño comúnmente se debe a un factor externo, que es introducido durante la fabricación de la tubería, muy particularmente a través de las operaciones de unión, y no son detectados como factores potenciales de riesgo por los fabricantes, los responsables de la inspección y construcción. Un ejemplo es el mostrado en la Figura 2.19.

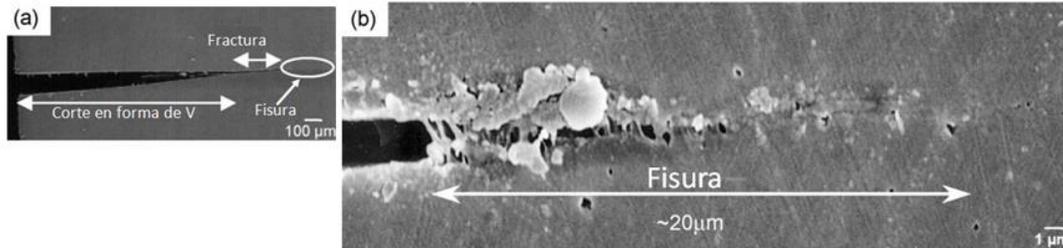


Figura 2.19. Defecto microscópico en un tubo de PVC. Fuente: Bernal-Lara, T. E. et al., 2004. *Stepwise Fatigue Crack Propagation in Poly (vinyl chloride)*.

Es importante el comportamiento dinámico que adquiere la tubería plástica con el proceso de fabricación, ya que influye en la PRF la tensión residual causada por el modo de fabricación practicado. Cuando la tubería de plástico se fabrica por un proceso de extrusión y las tuberías se enfrían desde el exterior, se producirá una tensión circunferencial de compresión en la sección exterior del espesor de la pared de la tubería, mientras que se produciría una tensión circunferencial de tracción en la parte interior de la sección.

La tensión residual parece afectar fuertemente el comportamiento dinámico de fractura de las tuberías de plástico, principalmente al inicio que durante la PRF. Se han observado dos efectos de la tensión residual en la propagación de falla:

- La tensión residual aumenta la energía de deformación almacenada antes de la propagación de la grieta, lo que ayuda a impulsar la grieta.
- Durante la propagación, disminuye la fuerza impulsora de la grieta, porque el momento de flexión liberado resultante tiende a cerrar la pared agujerada de la tubería.

La propagación rápida de falla inicialmente se identificó como un problema distintivo de tuberías de acero, debido a que eran de uso común anterior a usar tuberías plásticas. Las tuberías plásticas también se ven afectadas por este problema. En las tuberías de acero, un factor para que se dé este mecanismo de falla es el aumento de diámetro de la tubería. Para las tuberías de todos los materiales plásticos es más probable que ocurra la PRF a altas presiones, pero esto no significa que no puedan usarse tuberías de plástico solamente debe tomarse en cuenta en el diseño de que no ocurra. El material ideal de tubería, en términos de propagación rápida de falla, es uno que siempre operará por encima de la transición entre dúctil-frágil.

En tuberías de plástico es común su aparición a menor temperatura y depende del espesor de la pared de la tubería. Las tuberías de plástico muestran una presión crítica bajo la cual es imposible mantener la propagación rápida de grietas. Además, es más probable que ocurra propagación rápida de falla si existe aire atrapado en el interior de la tubería. En general los termoplásticos muestran una considerable ductilidad a temperatura ambiente. Sin embargo, en estos materiales una falla frágil se produce fácilmente a bajas temperaturas o condiciones de alto grado de deformación.

En tuberías de polietileno (PE), bajo ciertas condiciones de temperatura y operación, una grieta frágil iniciada por impacto o de otra manera se propaga a lo largo de una tubería a velocidades entre 100 y 370 m/s. Por encima del valor de presión interna crítica, la propagación de grietas ocurre, mientras



que por debajo, la grieta se desacelera y en una distancia relativamente corta se detiene, en otras palabras, la PRF se detiene si la presión del agua que impulsa la grieta cae más rápido de lo que la grieta puede propagarse, esto se expresa en la Figura 2.20.

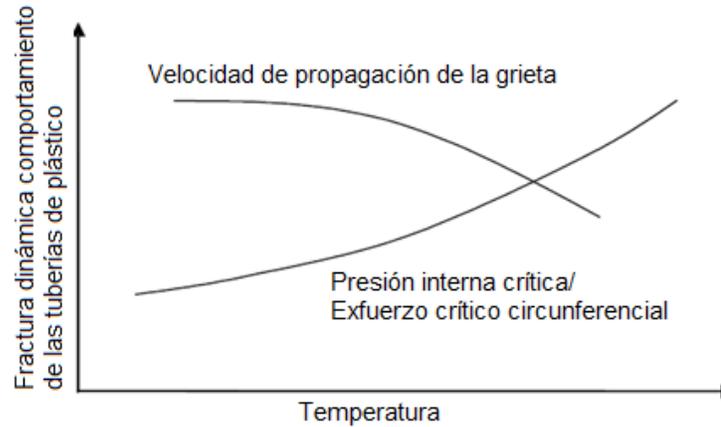


Figura 2.20 Gráfico esquemático de la influencia de la temperatura en la fractura dinámica de tuberías termoplásticas y, en particular, en la velocidad de la grieta, la tensión crítica y la presión interna crítica. Fuente: Farshad, M., 2006. *Plastic Pipe systems*.

El polietileno de alta densidad (PEAD) es un material no muy susceptible a la PRF, en cambio, el PVC es un material más susceptible a la iniciación de grietas, las cuales pueden deberse a un mal manejo de la tubería en la zanja, error del contratista u otro daño. De acuerdo con algunas investigaciones, la propagación rápida de falla en tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD) depende de un alto peso molecular y alta cristalinidad para la resistencia a la PRF.

En conducciones donde se emplean tuberías de PVC las fallas se limitan a una sección corta de tubería cuando la unión de la tubería es de campana y espiga, debido a que la grieta termina cuando llega a la discontinuidad en la unión. Mientras que en el caso de tubos de PVC unidos por fusión, no hay discontinuidad, y por lo tanto la PRF se extiende hasta por cientos o miles de metros. En el caso de la tubería con empaquetadura, se puede reemplazar y la línea se puede volver a poner en servicio con bastante rapidez, pero no sucede lo mismo con una tubería unida por fusión, no hay campanas ni espigas que actúen como puntos de terminación seguros, en el caso de esta tubería si tuviera la misma grieta debido a daños en servicio, como impacto de roca, impacto de terceros o fatiga, es posible que se deba desechar toda la tubería.

En tuberías de PE y PEAD completamente llenas de agua, no ocurren fallas por PRF, sin embargo, la inclusión de pequeñas cantidades de aire, del 5 al 10% en volumen, permitió que las grietas se propaguen. Como se muestra en las Figuras 2.21 y 2.22, en una tubería de PVC y PE de alta densidad que únicamente tiene agua adentro, la rotura es en línea recta, mientras que si además tiene aire entonces la rotura es senoidal.

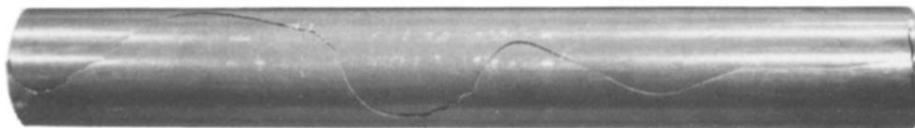


Figura 2.21. Rotura en un tubo de PVC con aire atrapado, forma senoidal. Fuente: Greenshields, C. J. & Leever, P. S., 1996. *Rapid crack propagation in plastic water pipes: measurement of dynamic fracture resistance*.

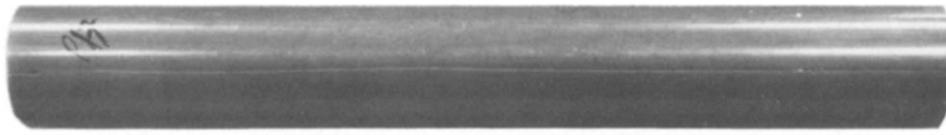


Figura 2.22. Rotura en un tubo de PVC sin aire atrapado, forma lineal. Fuente: Greenshields, C. J. & Leever, P. S., 1996. *Rapid crack propagation in plastic water pipes: measurement of dynamic fracture resistance*.

Además, existe el llamado espesor crítico, que es un cierto límite de espesor por debajo del cual la propagación rápida de falla no se puede mantener, mientras que por encima de ese valor límite puede ocurrir (Figura 2.23). En el caso de las tuberías de PVC que transportan 100% agua, es recomendable seleccionar un RD menor o igual a 13 para evitar que presente PRF, mientras que en tuberías de PE el RD mínimo seleccionable es de 29. Generalmente, no se presenta agrietamiento en tuberías con diámetro menor a 4" (Greenshields y Leveers, 1996).



Figura 2.23 Falla de 260 m de longitud por PRF en tubería fusible de PVC de 30" RD25 en Chatham, IL (Palermo, 2010).

El proceso de propagación rápida en tuberías plásticas se presenta en tres etapas hasta la rotura, las cuales son:

- Periodo de inicio de la grieta en la zona donde la concentración de esfuerzos provoca deformaciones plásticas cíclicas. Esta etapa no siempre se presenta, ya que el material de la tubería puede contener imperfecciones tipo grieta.
- Crecimiento de la grieta en la zona plástica donde se originó.
- Propagación de la grieta en la tubería, fuera del campo de concentración de esfuerzos donde se originó, hasta producir la falla final.

El agrietamiento iniciado por la fatiga cíclica de las tuberías de agua a presión también puede resultar en PRF. Las tuberías de distribución suelen experimentar millones de sobretensiones durante su vida útil. La tubería de PE tiene una resistencia hasta ocho veces mayor a las sobretensiones repetitivas que la tubería de PVC. Aunque la tubería de PVC ha mejorado considerablemente en los últimos 20 años, su resistencia a RCP todavía parece ser un motivo de preocupación.

La ley de París es un modelo que explica el grado de propagación de grietas por fatiga, el cual depende en gran medida del peso molecular de la resina de la tubería plástica, la velocidad de deformación y la temperatura. Esta ley determina que para una variación de cargas cíclicas, la variación del factor de intensidad de esfuerzos (ΔK) es el parámetro que caracteriza el crecimiento de grietas. Esta ley está basada en un análisis de la mecánica de fractura elástica lineal (LEFM), que unifica todos los datos experimentales de crecimiento de grietas por fatiga. Esta ley se expresa como sigue (Andrade et al, 2015):

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

Donde:

$\frac{da}{dN}$: incremento de la longitud de la grieta, pendiente de la curva de velocidad de crecimiento

ΔK : variación del factor de intensidad de esfuerzos

C y m : constantes que dependen del material y son obtenidas experimentalmente. C también puede depender de la relación de cargas entre los esfuerzos máximos y mínimos de cada ciclo. En el caso de m puede tener un valor entre 1 y 6 dependiendo del material.

La Ley de París también se puede escribir en coordenadas logarítmicas, las cuales arrojan como resultado una recta de pendiente m :

$$\log \frac{da}{dN} = \log C + m \log \Delta K \quad (5)$$

En la Figura 2.24 se presentan las tres fases de crecimiento de grieta por fatiga de acuerdo con la Ley de París.

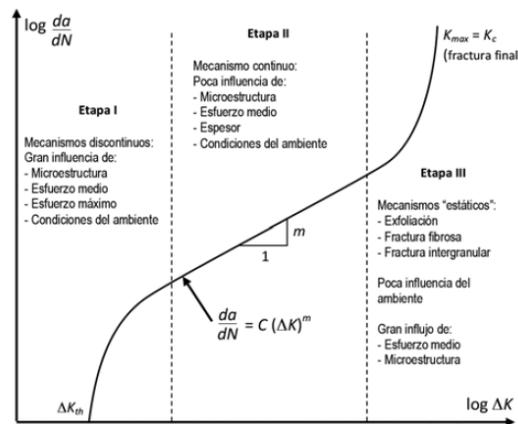


Figura 2.24 Curva característica de propagación de grieta. Fuente: Andrade, A. et al., 2015. Modelos de crecimiento de grietas por fatiga.

Si se aplica una fuerza a la tubería pero no causa una grieta, no ocurrirá PRF. Esta resistencia a la PRF se puede caracterizar por dureza, resistencia al impacto, sensibilidad a las muescas y resistencia a la fatiga. La dureza es un término general que se refiere a la capacidad de la tubería para absorber impactos y esfuerzos sin fracturarse.

Principalmente, hay dos aspectos que deben abordarse con especial cuidado para poder predecir la PRF en tuberías presurizadas, que son:

- Predecir la propagación de la grieta, a partir de la forma de la grieta y el historial de la misma.
- Pasar la información al dominio de fluidos sobre la propagación de grietas.

Cuanto mayor sea el diámetro de la tubería plástica y la presión interna, lo más probable es que se produzca una rápida propagación de grietas. Esto no significa que no se deban utilizar tuberías de gran diámetro o que no se deba utilizar tuberías de plástico a altas presiones sino solamente en el diseño se debe ser más consciente que es mayor la posibilidad de propagación rápida de fallas y tratar de diseñar contra su aparición.



Los tubos de plástico son diseñados sobre la base de curvas de regresión experimentales. Estas curvas se establecen en función del esfuerzo circunferencial (S) y el tiempo (T), a cierta temperatura y se expresa como sigue:

$$S = \frac{P(RD - 1)}{2} \quad (6)$$

Donde:

S: esfuerzo máximo circunferencial, psi

P: presión crítica, psi

RD: relación de dimensión

El esfuerzo circunferencial calculado en la pared de la tubería no es el esfuerzo real, porque en las tuberías enterradas, las tensiones adicionales se establecen por la presión del suelo y flexión. Esta es la razón por la que la curva de regresión no puede explicar la iniciación de la grieta en una tubería en operación.

Sería prudente entender el fenómeno de la PRF y por qué ocurre, para que pueda evitarse por diseño o selección de material. Principalmente, en tuberías unidas por fusión o soldadas se recomienda mejorar la resistencia a la PRF. Los fabricantes tienen que diseñar tuberías de tal manera que la PRF pueda evitarse en las peores condiciones posibles.

2.4 Normatividad y pruebas para tuberías

Aproximadamente, en el año 1835 comenzó el desarrollo de los materiales plásticos, pero la primera utilización de éstos para la fabricación de tuberías fue a principios de los años 30 del siglo XX. Después de la Segunda Guerra Mundial, se produjo un gran desarrollo de la industria de tuberías plásticas debido a la escasez de otros materiales. Con el gradual uso de tuberías plásticas se volvió imprescindible vigilar la calidad de los productos fabricados. Por ello, en los años 50, aparecen las primeras normas del producto donde se recogen las especificaciones que deben cumplir los tubos y accesorios para una aplicación determinada.

Las tuberías plásticas así como todos los materiales empleados en la construcción, están sometidos a una amplia normativa que regula la fabricación y empleo de los mismos. Esta normativa siempre va a posteriori debido a que continuamente se está innovando y sacando nuevos productos. En general, el desempeño de una tubería depende de: el material, diseño, fabricación y condiciones del ambiente en el que se instala, tal como se observa en la Figura 2.25.

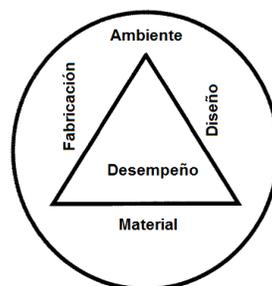


Figura 2.25 Factores que influyen en el desempeño de una tubería. Fuente: Jansen, Jeffrey. *Characterization of Plastics in Failure Analysis*.



Los tubos y accesorios plásticos utilizados para la conducción de agua deben cumplir los requisitos de distintas normas nacionales e internacionales, las cuales establecen lineamientos tanto para el tubo como para los accesorios, las características de la materia prima con la que se fabricarán, las características generales, geométricas, mecánicas, físicas y químicas, sus sistemas de unión, ensayos, etc. Además de establecer los requisitos de funcionamiento que deben cumplir las tuberías y los accesorios.

La normativa relativa a las tuberías plásticas viene determinada por el material que se emplea para la fabricación de dicha tubería y por la función que va a desempeñar. Además, depende del país en donde es producida, en el caso de México, existen las normas oficiales mexicanas (NOM) que son de carácter obligatorio y las normas mexicanas (NMX) que son voluntarias a excepción de que en una NOM se establezca su cumplimiento.

En el caso de las tuberías fabricadas en Estados Unidos se deben cumplir las normas establecidas por la ASTM (*American Society for Testing and Material*) y las que establece la AWWA (*American Water Works Association*). A continuación, en la Tabla 2.6 se observa la normatividad correspondiente a la fabricación de algunas tuberías.

Tabla 2.6 Normatividad aplicable a la fabricación de algunas tuberías.

Material de la tubería	Rango de diámetro	Periodo de instalación	Criterio ASTM	Criterio AWWA	Manual AWWA	Normativa Mexicana
Acero	> 150mm En normatividad Mexicana: 50.4 (2") - 355.6mm (14")	desde 1850's		C200	M11	NOM-B-10-1984 NOM-B-177-1990 NOM-B-179-1983
Policloruro de vinilo (PVC)	100-1,200mm En normatividad Mexicana: 50-630mm	desde 1970's	F800/D2466/D1785/ D2740/F512/D2467/ D2464	C900/905	M23	NOM-E-22-1977 NOM-E-143/1-SCFI-2002 NMX-E-229-SCFI-1999
Policloruro de vinilo con orientación molecular (PVC-O)				C900/905	M23	
Poliétileno de alta densidad (PEAD)	100-1,575mm En normatividad Mexicana: 12-1,000mm	desde 1980's	D3261/F405/D2447/ F892/F877/D2737	C906		NMX-E-18-CNCP-2012 NMX-E-144-1991 NMX-E-145/1-SCFI-2002 NMX-E-228-SCFI-2003
Concreto presforzado	250-3,660mm En normatividad Mexicana: 760-2,750mm	desde 1940's		C300/301/302/303	M9	NOM-C-252-ONNCE-2011 NMX-C-253-ONNCE-2011

De acuerdo con la normatividad establecida por la AWWA en la fabricación de tuberías de PVC y accesorios, estos deberán ser fabricados de resina de PVC virgen y deberán calificar para una base de diseño hidrostático de 4,000 psi (27.58 MPa) a 73,4°F (23°C). Además, deberán ser aprobados para químicos y certificados como aptos para transportar agua potable. También, las juntas y lubricantes destinados a usarse con tubería de PVC y accesorios deberán estar hechos de materiales que sean compatibles con la tubería y entre sí, y no deberán significar un riesgo en la calidad del agua.

La tubería de PVC deberá cumplir lo siguiente:

- Deberá ser homogénea a lo largo, libre de huecos, grietas, inclusiones u otros defectos; y uniforme en color, densidad y otras propiedades físicas.
- Se suministrará en longitudes de tendido estándar 6.1 m ± 25 mm a menos que se acuerde lo contrario en el momento de la compra.
- No deberá fallar, inflar o reventar cuando se somete a una prueba hidrostática con una presión interna igual a dos veces su presión nominal para un período mínimo de 5 segundos (ver capítulo 1, tuberías plásticas, PVC).

La presión nominal se obtiene con la siguiente ecuación y considerando un factor de seguridad igual a 2.



$$PR = \left(\frac{2}{RD - 1} \right) \left(\frac{HDB}{F} \right) \quad (7)$$

Donde:

PR: presión nominal, psi

RD: relación de dimensión

HDB: base de diseño hidráulico, 4,000 psi (27.58 MPa)

F: factor de seguridad (2.0)

La presión nominal de trabajo será de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$WPR = \left[\frac{2PR}{F} \right] - P_s \quad (8)$$

Donde:

WPR: presión de trabajo, psi

PR: presión nominal, psi

F: factor de seguridad (2.0)

P_s : tolerancia de sobrepresión, psi

- La prueba de estallamiento consiste en someter el producto a presión mediante una bomba de aceite, la cual se incrementa en un minuto hasta un valor determinado, después de lo cual se sigue aumentando con rapidez hasta que se presenta la falla del material por ruptura o explosión, se hace de acuerdo a la ASTM D1599.
- Deberá alcanzar la temperatura ambiente antes de la prueba hidrostática. Cuando la temperatura de la tubería es más alta de 25°C en el momento de la prueba hidrostática, las presiones de prueba deben ser reducidas aplicando el coeficiente de temperatura mostrado en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Coeficiente de reducción de presión. Fuente: AWWA C905.

Temperatura de la tubería		Coeficiente de reducción en la valuación de presión
°F	(°C)	
80	(27)	0.88
90	(32)	0.75
100	(38)	0.62
110	(43)	0.50
120	(49)	0.40
130	(54)	0.30
140	(60)	0.22

- Se deberán probar tres muestras de tubería de 150 mm (6 in) mínimo de largo, las cuales se aplastarán entre placas paralelas en una prensa adecuada hasta que la distancia entre las placas sea el 40% del diámetro exterior de la tubería. El grado de aplastamiento debe ser uniforme y tal que la compresión sea completada en 2 a 5 minutos. No debe haber evidencia de rajaduras, grietas o roturas.
- La tubería no debe fallar (escamas, grietas o separación de pared) cuando se prueba por inmersión en acetona, que consiste en sumergir una sección del producto en acetona anhidra durante 20 minutos (ASTM2152).
- Los accesorios de PVC deberán estar libres de huecos, grietas, inclusiones y otros defectos y no deben fallar, hincharse o estallar o cuando se sometan a una presión interna igual a dos veces la presión nominal (ver capítulo 1, tuberías plásticas, PVC) durante un mínimo de 2 horas.
- Las uniones deberán estar libres de imperfecciones que puedan causar fugas. Cuando los componentes se unen con cemento, el procedimiento debe cumplir con la práctica estándar para hacer juntas de presión descritas en ASTM D2855. Además, las uniones con soldadura térmica o fusionada a tope deben ser probadas a tierra compatible con la tubería de PVC.



La unión cementada con disolvente debe pasar la prueba de cizallamiento traslapado descrita en la AST D5264, la resistencia media mínima al cizallamiento traslapado de tres muestras debe ser de 900 psi ó 6.2 MPa.

Las pruebas que deben realizarse a la tubería están resumidas en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Pruebas a las tuberías de PVC según la AWWA C905.

Prueba	AWWA C905							
	RD51	RD41	RD32.5	RD26	RD25	RD21	RD18	RD14
	PR 80 psi	PR 100 psi	PR 125 psi	PR 160 psi	PR 165 psi	PR 200 psi	PR 235 psi	PR 305 psi
Prueba de estallamiento a corto plazo	255 psi	315 psi	400 psi	500 psi	535 psi	630 psi	755 psi	985 psi
Prueba de inmersión en acetona para la calidad de la extrusión de la tubería PVC	20 min							
Prueba de aplastamiento para la calidad en la extrusión y ductilidad bajo condiciones de carga lenta	40% del diámetro exterior de 2-5 min							
Prueba hidrostática	160 psi	200 psi	250 psi	320 psi	330 psi	400 psi	470 psi	610 psi

En el caso de los tubos de PVC, la unión puede ser con macho y campana o extremos lisos y dependiendo de ello se podrá usar cualquiera de los siguientes aditamentos de conexión en normativa mexicana:

- Anillos de hule. Cuando sean piezas con macho y campana se unirán entre sí sellando el espacio que queda entre la conexión y el tubo por medio de anillos de hule, los cuales se deslizarán en el macho con la ayuda de un lubricante y deberán cumplir con la norma NOM-E-12-1979 o su equivalente en vigor.
- Cemento. Cuando sean piezas con extremos lisos se unirán a las conexiones fabricadas expresamente para cementarse y deberá cumplir con la norma NOM-E-30-1969 o su equivalente en vigor.

En el caso de tuberías de PVC y polietileno de alta densidad (PEAD) su instalación se hará siempre en zanja, la cual debe cumplir con las dimensiones establecidas en la Tabla 2.9.



Tabla 2.9 Dimensiones de zanjas y plantillas. Fuente: Normas Técnicas Complementarias (6 de octubre de 2004).

Diámetro nominal	Ancho Bd	Prof. H	Espesor de la plantilla h	Volumen de excavación	
cm	pulg.	cm	cm	m ³ /m	
2.5	1	50	70	5	0.35
3.8	1 ½	55	70	5	0.39
5.1	2	55	70	5	0.39
6.3	2 ½	60	100	7	0.60
7.5	3	60	100	7	0.60
10.0	4	60	105	10	0.63
15.0	6	70	110	10	0.77
20.0	8	75	115	10	0.86
25.0	10	80	120	10	0.96
30.0	12	85	125	10	1.06
35.0	14	90	130	10	1.17
40.0	16	95	140	10	1.33
45.0	18	110	145	10	1.60
50.0	20	115	155	11	1.78
61.0	24	130	165	13	2.15
76.0	30	150	185	14	2.77
91.0	36	170	210	15	3.57
107.0	42	190	230	17	4.37
122.0	48	210	245	20	5.14
152.0	60	250	300	23	7.50
183.0	72	280	340	27	9.52
213.0	84	320	380	30	12.16
244.0	98	350	415	34	14.53

En el fondo de la zanja deberá colocarse una plantilla de material libre de piedras (material fino) para el asiento de la tubería, se arreglará la plantilla con la concavidad necesaria para ajustarse a la superficie externa inferior de la tubería, en un ancho cuando menos igual al 60% de su diámetro exterior y de preferencia en su cuadrante inferior. El resto de la tubería será cubierto hasta una altura de 30 cm arriba de su lomo con material granular fino, colocado a mano y compactado cuidadosamente con equipo manual y humedad óptima al 90% de la prueba Proctor, llenando todos los espacios libres abajo y adyacentes a la tubería (acostillado). Este relleno se hace en capas que no excedan de 15 cm de espesor. El resto de la zanja podrá ser rellenado a volteo si es una zona con poco tránsito vehicular, o compactado si el tránsito vehicular es intenso (Figura 2.26).

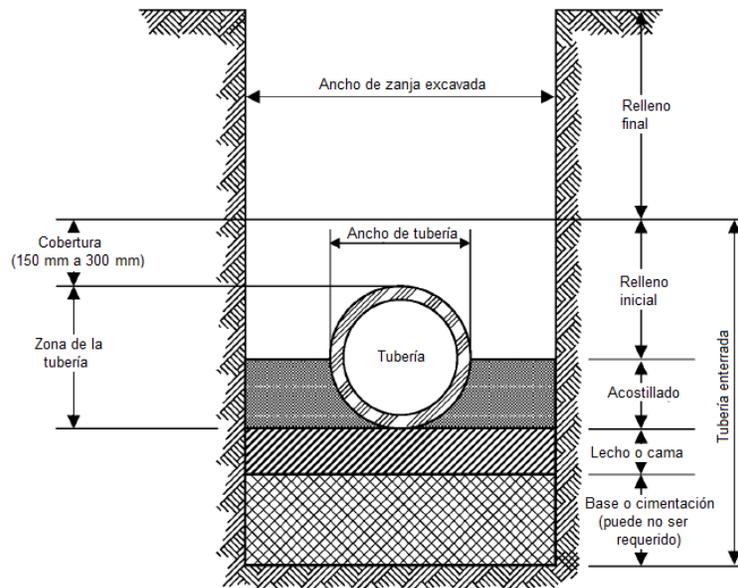


Figura 2.26 Corte de la sección de una zanja. Fuente: AWWA M23.



Una vez instalada la tubería, debe hacerse la prueba de presión hidrostática, cuyo propósito es garantizar que la tubería instalada se encuentra en perfectas condiciones de hermeticidad. Esta prueba se hará conforme a la NOM-001-CONAGUA-2011, descrita a continuación:

1. La tubería, instalada en zanja, será anclada provisionalmente como lo establece la norma NOM-001-CONAGUA-2011. Las pruebas se harán por tramos.
2. La tubería se llenará lentamente con agua, purgando el aire entrampado de manera que el aire acumulado en la parte superior pueda eliminarse, por lo que el llenado se hará a partir del punto más bajo del tramo. Los tramos de tubería deberán ser prellenados con los tiempos especificados en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Tiempo de llenado. Fuente: NOM 001-CONAGUA-2011.

Tubería	Tiempo de prellenado (h)
Acero inoxidable	2
Concreto (presforzado con y sin cilindro metálico)	24
Fibrocemento	24
Hierro Dúctil y Acero	2
PVC	1
PRFV	1
PEAD	1
Otros materiales	2

Es importante considerar las operaciones de vaciado y llenado de un acueducto como operaciones normales. El gasto máximo de llenado de la tubería está dado por la ecuación 9 y depende de la celeridad, que a su vez depende del material de la tubería. En el caso del gasto de vaciado programado de una conducción está dado por la ecuación 10 y depende principalmente de la longitud de la tubería (Guarga, 1985).

$$Q_{m\acute{a}x} = \Delta h \frac{gA}{a} \quad (9)$$

Donde:

$Q_{m\acute{a}x}$: gasto máximo de llenado, m³/s

Δh : resistencia de la tubería expresada en m.c.a. de presión manométrica interior, m

A: área de la tubería, m²

a: celeridad de la onda de presión, m

$$Q_{vac} = \frac{LA}{t} \quad (10)$$

Donde:

Q_{vac} : gasto medio de vaciado, m³/s

L: longitud de la tubería, m

A: área de la tubería, m²

t: tiempo de vaciado, recomendable entre 6 y 8 horas, s



3. Para probar la tubería se utilizará una presión de 1.5 veces su presión de trabajo (presión de prueba). Las presiones de trabajo para la tubería de PVC y PEAD, corresponden a temperatura ambiente de 25°C o menor. Una vez alcanzada la presión de prueba, ésta se sostendrá durante 2 horas como mínimo sin presentar fugas o fallas en los elementos de la conducción, en caso de presentar algún daño debe repararse o reemplazarse hasta obtener resultados satisfactorios. Cuando el tiempo transcurrido entre la ejecución de una prueba y otra es superior a las 24 horas, la tubería deberá ser llenada nuevamente.
4. El sistema se considera hermético, si después de haber realizado la prueba de presión hidrostática a los tramos no se detecta ninguna fuga y la presión de prueba al finalizar, sea mayor o igual al 95% de la presión inicial.

Para detectar si las tuberías plásticas son susceptibles a la propagación rápida de falla (PRF), el Dr. Pat Leever desarrolló el método de prueba S4, descrito en la ISO13477-Tuberías termoplásticas para el transporte de fluidos- Determinación de la resistencia a la propagación rápida de falla- Estado estable a pequeña escala. Otro método de prueba para PRF en tuberías de plástico es el FS, descrito en la ISO13478-Tubería termoplástica para el transporte de fluidos- Determinación de resistencia a la propagación rápida de falla- Ensayo a escala completa (FS). Ya sea que se realicen pruebas FS o S4 RCP, el resultado clave utilizado por la industria de tuberías de plástico es la presión crítica.

Los productos plásticos deben superar estrictos controles de calidad y cumplir las especificaciones técnicas. Sin embargo, durante el propio proceso de validación de las piezas o durante el uso de las mismas, pueden surgir innumerables problemas, tales como: degradación química de tuberías, roturas en tuberías y accesorios, problemas de fugas de fluido, etc. Los cuales, los fabricantes necesitan solucionar de la forma más eficiente posible.

También es importante que la instalación y operación se hagan de forma adecuada. En el caso de los instaladores, que tengan entrenamiento suficiente para evitar problemas como la sobreinserción de la espiga dentro de la campana del tubo, lo cual causa esfuerzos. Aunque los tubos de PVC tienen una indicación de máxima inserción, este problema llega a suceder.

2.5 Casos de rotura de tuberías por propagación rápida de falla (PRF)

El Dr. Palermo realizó estudios entre los años 2004 y 2013 en los Estados Unidos (Palermo, 2010), para él la ventaja de emplear tuberías plásticas en vez de tuberías metálicas es el costo menor y que no son sensibles a la corrosión. En estos estudios, las tuberías de PVC fallaron por propagación rápida de falla y en campo muestran que las tuberías de PVC fallan por propagación rápida de falla (PRF) para un RD entre 18 y 25. A partir de los resultados, emitió recomendaciones para el diseño en contra de la PRF. En la Tabla 2.11 se resumen los estudios del Dr. Palermo (Figura 2.27).

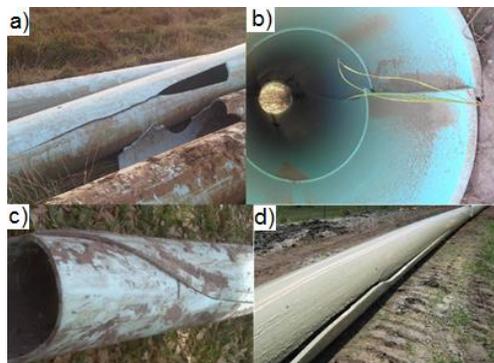


Figura 2.27 a) Falla tipo PRF de 850 m de longitud en tubería de PVC 18 in RD25-Chatham, IL; b) Falla tipo PRF de 850 m de longitud en tubería de PVC 24 in RD25-Baton Rouge, LA; c) Falla tipo PRF de 200 m de longitud en tubería de PVC 8 in RD25-Tampa, FL; d) Falla tipo PRF de 20 m de longitud en tubería de PVC 12 in RD18-Jacksonville, FL.



Tabla 2.11. Resumen de los estudios del Dr. Palermo en EU entre los años 2004 y 2013. Fuente: Palermo, 2010. *How to design against long running cracks in plastic pipe for water applications.*

No.	Localización de la Falla	Año de la Falla	Diámetro y RD de la tubería	Longitud de la Falla (ft)	Uniones por soldadura de Termofusión
1	Winter Park, FL	2004	8in RD18	200	si
2	Danville, CA	2006	20in RD18	400	si
3	Casselberry, FL	2006	6in RD18	45	si
4	Collier Country, FL	2007	30in RD25	1100	si
5	Greencastle, IN	2007	10in RD21	800	si
6	Greencastle, IN (2)	2007	10in RD21	43	si
7	Pittsburgh, PA	2007	24in RD25	160	si
8	Clay County, FL	2008	20in RD18	600	si
9	Clay County, FL	2008	20in RD18	1600	si
10	Xenia, IA	2008	20in RD18	1100	si
11	Tampa, FL	2009	8in RD25	200	si
12	Baton Rouge, LA	2009	24in RD25	850	si
13	Collier County, FL	2009	30in RD25	750	si
14	Chatham, IL	2011	18in RD25	850	si
15	Fremont, CA	2011	12in RD25	2000	si
16	Green Bay, WI	2011	16in RD18	300	si
17	Salt Lake City, UT	2012	16in RD31	350	si
18	Salt Lake City, UT	2012	16in RD31	3300	si
19	Dorchester County, SC	2012	20in RD21	2200	si
20	Watford City, ND	2013	16in RD21	850	si
21	Watford City, ND	2013	16in RD21	1200	si
22	Watford City, ND	2013	16in RD21	850	si
23	Jacksonville, FL	2013	12in RD18	20	si

En México, el acueducto González Ortega II, el más reciente de los tres acueductos en la ciudad de Chetumal en el Estado de Quintana Roo, presentó roturas después de una de las dos plantas de bombeo con las que cuenta, Ucum II (Figura 2.28). La fuente de captación de este acueducto es una zona de pozos denominada González Ortega II. El primer tramo va de la planta de bombeo González Ortega II al bombeo Ucum II con una longitud de 13,488 m con tubería de polietileno de alta densidad (PEAD RD32.5) y un diámetro nominal de 24 in. El segundo tramo de la planta de bombeo Ucum II a los tanques de entrega Bachilleres es de 25,222 m con tubería de PEAD (RD17, 26 y 32.5) y asbesto-cemento, de diámetro nominal 24 in.

De acuerdo con el organismo encargado de la operación del acueducto (CAPA), se presentaron roturas en la tubería de PEAD en una zona a tres kilómetros aguas abajo de la planta de bombeo Ucum II, estas fallas se debieron a las sobrepresiones y depresiones transitorias causadas después de un corte de energía eléctrica y paro de emergencia de los equipos de bombeo.



Figura 2.28 Falla en Acueducto González Ortega II con tubería de PEAD 24 in- Chetumal, Quintana Roo.



3 ANÁLISIS DE LAS FALLAS

Introducción

La falta de agua será el principal reto de la zona fronteriza de México en el corto plazo. Dentro de la República Mexicana, el Estado de Chihuahua es uno de los estados que presenta condiciones climáticas caracterizadas por temperaturas extremas y escasez de lluvia, y una distribución de la población con alta dispersión rural y una alta concentración urbana. Factores importantes a considerar en la gestión para satisfacer la demanda de agua.

La única fuente superficial de agua en Chihuahua es el Río Bravo, del cual casi el 93% de esta agua se destina a la agricultura en México y Estados Unidos. La fuente principal de agua en este estado es el agua subterránea y presenta una condición crítica de sobreexplotación. Dentro del estado se ubican un total de 69 acuíferos, de los cuales, 61 están adjudicados al Estado de Chihuahua, cinco a Sonora y tres a Sinaloa. Las principales ciudades de este estado, entre ellas Ciudad Juárez, y la mayor parte de las localidades del estado son abastecidas con agua subterránea extraída de acuíferos sobre explotados (Salas, 2006).

Ciudad Juárez se localiza en la región fronteriza conocida como Paso del Norte (Figura 3.1). Es una ciudad importante en términos demográficos y económicos. Desde la década de los cincuenta esta ciudad se ha caracterizado por experimentar altas tasas de crecimiento poblacional debido a los flujos migratorios como resultado de su localización en cuanto a ser un puerto fronterizo y al acelerado proceso de industrialización vía maquiladora. Lo anterior tuvo un impacto directo en el proceso de expansión urbana de Ciudad Juárez y con ello, un incremento en la presión sobre el recurso hídrico capaz de soportar los cambios poblacionales. De acuerdo con el censo de INEGI del 2020 la población de Juárez era de 1,501,551 habitantes (INEGI, 2021).

El clima en Ciudad Juárez está clasificado como clima seco desértico con veranos cálidos e inviernos frescos a fríos o muy seco templado con escasas lluvias en verano que se presentan comúnmente en los meses de julio, agosto y septiembre. La temperatura media mensual estimada de la región es 18°C, pero puede llegar a temperaturas de 45°C ya que se encuentra alienado geográficamente con los grandes desiertos a escala mundial y una precipitación media anual de 167 mm. En cuanto a la evapotranspiración promedio es del orden de 2400 mm/año. La zona se encuentra ubicada dentro de la Región Hidrológica No. 34 (CONAGUA, 2015).

La JMAS registra dentro de la infraestructura del sistema de agua potable en Ciudad Juárez: 59 rebombes (35 inactivos y 24 activos), 49 tanques superficiales (18 inactivos y 31 activos) y 24 tanques elevados (13 inactivos y 11 activos). La potabilización y la desinfección del agua son por medio de sistemas de cloración ubicados en los pozos y tanques, y 6 casetas de ósmosis inversa para el llenado de garrafones de agua potable. Con esta infraestructura, de acuerdo con la JMAS en el 2013, la cobertura de agua potable era del 96% y el 4% restante se suministraba de manera informal a un total de 14 colonias por medio de pipa. Para el 2017, la JMAS reportó una cobertura de agua potable del 98% (JMAS, 2013).

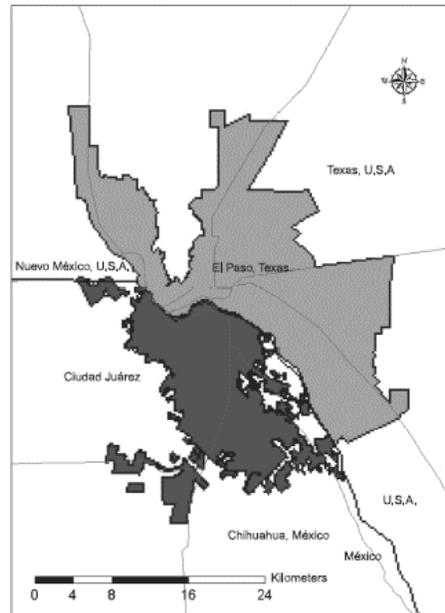


Figura 3.1 Localización de Ciudad Juárez, Chihuahua. Fuente: Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua.

La importancia de la correcta operación de la infraestructura es vital para el abastecimiento de agua potable. Por ello, en este capítulo se analizará el caso de las fallas en el acueducto Conejos-Médanos.

3.1 Programa para el análisis de transitorios hidráulicos

Existen varios procedimientos aproximados para estimar los efectos de los transitorios hidráulicos, comúnmente expresados mediante fórmulas, gráficas y nomogramas que resuelven la sobrepresión o la depresión máxima del transitorio. Sin embargo, estos procedimientos son aproximados debido a que no toman en cuenta algunos factores y por ello, suelen ser usados en etapas de prediseño o cuando se tiene la seguridad de que el transitorio cumple los supuestos del método.

En un conducto a presión, un modelo numérico que permite la simulación del golpe de ariete es el **Método de las características**. Este método parte de que los transitorios rápidos se rigen aplicando dos ecuaciones principales a un volumen de control que incluye la onda de presión que se mueve a lo largo de una conducción (Chaudhry, 2014):

Ecuación dinámica o cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (11)$$

Ecuación de continuidad o conservación de masa:

$$\frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

Donde:

Q: gasto, m³/s

g: aceleración debida a la gravedad, m/s²



A: área de la tubería, m²

H: carga de presión, m

f: factor de fricción

D: diámetro de la tubería, m

a: celeridad de la onda de presión, m/s

Ambas ecuaciones forman un sistema de ecuaciones diferenciales hiperbólicas. De la ecuación dinámica en la dirección axial de la tubería, resulta la siguiente ecuación:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (13)$$

Donde:

$$R = \frac{f}{2DA} \quad (14)$$

Y de la ecuación de continuidad resulta la siguiente ecuación diferencial parcial:

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (16)$$

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + RQ|Q| = 0 \quad (17)$$

Si $Q = Q(x, t)$; $\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt}$ (18)

Y si $H = H(x, t)$; $\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt}$ (19)

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda a^2 \quad (20)$$

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (21)$$

Resultando en las Ecuaciones características:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (22)$$

$$\frac{dx}{dt} = a \quad (23)$$

un instante de tiempo determinado, en un punto concreto de la conducción

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (24)$$

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (25)$$

Esta condición se representa en la Figura 3.2:

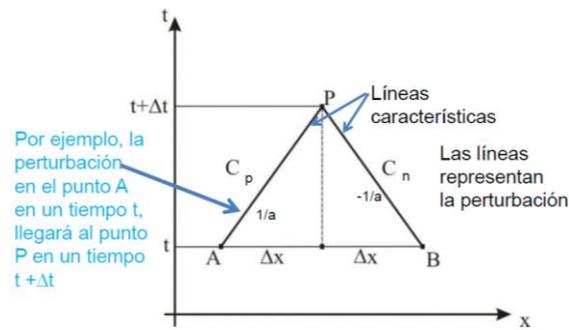


Figura 3.2 Representación gráfica de las ecuaciones características.

Después de resolver numéricamente las ecuaciones con el método de las características quedan como sigue:

Característica positiva

$$Q_p = C_p - C_a H_p \quad (26)$$

Característica negativa

$$Q_p = C_n + C_a H_p \quad (27)$$

Donde Q_p y H_p representan los valores de gasto y presión en el instante presente, mientras que C_a se evalúa como:

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (28)$$

$$C_p = Q_A + C_a H_A - R Q_A |Q_A| \quad (29)$$

$$C_n = Q_B - C_a H_B - R Q_B |Q_B| \quad (30)$$

$$Q_p = 0.5(C_p + C_n) \quad (31)$$

$$H_p = \frac{C_p - C_n}{2C_a} \quad (32)$$

Además de los procedimientos aproximados, existen programas de cómputo que analizan los transitorios hidráulicos usando un modelo matemático con el fin de determinar las posibles consecuencias de éste como en términos de presiones producidas y efectos sobre el equipo de bombeo si es el caso. Este análisis comúnmente se realiza primero sin medios de control y posteriormente se analizan variantes para encontrar una solución.

Generalmente, la información que requieren estos programas es:

- Longitud, diámetro, coeficiente de rugosidad y celeridad para cada tramo del conducto.
- Topología de la red (forma en que se conectan entre si los tramos).
- Nivel de agua en los tanques.
- Datos para los equipos de bombeo: número de bombas en operación, curvas características de las bombas, nivel de agua en la toma.
- Datos de los medios de control: ubicación, dimensiones y otras características.
- Condiciones iniciales para el transitorio. Se expresan por los gastos, cargas y niveles del flujo permanente que se tiene en la conducción antes de producirse el transitorio.



- Tipo de transitorio que se quiere simular. Para conducciones de agua potable normalmente se analiza la parada de bombas o el cierre de válvulas.

Este tipo de programas suelen como resultado las cargas máximas y mínimas producidas en el transitorio en toda la conducción. También pueden proporcionar la evolución de la presión en el tiempo en los nodos de la conducción. En algunos casos llegan a dar la ubicación y volumen de las separaciones de columna si es que puede simularla. Es común que por practicidad los resultados que emiten estos programas sean representados gráficamente, tal es el caso de las envolventes de cargas máximas y mínimas en la conducción dibujadas sobre el terreno del trazo de ésta.

Para la simulación es importante determinar los tramos en los que será dividida la conducción para su análisis y el intervalo de tiempo en que se simulará el transitorio. Para la revisión y análisis transitorio del acueducto Conejos-Médanos, se utilizó el programa numérico TRANS implementado por el Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Carmona y Carmona, 2013).

3.1.1 TRANS

Este programa fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, con la finalidad de simular transitorios hidráulicos en tuberías a presión (Figura 3.3). El programa se basa en el método de las características.



Figura 3.3 Ventana de inicio del programa TRANS.

Los elementos, estructuras hidráulicas y eventos que se pueden simular son los siguientes (Carmona, 2013):

- apertura y cierre de válvulas
- aportaciones
- batería de tubos en paralelo
- by pass
- cámaras de aire
- derivaciones
- descarga a carga constante
- operación de equipos de bombeo
- paro no programado de equipos de bombeo
- paro programado de equipos de bombeo
- tanques de carga constante
- tanques de oscilación
- tanques unidireccionales
- tuberías
- uniones
- válvulas aliviadoras de presión



- válvulas de admisión y expulsión de aire
- válvulas de retención

El programa TRANS requiere de información física e hidráulica en unidades métricas del sistema internacional, el cual se introduce al mismo por medio de un archivo de datos ASCII (con valores separados por comas/espacios) que sirve de base para el funcionamiento del programa (Figura 3.4). Las características físicas de la conducción se asignan por tramos de tubería y elementos hidráulicos que lo forman, para ello emplea códigos.

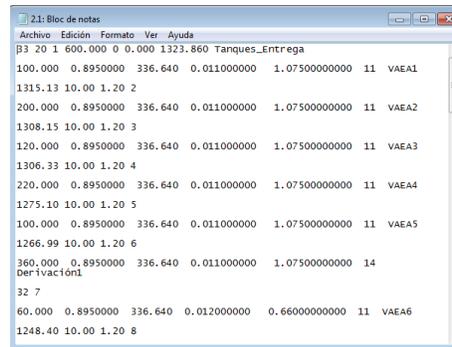


Figura 3.4 Archivo de datos de entrada al programa TRANS.

Este programa emite 5 archivos de resultados en código ASCII (Figura 3.5), en tres de ellos graba las variaciones a través del tiempo de la carga ($_H$), el gasto ($_Q$), la velocidad de las bombas, los niveles de agua en los tanques y los volúmenes de aire admitidos por las válvulas de admisión y expulsión de aire ($_RPM$); en otro registra las variaciones máximas de la carga a lo largo de la conducción durante el periodo de simulación ($_HEX$); y en el quinto, graba información del archivo de datos e información de las operaciones en estado establecido y transitorio ($_IMP$). Estos resultados pueden ser graficados por medio de paquetes gráficos que lean los archivos en código ASCII (Carmona, 2013).

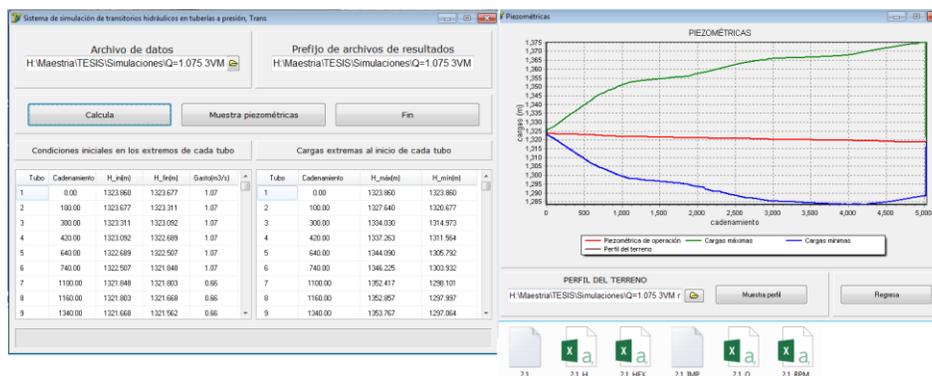


Figura 3.5 Ventana y archivos de resultados después de la simulación.

3.2 Caso de Estudio

El acueducto Conejos-Médanos se construyó para el suministro de agua potable a la zona alta de Ciudad Juárez y beneficiar cerca de 1.2 millones de habitantes con una inversión de 1,327 millones de pesos. Está conformado por una batería de 23 pozos en el acuífero Bolsón de la Mesilla interconectados por una red de tubería de acero de 47.3 km, un re-bombeo, un tanque de cambio de régimen y una línea de conducción de 25.3 km que lleva agua a tres tanques de entrega de 5,000 m³ cada uno ubicados en las afueras de la zona poniente de Ciudad Juárez, el gasto de diseño es



de 1,075 l/s. Después de los tranques de entrega hay una línea de conducción a gravedad con una longitud de 7.5 km de tubería PVC RD25 y 36 in de diámetro nominal, que lleva agua de los tanques de entrega al tanque Altamirano y a otros tanques (Figuras 3.6 y 3.7). La tubería de esta conducción es de dos marcas estadounidenses la JM Eagle y Diamond Plastics Corporation, colocada en tramos intercalados (Tzatchkov y Yamanaka, 2013).



Figura 3.6 Acueducto Conejos-Médanos. Fuente: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS).



Figura 3.7 Componentes del acueducto Conejos-Médanos. Fuente: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS).

Previamente, se hizo un estudio por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), quien determinó que el acuífero Bolsón de la Mesilla era una fuente viable, de la que se podían extraer aproximadamente 1,000 l/s y con este proyecto el acuífero Bolsón del Hueco, antes la única fuente, recuperará su capacidad. Desde el 27 de mayo de 2010 se inició el monitoreo del acuífero del Bolsón de la Mesilla, debido a que la captación de una fuente subterráneas puede tener contaminación ocasionada por el mal manejo del agua. Por ello, el Organismo Operador Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS), aplica un tratamiento a base de gas de cloro en cada uno de los pozos.

Conejos-Médanos inició la construcción en 2007, la primera etapa con una inversión de 750 millones de pesos para el equipamiento y la electrificación de los pozos. La realización total de este proyecto estuvo contemplado en el programa de gobierno de Chihuahua 2004-2010 con el objetivo de hacer llegar el agua a las 14 colonias a las que se les llevaba el líquido en pipas. La mayor parte del acueducto fue construido por la compañía CARSO Infraestructura y Construcción (CICSA).

Este acueducto fue inaugurado el 27 de agosto de 2009 e inició su operación en mayo de 2010. Posterior a un año de la entrada en operación del acueducto, en la conducción a gravedad se empezaron a registrar fallas en la tubería, entre junio de 2011 y enero de 2013 se registraron 20 fallas en diferentes puntos únicamente en tubería de la marca JM Eagle, esto provocó daños en viviendas cercanas (colonias afectadas en los terrenos del norponiente de la ciudad como Tarahumara, Gustavo Díaz Ordaz, Plutarco Elías Calles, y Ampliación Plutarco Elías Calles, entre otras) y vialidades por donde pasa la conducción (Figura 3.8).



Figura 3.8 Zona de fallas en la conducción Conejos-Médanos. Fuente: <https://aguaparatodos.org.mx/falla-acueducto-construido-aqui-por-empresa-de-slim/>

Por ello, la JMAS tuvo que invertir por su cuenta en labores de reparación que incluyen la sustitución del material y el pago de las horas hombre, esto mientras se determinaba la responsabilidad de las afectaciones. La JMAS instaló medidores de presión en diferentes puntos de la línea y determinaron que la presión utilizada es la que corresponde para ese tipo de tubos (165 psi). Entonces, fueron llevadas muestras de los tubos a un laboratorio del fabricante para que les practicaran otras pruebas que marca la norma AWWA C905, bajo la cual fueron fabricados estos tubos en Estados Unidos de América, estas pruebas fueron superadas por los tubos en presencia de personal del organismo operador. Como consecuencia de esto último, el personal del fabricante hizo una revisión de campo y la única observación que hizo fue que las cajas de las válvulas de aire carecían de ventilación adecuada lo cual se corrigió.



En el caso del Instituto Mexicano del Agua (IMTA), se concentró en investigar otro posible origen de las fallas, entre las posibles causas por las que podría fallar un conducto son:

- Fenómenos transitorios.
- Sobrepresiones debidas a bolsas de aire no eliminadas.
- Errores en el proyecto.
- Obras no construidas contempladas en el proyecto original.
- Errores en la construcción, una supervisión deficiente.
- Defectos de fabricación en la tubería.
- Válvulas incorrectas.

El IMTA recopiló y analizó información, como entrevistas al personal de organismo operador y a los constructores, realizó una visita técnica a la línea de conducción, revisó el proyecto ejecutivo, realizó un análisis del comportamiento del aire atrapado en el acueducto, comparó y analizó las válvulas de aire consideradas en el proyecto con las instaladas e implementó un modelo numérico para simular los transitorios en el sistema.

Después de la revisión del proyecto ejecutivo, cuya finalidad fue saber si la construcción se llevó a cabo de acuerdo a éste o si hubo errores u omisiones, se concluyó que lo encontrado en la revisión no era fundamental para las fallas encontradas. Después de simular los transitorios en el sistema, lo que permitió estimar las sobrepresiones resultantes, se determinó que una sobrepresión no era la causa, así como tampoco lo era la operación del acueducto.

Tampoco se encontró evidencia de errores en la instalación, con la visita de campo se observó que las fallas aparecían concretamente en los tubos, con ello se recomendó realizar pruebas de laboratorio especializado (nacional o extranjero) por defectos del material. De acuerdo con la información recabada por el Instituto de Ingeniería en su visita de campo al acueducto Conejos-Médanos el 15 de enero de 2013, se observó que algunos de los tubos que habían fallado tenían un patrón de falla muy similar al fenómeno llamado propagación rápida de falla (PRF) y el origen más probable de las fallas se atribuyó a presuntos defectos microscópicos en el material de la tubería (Figuras 3.9 y 3.10).



Figura 3.9 Rotura del tipo PRF en un tubo de PVC sin aire atrapado ocurrido en el acueducto Conejos-Médanos en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Fuente: Tolentino K., 2015. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería: Propagación rápida de falla en tuberías plásticas.



Figura 3.10 Rotura del tipo PRF en un tubo de PVC con presencia de aire atrapado ocurrido en el acueducto Conejos-Médanos en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Fuente: Tolentino K., 2015. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería: Propagación rápida de falla en tuberías plásticas.

3.3 Datos iniciales para el análisis transitorio

Para este estudio del acueducto Conejos-Médanos (Figura 3.11), el conducto se dividió en tres líneas. La Línea 1, va de los Tanques de entrega (T.E.) al Tanque Renovación (T.R.); la línea 2, va de la derivación 1 al Tanque Plutarco Elías Calles (T.P.E.C.); y la Línea 3, une los tanques Plutarco Elías Calles y Altamirano (T.A.).

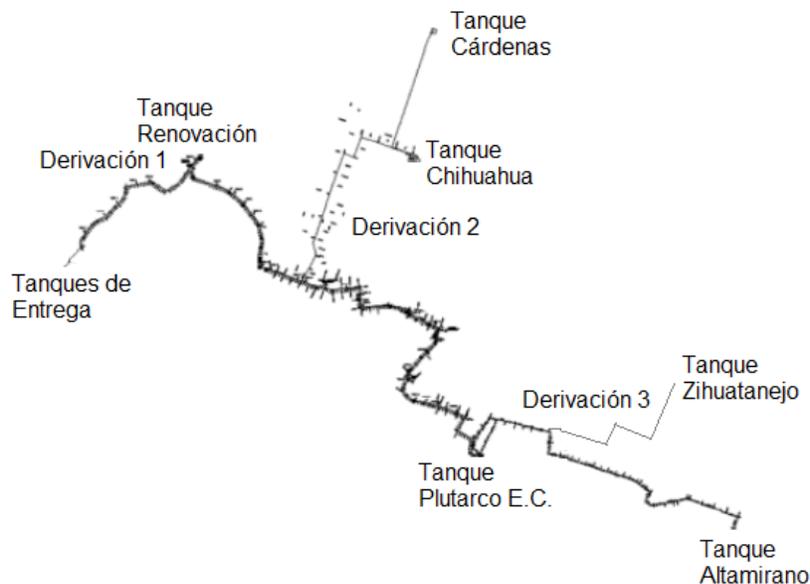


Figura 3.11 Acueducto Conejos-Médanos visto en planta.

La información conocida con la que se contó para este trabajo fue el perfil (cadenamiento y elevación) de la línea 1, la línea 2 y la línea 3. En la Línea 1 no se han presentado fallas en la tubería, estas han aparecido a lo largo de las Líneas 2 y 3, donde se han visto las roturas de los tubos de PVC. A continuación, se muestra la ubicación conocida de las fallas y las VAEA's instaladas a lo largo del acueducto Conejos-Médanos, únicas válvulas de aire al momento de presentarse las fallas (ver Figura 3.12 y Tablas 3.1 y 3.2).

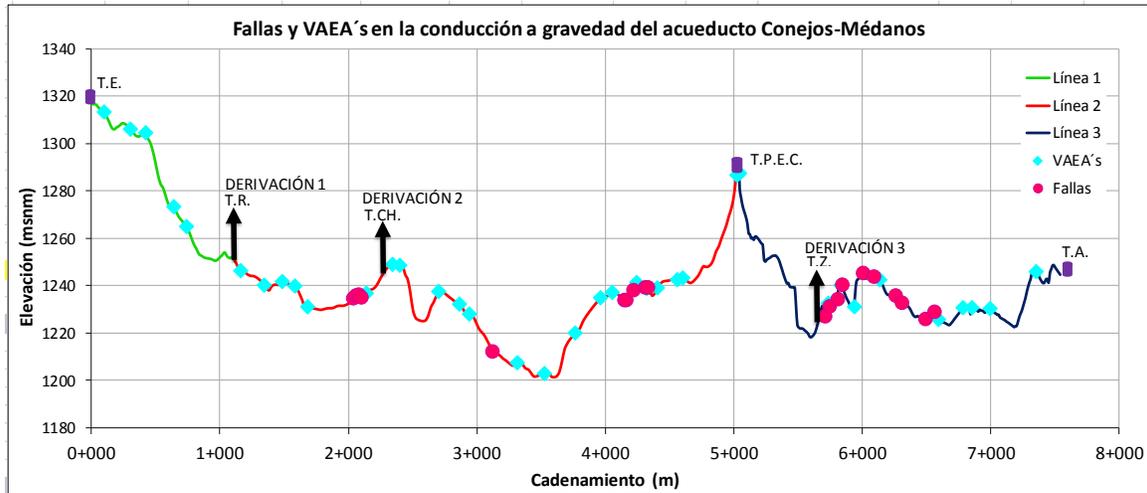


Figura 3.12 Ubicación de las fallas y VAEA's en el acueducto Conejos-Médanos.

Tabla 3.1 Ubicación de las VAEA's a lo largo del acueducto Conejos-Médanos (2011-2013).

Tramo	Cadenamiento (m)	Elevación (msnm)	Diámetro (in)
Línea 1	0+100	1+313	6
	0+300	1+306	8
	0+420	1+304	12
	0+640	1+273	8
	0+740	1+265	3
Línea 2	1+160	1+246	10
	1+340	1+240	3
	1+480	1+242	10
	1+580	1+240	10
	1+680	1+231	12
	2+060	1+236	10
	2+140	1+237	6
	2+340	1+249	8
	2+400	1+249	6
	2+700	1+238	12
	2+860	1+232	6
	2+940	1+228	2
	3+315	1+208	12
	3+520	1+203	6
	3+760	1+220	6
	3+960	1+235	6
	4+051	1+237	10
4+240	1+241	12	
4+320	1+239	10	
4+400	1+239	12	
4+560	1+242	8	
4+600	1+243	10	
5+020	1+287	8	
5+040	1+287	3	
5+734	1+233	10	
5+774	1+233	10	
5+834	1+240	12	
5+934	1+231	10	
Línea 3	6+134	1+243	6
	6+594	1+226	8
	6+784	1+231	6
	6+854	1+231	12
	6+994	1+230	6
7+354	1+246	2	



Tabla 3.2 Ubicación de las fallas en el acueducto Conejos-Médanos (2011-2013).

Tramo	Cadenamiento (m)	Elevación (msnm)	Fecha de la falla
Línea 2	2+040	1234	07/06/2011
	2+060	1236	06/07/2011
	2+080	1236	10/09/2011
	2+100	1235	24/10/2011
	3+125	1212	23/03/2012
	4+150	1233	27/03/2012
	4+160	1234	07/05/2012
	4+220	1238	26/06/2012
	4+310	1239	06/07/2012
	4+330	1239	11/01/2013
Línea 3	5+710	1227	01/02/2011
	5+745	1231	27/05/2011
	5+810	1234	17/07/2011
	5+842	1240	04/10/2011
	6+010	1245	19/04/2012
	6+094	1243	12/05/2012
	6+262	1235	15/06/2012
	6+312	1233	25/06/2012
	6+494	1226	14/07/2012
	6+560	1229	19/09/2012

De acuerdo con la AWWA-C905, la tubería de PVC RD25 de diámetro nominal 36 in, tiene un diámetro interior de 0.895 m (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Diámetro de la tubería del acueducto Conejos-Médanos de acuerdo a la AWWA-C905.

Material	Relación de dimensión	Diámetro nominal (in)		Diámetro exterior (in)		Espesor de pared (in)		Diámetro interior (in)	
		in	m	in	m	in	m	in	m
PVC	RD25	36	0.914	38	0.9728	1.532	0.0389	35.236	0.895

Además, la normativa indica una presión nominal de 165 psi (116 m.c.a.) obtenida como se muestra a continuación.

$$PR = \left(\frac{2}{RD - 1} \right) \left(\frac{HDB}{F} \right) = \left(\frac{2}{25 - 1} \right) \left(\frac{4000}{2} \right) = 166.67 \text{ psi} \quad (33)$$

Donde:

PR: presión nominal, psi

RD: relación de dimensión

HDB: base de diseño hidráulico, 4000 psi (27.58 MPa)

F: factor de seguridad (2.0)

Otro dato conocido son los gastos máximos y mínimos mensuales medidos por el Organismo Operador Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS), estas mediciones de flujo se hicieron en la entrada de cada uno de los tanques en el año 2012, los cuales se muestran en la Tabla 3.4.



Tabla 3.4 Gastos mensuales registrados. Fuente: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS).

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

De acuerdo con la JMAS, si el acueducto opera con el gasto de diseño, éste será distribuido por las diferentes derivaciones como se observa en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5 Distribución del gasto de diseño por las derivaciones del conducto. Fuente: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS).

Tramo	Q (m ³ /s)
Tanques de Entrega - Derivación 1	1.075
Derivación 1 - Tanque Renovación	0.415
Derivación 1 - Derivación 2	0.660
Derivación 2 - Tanque Plutarco E.C.	0.370
Tanque Plutarco E.C. - Derivación 3	0.370
Derivación 3 - Tanque Altamirano	0.145

Es importante aclarar que no se contó con la información del tipo de válvulas de seccionamiento ni su ubicación en el acueducto al momento de producirse las fallas, tampoco se conoce la operación de las mismas, no se obtuvo información de campo. Por ello, esa información fue supuesta.

3.4 Simulaciones de transitorios hidráulicos con el programa TRANS en el acueducto Conejos-Médanos

Después de contar con cierta información inicial, se puede obtener la velocidad con la ecuación de continuidad aplicada a los diferentes tramos del conducto.

$$Q = vA \quad (34)$$

Donde:

Q: gasto, m³/s

V: velocidad, m/s

A: área, m² ($A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$)

D: diámetro interior, m

Para obtener las pérdidas por fricción se aplicó la fórmula de Darcy-Weisbach:



$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (35)$$

Donde:

h_f : pérdidas por fricción, m

f : factor de fricción

L : longitud de la tubería, m

D : diámetro interior, m

v : velocidad, m/s

g : aceleración de la gravedad, 9.81 m/s²

El factor de fricción se obtuvo a partir de la siguiente ecuación que describe el Diagrama de Moody (Figura 3.13).

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9.5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon_0}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) - \left(\frac{2,500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0.125} \quad (36)$$

Donde:

f : factor de fricción

Re : número de Reynolds

D : diámetro, m

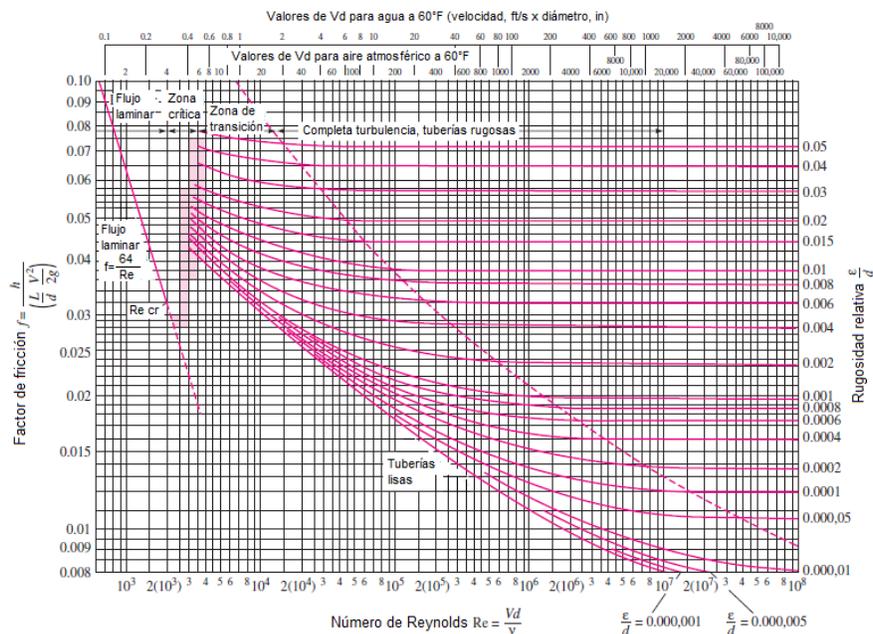


Figura 3.13 Diagrama de Moody. Fuente: Frank M. White. Fluid Mechanics.



También se calculó la celeridad para el acueducto:

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{agua}}{E_{material}} \left(\frac{D}{\delta}\right)}} = \frac{1440}{\sqrt{1 + \frac{2.115 \times 10^4}{28123} \left(\frac{35.236}{1.532}\right)}} = 336.64 \text{ m/s} \quad (37)$$

Donde:

a_0 : velocidad del sonido en el agua, 1440 m/s

E_{agua} : módulo de elasticidad volumétrica del agua, 2.115×10^4 kg/cm²

$E_{material}$: módulo de elasticidad del material del tubo, 28123 kg/cm²

D: diámetro interior del tubo, 35.236 in

δ : espesor de la pared del tubo, 1.532 in

Las válvulas de seccionamiento fueron supuestas como válvulas de mariposa. Se consideró que los transitorios producidos en el conducto fueron producidos por aperturas totales, aperturas parciales, cierres totales y cierres parciales de las válvulas mariposa. Siguiendo lo indicado en el manual del programa TRANS, se obtuvo el polinomio que representa la curva de operación de la válvula, el cual se observa en la siguiente Tabla 3.6 y Figura 3.14.

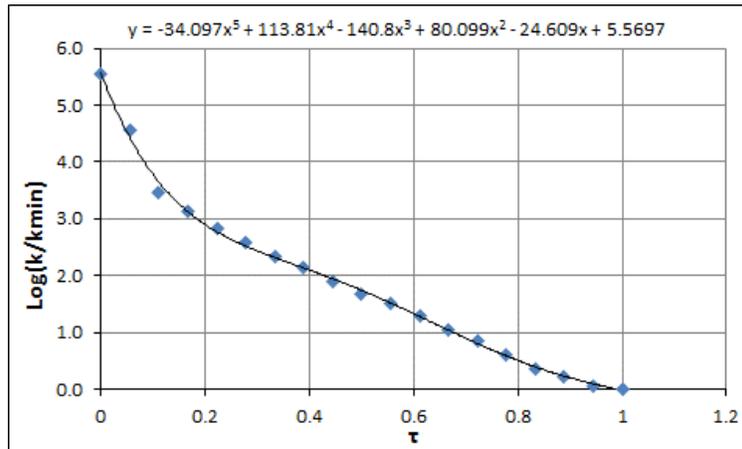


Figura 3.14 Curva que representa el comportamiento de la válvula de mariposa.

Tabla 3.6 Coeficientes del polinomio que representa la curva de operación de la válvula de mariposa.

Polinomio válvula de control mariposa					
a_0	$a_1\tau$	$a_2\tau^2$	$a_3\tau^3$	$a_4\tau^4$	$a_5\tau^5$
5.570	-24.609	80.099	-140.800	113.810	-34.097

Además, la consideración de tomar una válvula tipo mariposa como las válvulas de control para la simulación de los transitorios en el acueducto, hizo que en los casos de cierre y apertura parcial se considerara un gasto diferente, calculado a partir de la ecuación de continuidad considerando la siguiente ecuación que indica la AWWA M49 Butterfly valves, para calcular la velocidad.



$$K_{sys} = \frac{2g\Delta H_{sys}}{V^2 - K_{v90}} \quad (38)$$

$$V_{\theta} = \sqrt{\frac{2g\Delta H_{sys}}{K_{sys} - K_{v\theta}}} \quad (39)$$

Donde:

K_{sys} : coeficiente de resistencia

g : aceleración de la gravedad, 9.81 m/s²

V : velocidad de flujo m/s

K_{v90} : coeficiente de resistencia de la válvula totalmente abierta

V_{θ} : velocidad de flujo del sistema en el ángulo deseado de la válvula, m/s

$K_{v\theta}$: coeficiente de resistencia en el ángulo deseado de la válvula

En la Figura 3.15 se observa la ubicación de las válvulas de mariposa consideradas. Se consideró que debían existir válvulas de seccionamiento en estos puntos al momento de presentarse las fallas y que están en esa ubicación y son del tipo válvulas de mariposa.

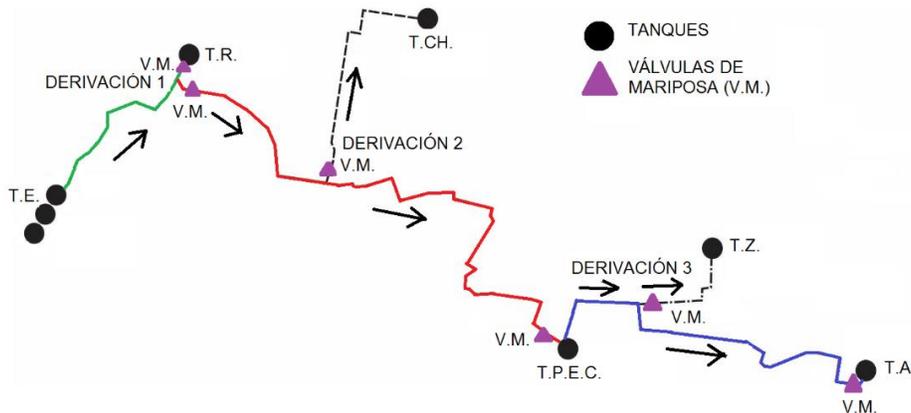


Figura 3.15 Ubicación de las válvulas de mariposa consideradas en las simulaciones.

La altura de los tanques se consideró de 7.2 m y los gastos considerados en las simulaciones fueron el gasto de diseño (1.075 m³/s) y los gastos de marzo de 2012, que fue el máximo registrado por la JMAS (1.62 m³/s y 0.542 m³/s). Los tramos de tubería en las simulaciones fueron determinados por la ubicación de las válvulas VAEA's a lo largo de la conducción.

Los tiempos de las simulaciones considerados fueron de 600 segundos (10 min), el tiempo de maniobra (cierres total, cierre parcial, apertura total y apertura parcial) fue de 5 segundos y el instante en el que inicia la maniobra es a los 50 segundos iniciada la simulación.

$$t_c = \frac{2L}{a} = \frac{2(1210)}{336.64} = 7.2s > \text{se simuló } 5s, \text{ cierre rápido} \quad (40)$$

$$t_c = \frac{2(7544)}{336.64} = 44.82s > \text{se simuló } 5s, \text{ cierre rápido} \quad (41)$$



Los casos de simulación fueron los siguientes:

- De los Tanques de Entrega al Tanque Renovación considerando que la derivación 1 está cerrada, no pasa el flujo de agua a los demás tanques, y que hay una válvula de cierre controlado del tipo de mariposa antes del T.R. (Figura 3.16). En la Tabla 3.7 se observan los datos para el primer caso de simulación.

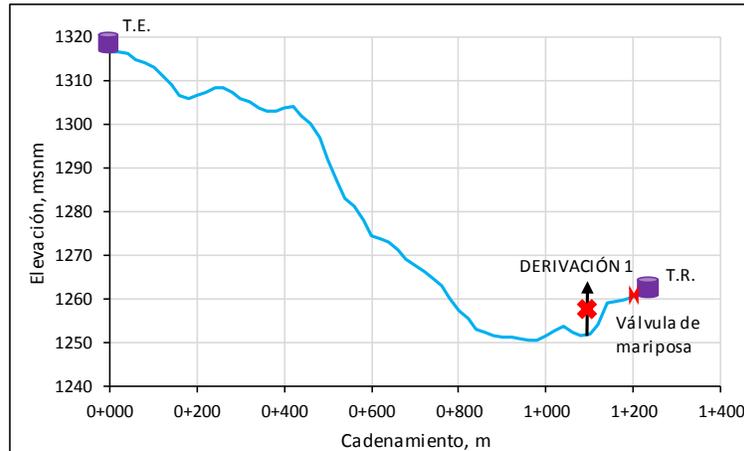


Figura 3.16 Perfil del primer caso de simulación.

Tabla 3.7 Datos para el primer caso de simulación.

Tramo	L (m)	Dnom (in)	Dint (m)	A(m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	a(m/s)
T.E. - T.R.	1210	36	0.895	0.629	1.075	1.71	1.53E+06	0.011	336.64
Tramo	L (m)	Dnom (in)	Dint (m)	A(m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	a(m/s)
T.E. - T.R.	1210	36	0.895	0.629	1.620	2.58	2.30E+06	0.011	336.64
Tramo	L (m)	Dnom (in)	Dint (m)	A(m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	a(m/s)
T.E. - T.R.	1210	36	0.895	0.629	0.542	0.86	7.71E+05	0.012	336.64

- De los Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles y del T.P.E.C. al Tanque Altamirano, considerando que las derivaciones a los otros tanques están cerradas, no pasa el flujo de agua a los demás tanques, y que hay una válvula de control del tipo de mariposa antes del T.P.E.C. y otra válvula de mariposa antes del T.A (Figura 3.17). En la Tabla 3.8 se observan los datos para el segundo caso de simulación.

Tabla 3.8 Datos para el segundo caso de simulación.

Tramo	L (m)	Dnom (in)	Dint (m)	A(m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	a(m/s)
T.E. - T.P.E.C.	5034	36	0.895	0.629	1.075	1.71	1.53E+06	0.011	336.64
T.P.E.C. - T.A.	2510	36	0.895	0.629	1.075	1.71	1.53E+06	0.011	336.64
Tramo	L (m)	Dnom (in)	Dint (m)	A(m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	a(m/s)
T.E. - T.P.E.C.	5034	36	0.895	0.629	1.620	2.58	2.30E+06	0.011	336.64
T.P.E.C. - T.A.	2510	36	0.895	0.629	1.620	2.58	2.30E+06	0.011	336.64
Tramo	L (m)	Dnom (in)	Dint (m)	A(m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	a(m/s)
T.E. - T.P.E.C.	5034	36	0.895	0.629	0.542	0.86	7.71E+05	0.012	336.64
T.P.E.C. - T.A.	2510	36	0.895	0.629	0.542	0.86	7.71E+05	0.012	336.64

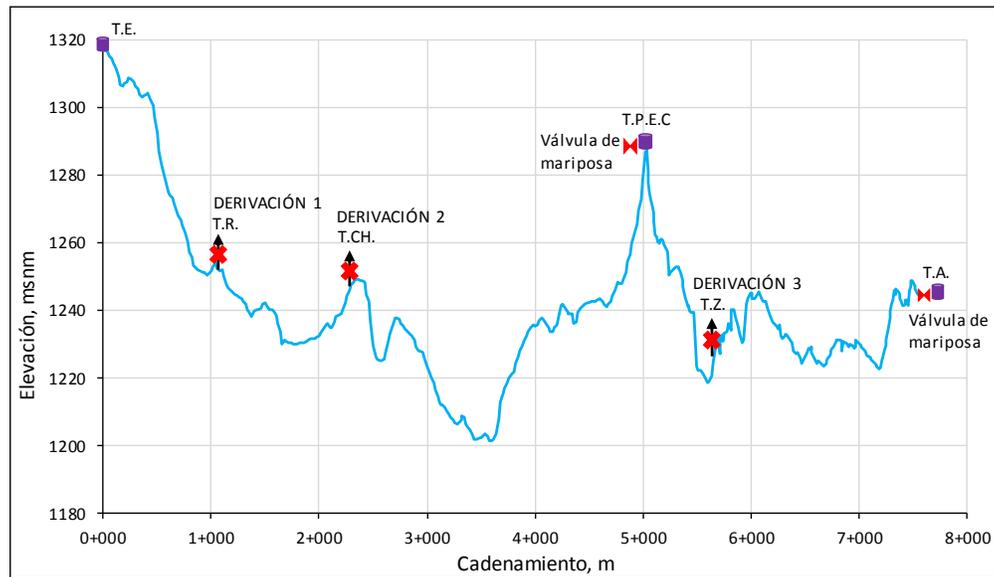


Figura 3.17 Perfil del segundo caso de simulación.

- De los Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles, del T.P.E.C. al Tanque Altamirano y de los T.E. al Tanque Renovación, considerando que las derivaciones a los tanques Chihuahua y Zihuatanejo están cerradas, no pasa el flujo de agua a los esos tanques, y que hay una válvula de control del tipo de mariposa antes del T.P.E.C. y otra válvula de mariposa antes del T.A (Figura 3.18). En la Tabla 3.9 se observan los datos para el tercer caso de simulación.

Tabla 3.9 Datos para el tercer caso de simulación.

Tramo	L (m)	Dnom (in)	Dint (m)	A(m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	a(m/s)
T.E. - Derivación 1	1100	36	0.895	0.629	1.075	1.71	1.53E+06	0.011	336.64
Derivación 1- T.R.	110	36	0.895	0.629	0.415	0.66	5.90E+05	0.013	336.64
Derivación 1- T.P.E.C.	3934	36	0.895	0.629	0.660	1.05	9.39E+05	0.012	336.64
T.P.E.C. - T.A.	2510	36	0.895	0.629	0.660	1.05	9.39E+05	0.012	336.64
Tramo	L (m)	Dnom (in)	Dint (m)	A(m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	a(m/s)
T.E. - Derivación 1	1100	36	0.895	0.629	1.620	2.58	2.30E+06	0.011	336.64
Derivación 1- T.R.	110	36	0.895	0.629	0.363	0.58	5.16E+05	0.013	336.64
Derivación 1- T.P.E.C.	3934	36	0.895	0.629	1.257	2.00	1.79E+06	0.011	336.64
T.P.E.C. - T.A.	2510	36	0.895	0.629	1.257	2.00	1.79E+06	0.011	336.64
Tramo	L (m)	Dnom (in)	Dint (m)	A(m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Re	f	a(m/s)
T.E. - Derivación 1	1100	36	0.895	0.629	0.542	0.86	7.71E+05	0.012	336.64
Derivación 1- T.R.	110	36	0.895	0.629	0.154	0.24	2.19E+05	0.015	336.64
Derivación 1- T.P.E.C.	3934	36	0.895	0.629	0.388	0.62	5.52E+05	0.013	336.64
T.P.E.C. - T.A.	2510	36	0.895	0.629	0.388	0.62	5.52E+05	0.013	336.64

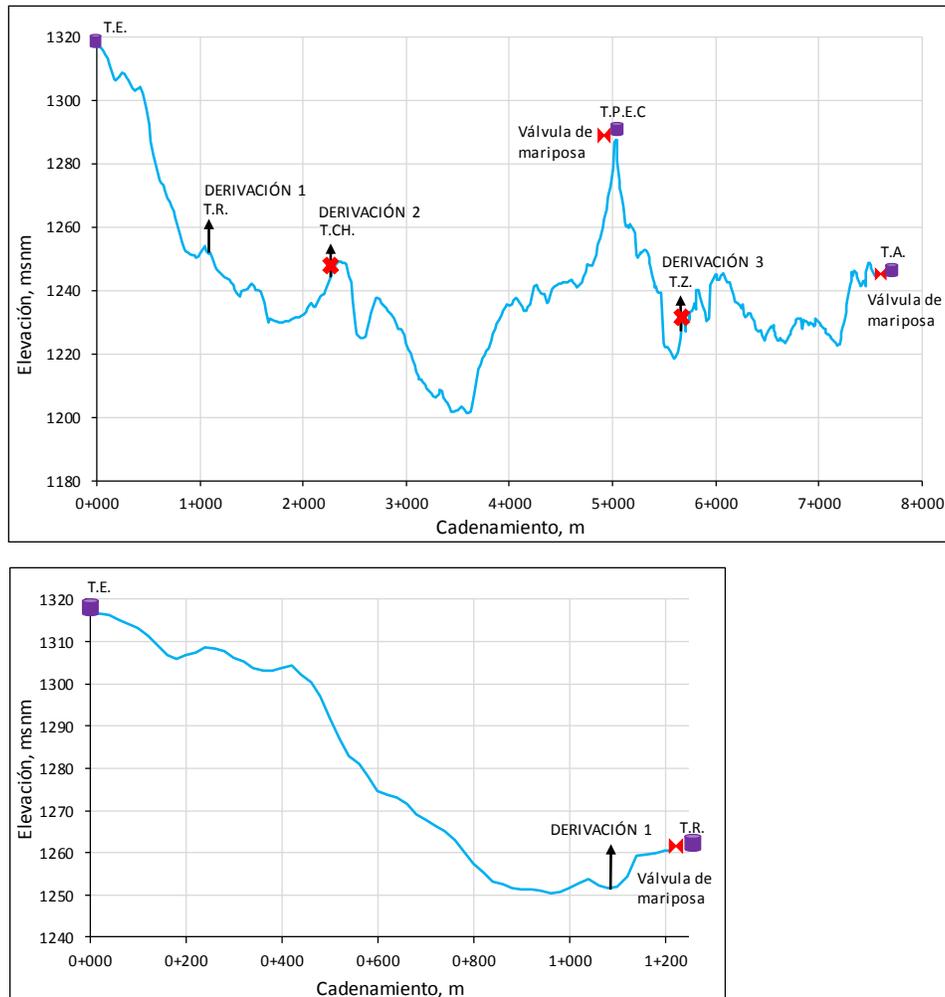


Figura 3.18 Perfiles del tercer caso de simulación.

Cada caso se simuló primero considerando la existencia de las VAEA's que existían instaladas en el conducto hasta el momento de las fallas (2011-2013) y posteriormente se simuló la condición sin estas válvulas.

Además, como una simulación adicional, se probó un tiempo de cierre mayor a 5 segundos, considerando que es un cierre lento.

$$t_c = \frac{2(7544)}{336.64} = 44.82 \text{ s} < \text{se simuló } 1\text{min, cierre lento} \quad (42)$$

$$t_c = \frac{2L}{a} = \frac{2(1210)}{336.64} = 7.2 \text{ s} < \text{se simuló } 1\text{min, cierre lento} \quad (43)$$

En el caso de estas últimas simulaciones, el tiempo de simulación considerado fue de 600 segundos (10 min), igual que para las simulaciones previas y también se consideró que el instante en el que inicia la maniobra es a los 50 segundos iniciada la simulación.

En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos así como su análisis.



4 RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

Introducción

Después de realizar las simulaciones de los transitorios con el programa TRANS (ver capítulo anterior), las cargas máximas obtenidas se compararon con la resistencia de la tubería y las cargas mínimas con la topografía del terreno, con el fin de revisar que no se presenten sobrepresiones y subpresiones que pudieran dañar elementos o la misma tubería. Los diferentes casos arrojaron los resultados que se observarán y analizarán en este capítulo.

4.1 Análisis estático

Inicialmente, se realizó un análisis de las líneas piezométricas y cargas estáticas en el acueducto Conejos-Médanos considerando que las válvulas que permiten el flujo de agua hacia los tanques Chihuahua y Zihuatanejo están cerradas. Para este análisis se consideró el gasto de diseño (1.075 m³/s) y se muestran los resultados en las Figuras 4.1 a 4.4.

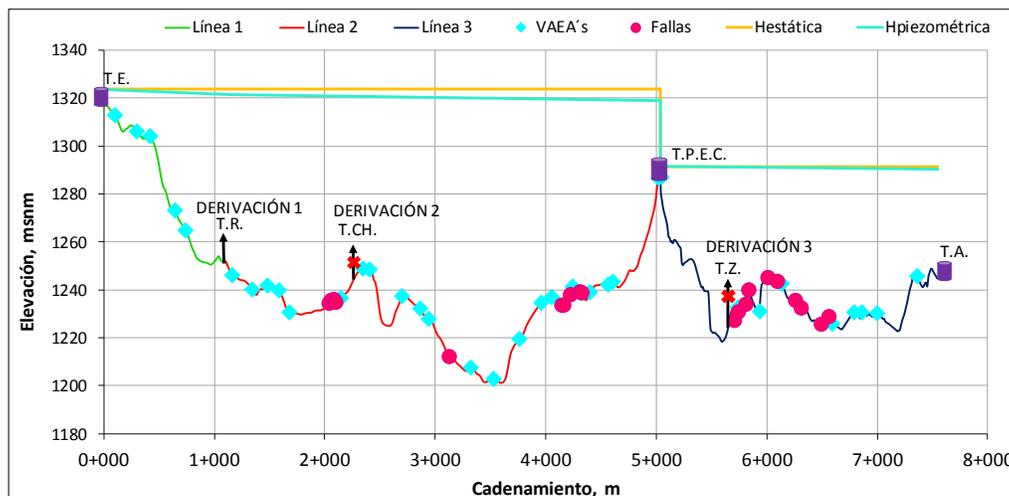


Figura 4.1 Análisis del acueducto Conejos-Médanos en flujo establecido.

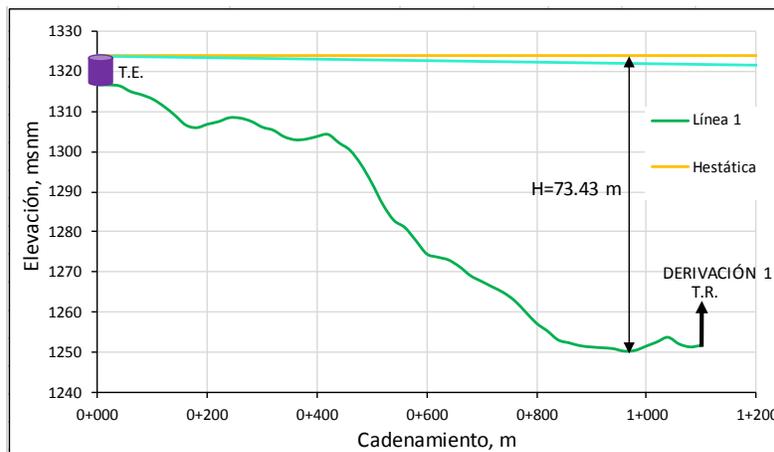


Figura 4.2 Análisis de la carga estática en la línea 1. H indica el valor máximo de la carga estática desde el nivel del agua en el tanque hasta el punto con menor cota.

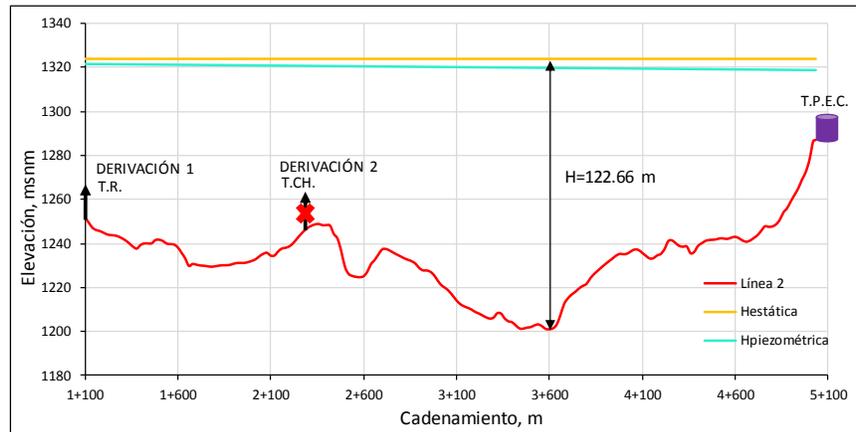


Figura 4.3 Análisis de la carga estática en la línea 2. H indica el valor máximo de la carga estática desde el nivel del agua en el tanque hasta el punto con menor cota.

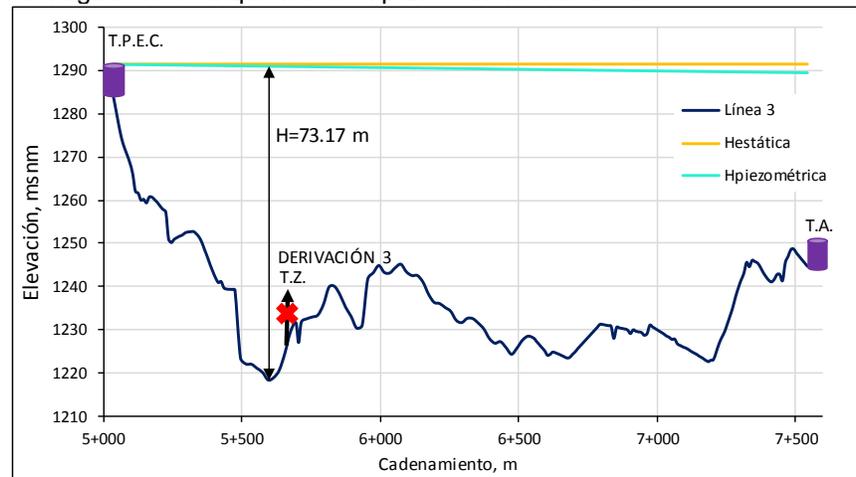


Figura 4.4 Análisis de la carga estática en la línea 3. H indica el valor máximo de la carga estática desde el nivel del agua en el tanque hasta el punto con menor cota.

De acuerdo con el manual de la AWWA C905 la presión nominal de la tubería de PVC con un RD25 es de 165 psi (116 m.c.a.), se observó en el análisis estático (Tabla 4.1) que esta presión se ve ligeramente rebasada en el caso de la línea 2 ($H=122.66$ m), mientras que en el caso de las líneas 1 y 3 ($H=73.43$ m y $H=73$ m respectivamente) no se ven afectadas. En el caso de las pruebas de estallamiento (535 psi, 376 m.c.a.) e hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.) marcadas por la norma de la AWWA C905 a la tubería de PVC RD25 (Tabla 4.2), se observa que las tres líneas en el análisis estático no rebasan las presiones indicadas por las pruebas de estallamiento e hidrostática.

Tabla 4.1 Resumen de las cargas máximas en el análisis estático.

Tramo	Cargas máximas [m]
Línea 1	73.43
Línea 2	122.66
Línea 3	73



Tabla 4.2 Presiones de pruebas de la AWWA C905 a la tubería PVC RD25.

	Prueba	Presión	
		psi	m.c.a.
AWWA C905 Tubería PVC RD25	Presión nominal	165	116
	Prueba de estallamiento a corto plazo	535	376
	Prueba hidrostática	330	232

En el caso de la prueba hidrostática solicitada por CONAGUA (ver libro 12- Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable y la NOM-001-CONAGUA-2011-Sistemas de agua potable, toma domiciliaria alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba), que indica que la presión de la prueba será 1.5 veces la presión de trabajo, considerando este factor de seguridad, la tubería de las líneas 1 y 3 cumple en el análisis estático con esta presión, mientras que la línea 2 no lo cumple.

4.2 Resultados y Análisis de los transitorios rápidos

Después de realizar las simulaciones del cierre total, cierre parcial, apertura total y apertura parcial de válvulas de mariposa en el acueducto Conejos-Médanos para el gasto de diseño de 1.075 m³/s y los gastos 1.62 m³/s y 0.542 m³/s, se obtuvieron los siguientes resultados para las maniobras rápidas en un tiempo de maniobra de 5 segundos.

4.2.1 Simulación del tramo de los Tanques de Entrega al Tanque Renovación (T.E.-T.R.)

En el tramo de los Tanques de Entrega al Tanque Renovación (T.E.-T.R.) se obtuvieron los siguientes resultados para los tres gastos elegidos.

4.2.1.1 Simulaciones para el gasto 1.075 m³/s

La Tabla 4.3 y las Figuras 4.5 a 4.12 presentan los resultados de las simulaciones cuando se considera que pasa por la conducción un gasto de 1.075 m³/s.

Tabla 4.3 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]			
	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
1.075	130.9	114.6	73.4	72.6
Gasto (m ³ /s)	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]			
	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
1.075	130.9	114.6	73.4	72.6

En los valores expresados en la Tabla 4.3 se observa que las cargas máximas más desfavorables son iguales para todas las maniobras simuladas con y sin VAEA's en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s, esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto.

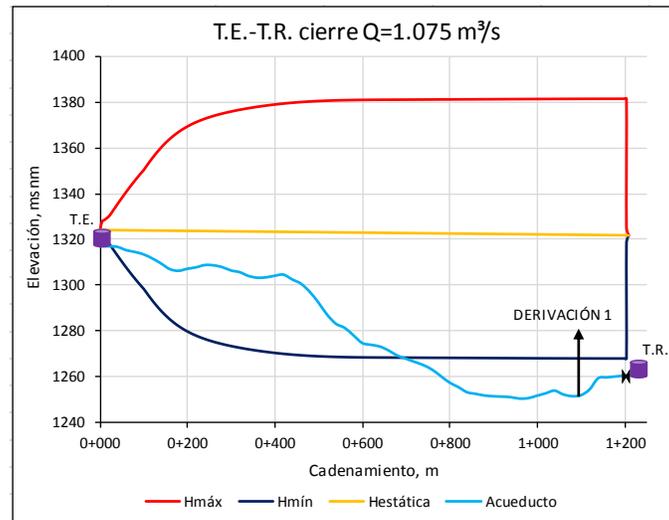


Figura 4.5 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

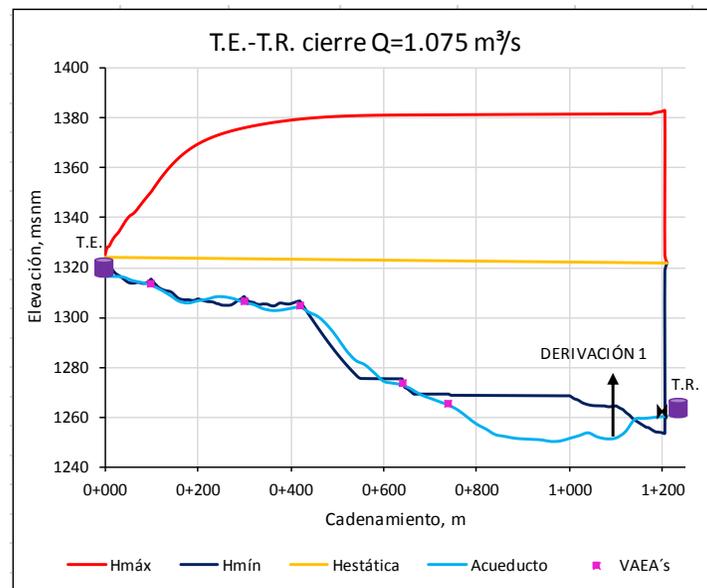


Figura 4.6 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

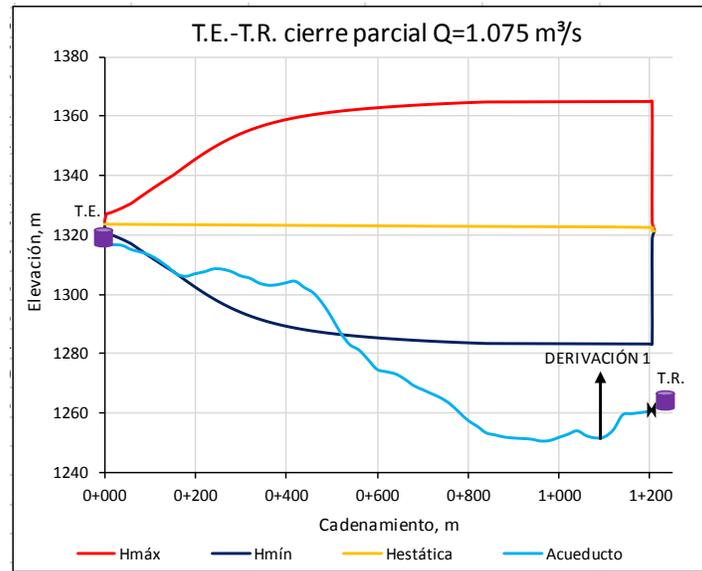


Figura 4.7 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m³/s.

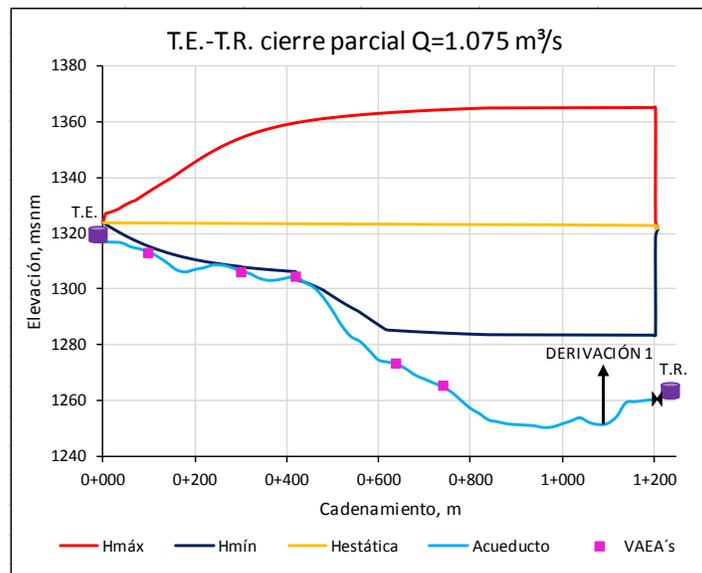


Figura 4.8 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 1.075 m³/s.

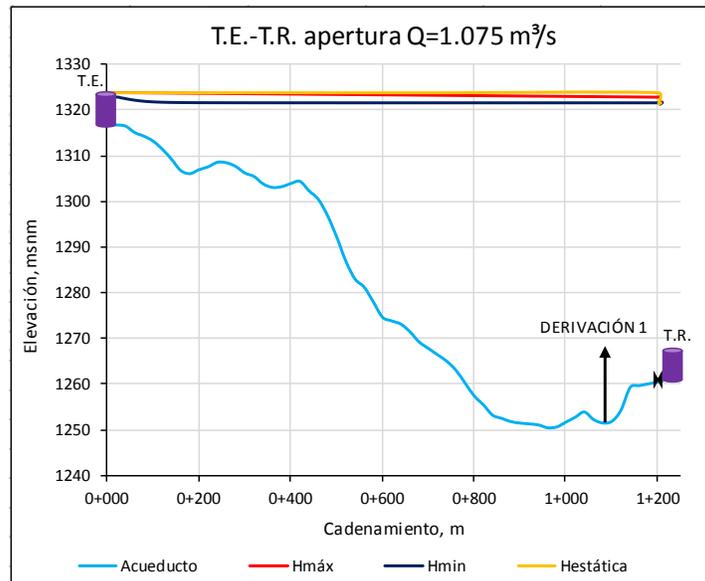


Figura 4.9 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

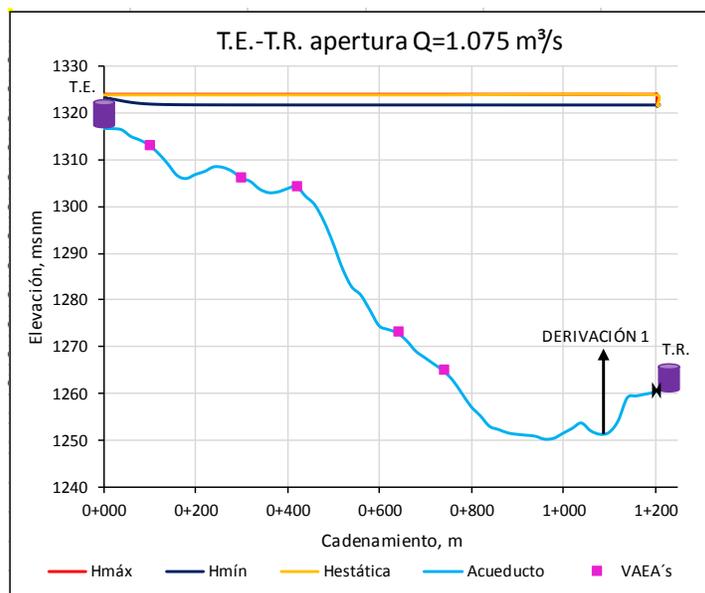


Figura 4.10 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

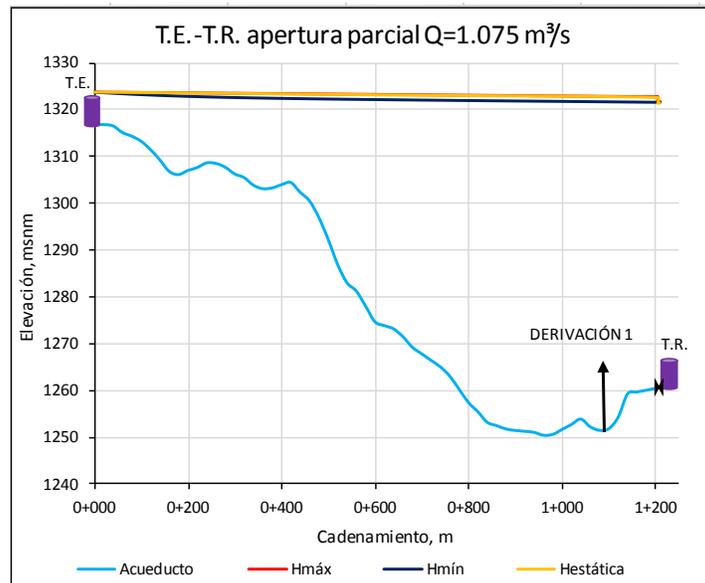


Figura 4.11 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

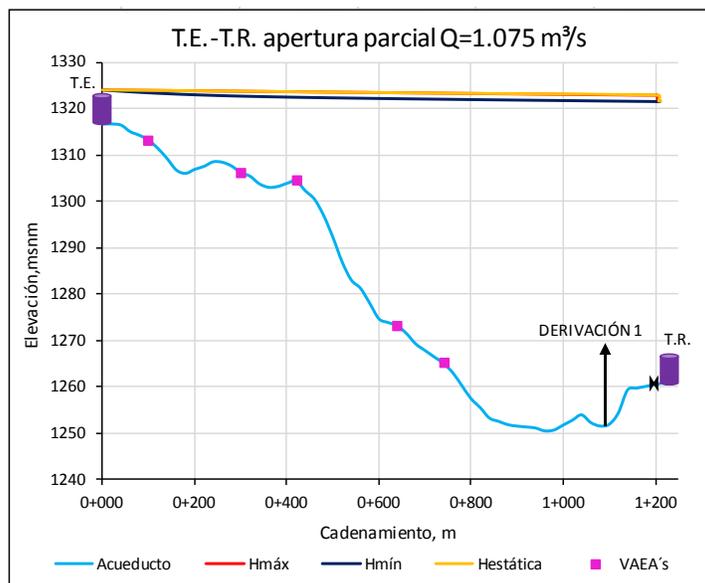


Figura 4.12 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con los resultados expresados en las figuras anteriores para el gasto de $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$, se observa que existe una mayor afectación si no se consideran las válvulas de aire a lo largo de la conducción; en el caso de la maniobra de cierre total se observan cargas mayores en comparación a las otras maniobras debido a que es la maniobra más desfavorable; la maniobra de cierre parcial disminuye el impacto de las presiones transitorias sobre la conducción; en la zona afectada por depresiones importantes observadas únicamente en las maniobras sin VAEA's de cierre total (entre los cadenamientos 0+040 y 0+700 m) y cierre parcial (entre los cadenamientos 0+180 y 0+520 m) se observa que deberán funcionar las VAEA's (Figuras 4.5 y 4.7), por lo que las Figuras 4.6 y 4.8 muestran cómo operan las tres primeras VAEA's. Por otra parte, las maniobras de apertura total y



apertura parcial no presentan un problema en la operación de la conducción. Debido a que no van a trabajar las VAEA's, las Figuras 4.9 y 4.10 son muy parecidas, y las Figuras 4.11 y 4.12 son prácticamente iguales. Además, en el caso de las maniobras de apertura total y apertura parcial no se ve una gran variación de las cargas máximas y mínimas con respecto a la carga estática.

La presión máxima registrada en cada maniobra para el gasto 1.075 m³/s en comparación con la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo con la AWWAC905 (165 psi, 116 m.c.a.) están por debajo de ésta, a excepción de la obtenida al simular la maniobra de cierre total. En el caso de la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.) y la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.) de acuerdo con la AWWAC905, todas las maniobras simuladas con el gasto 1.075 m³/s no sobrepasan las presiones de estas pruebas.

4.2.1.2 Simulaciones para el gasto 1.62 m³/s

La Tabla 4.4 y las Figuras 4.13 a 4.20 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.62 m³/s.

Tabla 4.4 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]			
	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
1.620	159.3	134.9	73.4	71.4

Gasto (m ³ /s)	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]			
	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
1.620	159.3	134.9	73.4	71.4

En los valores expresados en la Tabla 4.4 se observa que las cargas máximas más desfavorables son iguales para todas las maniobras simuladas con y sin VAEA's en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m³/s, esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto.

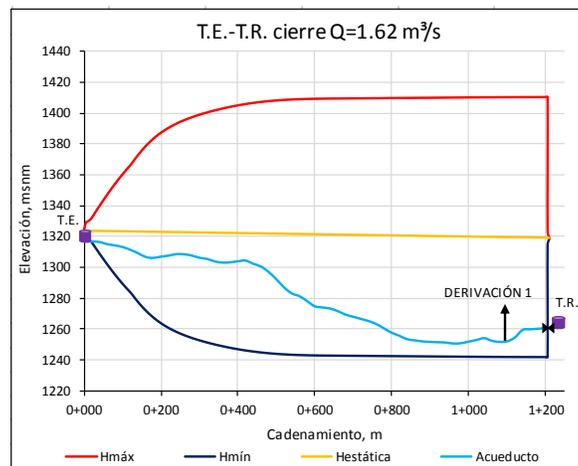


Figura 4.13 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m³/s.

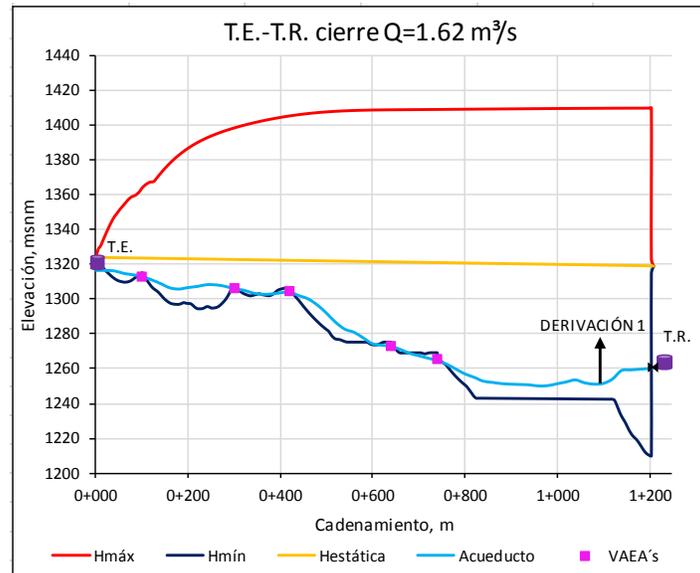


Figura 4.14 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

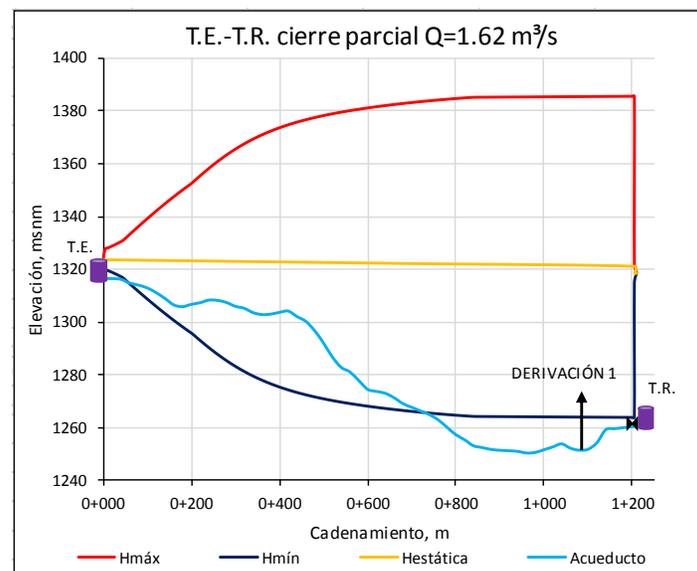


Figura 4.15 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

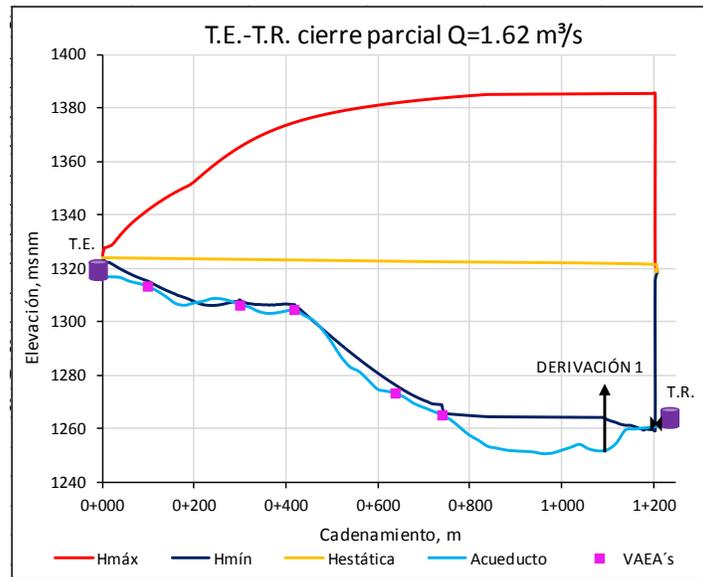


Figura 4.16 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

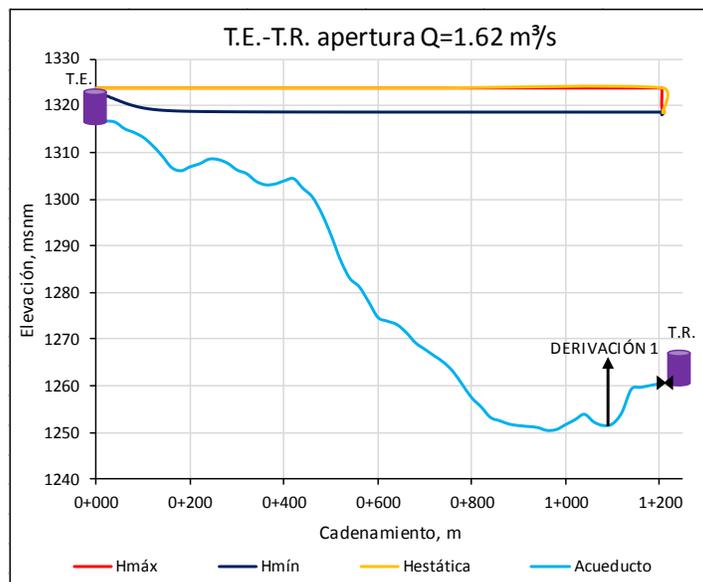


Figura 4.17 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

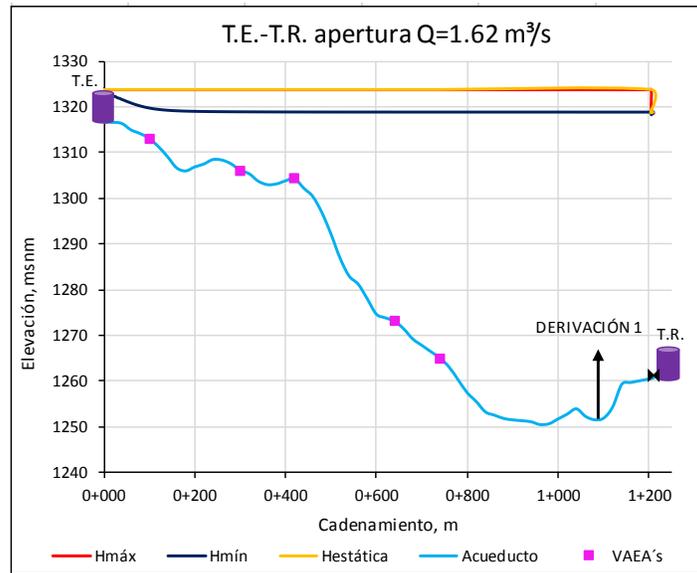


Figura 4.18 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

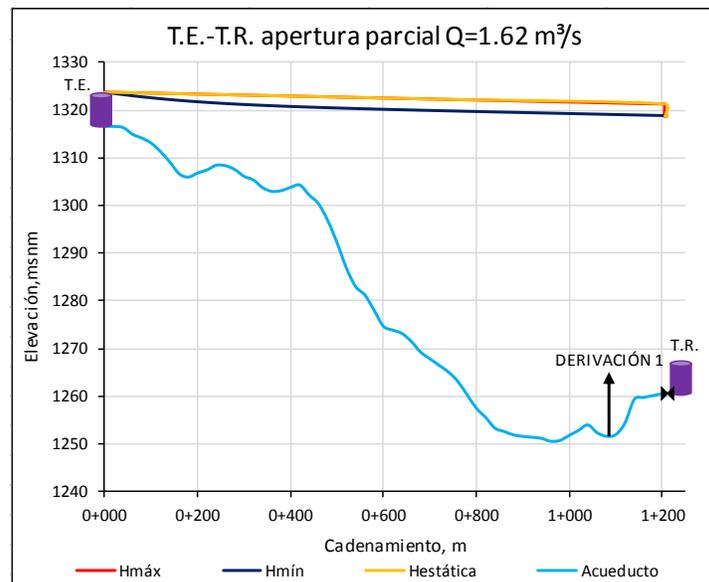


Figura 4.19 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

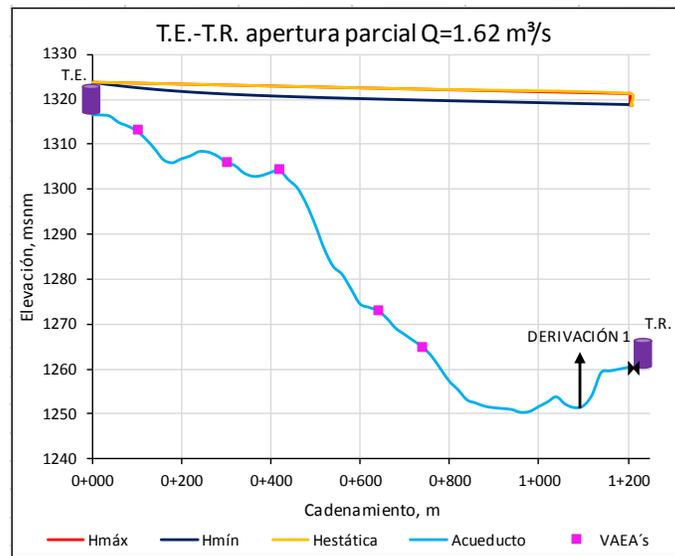


Figura 4.20 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se observa en las figuras anteriores y la Tabla 4.4 para el gasto de $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$, al igual que para las simulaciones con el gasto de $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$, que existe una mayor afectación si no se consideran las válvulas de aire a lo largo de la conducción. En el caso de la maniobra de cierre total se observan presiones mayores en comparación a las otras maniobras por ser la maniobra más desfavorable. Asimismo, se puede observar que la maniobra de cierre parcial disminuye el impacto de las presiones transitorias sobre la conducción. Por otra parte, la conducción se ve afectada por depresiones en las maniobras de cierre total y cierre parcial, es importante mencionar que es posible obtener durante las simulaciones presiones negativas muy grandes, sin embargo, en la realidad la máxima presión negativa que se puede presentar es la presión de vapor de agua al nivel del mar -10.33 m.c.a . En la Figura 4.13 se observa que hay depresiones en todo el tramo de tubería para la maniobra de cierre total, por lo que en este caso trabajarán todas la VAEA's como se muestra en la Figura 4.14, en la cual la línea de cargas máximas tiene una ligera modificación en su forma cercana a los tanques de entrega que indica probable presencia de aire en la tubería. También, en el caso del cierre parcial (Figura 4.15) se observa un tramo con depresiones (entre los cadenamientos $0+060$ y $0+720 \text{ m}$), por lo que se observa en la Figura 4.16 en ese tramo trabajarán las VAEA's.

Analizando la tabla y figuras anteriores, la presión máxima registrada en las maniobras de cierre total y cierre parcial para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$ en comparación con la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo con la AWWA C905 (165 psi , 116 m.c.a.) está por arriba de ésta. Por otra parte, en el caso de la maniobra de apertura parcial no se ve una gran variación de las cargas máximas y mínimas con respecto a la carga estática, y en el caso de la maniobra de apertura total se ve una ligera separación de la línea de cargas mínimas con respecto a la carga estática. Las maniobras de apertura total y apertura parcial no presentan un problema en la operación de la conducción. Debido a que no trabajan las VAEA's, las Figuras 4.17 y 4.18 se ven iguales, lo mismo pasa con las Figuras 4.19 y 4.20. En el caso de la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi , 376 m.c.a.) y la presión de la prueba hidrostática (330 psi , 232 m.c.a.) de acuerdo con la AWWA C905, todas las maniobras simuladas con el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$ no sobrepasan las presiones de estas pruebas.

4.2.1.3 Simulaciones para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$

La Tabla 4.5 y las Figuras 4.21 a 4.28 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.



Tabla 4.5 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]			
	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
0.542	102.7	94.0	73.4	73.2

Gasto (m ³ /s)	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]			
	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
0.542	109.6	94.0	73.4	73.2

En los valores expresados en la Tabla 4.5 se observa que las cargas máximas más desfavorables en el tramo T.E.-T.R. tanto para las simulaciones con y sin VAEA's para el gasto 0.542 m³/s son iguales casi en todas las maniobras a excepción del cierre total, esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto.

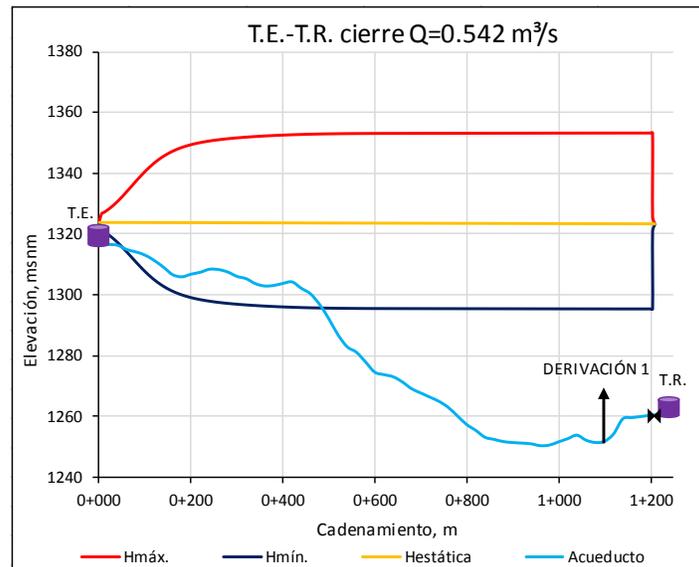


Figura 4.21 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m³/s.

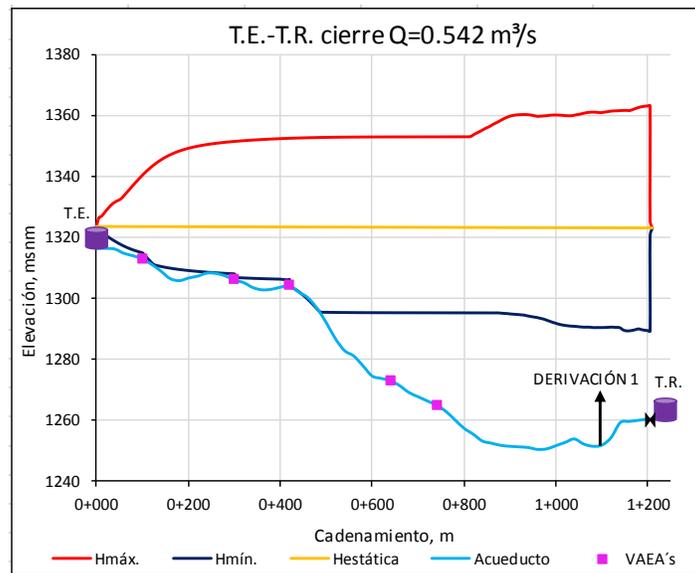


Figura 4.22 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m³/s.

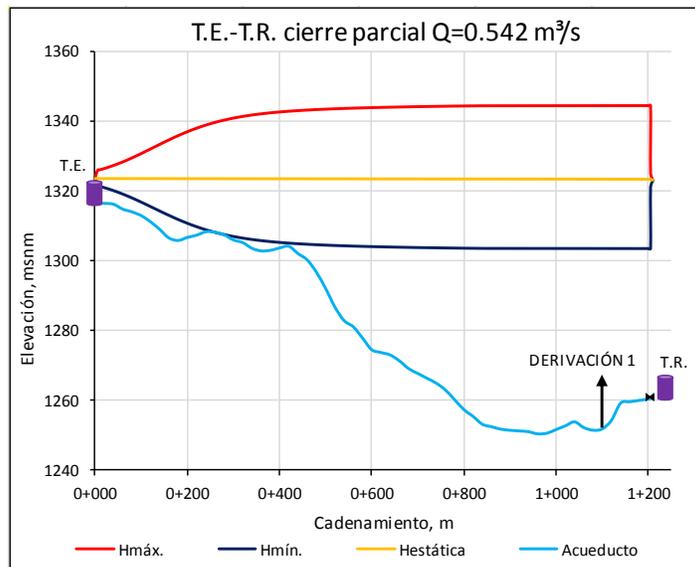


Figura 4.23 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m³/s.

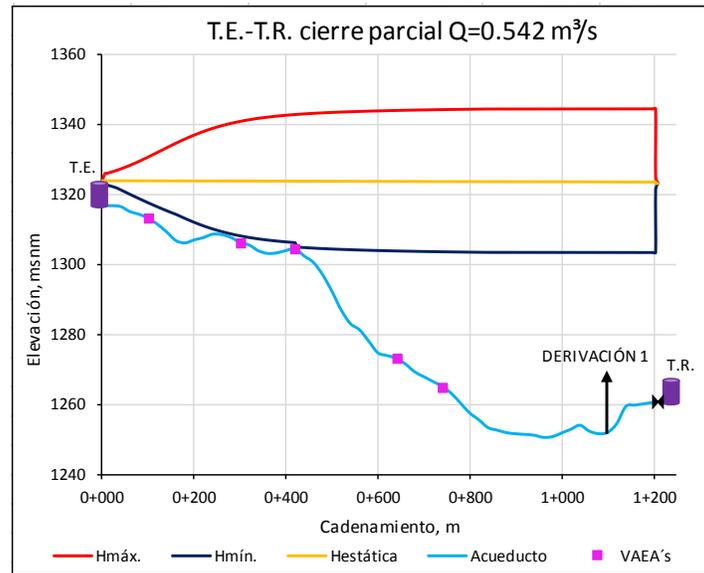


Figura 4.24 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.

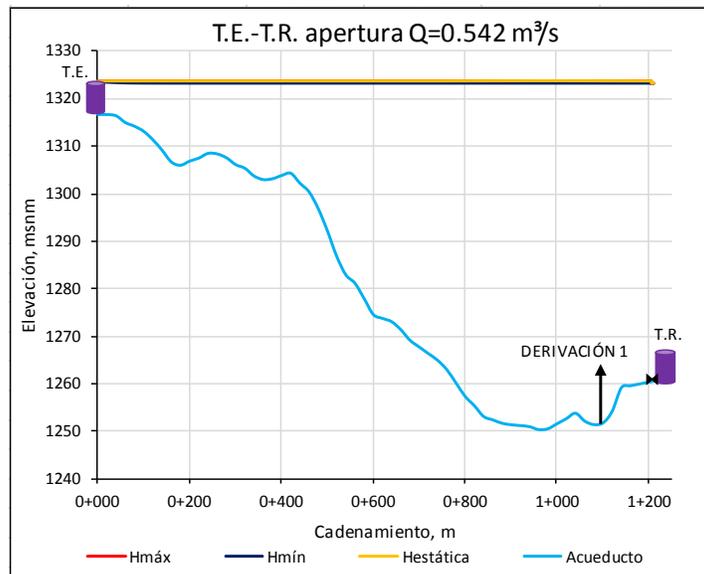


Figura 4.25 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.

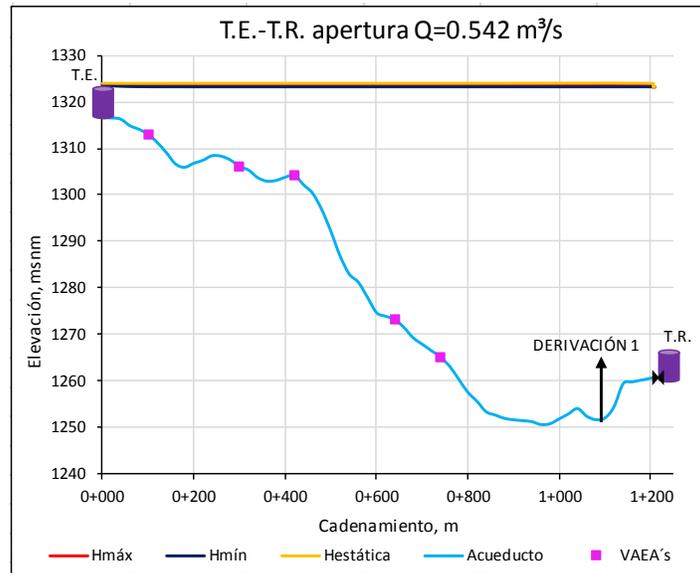


Figura 4.26 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m³/s.

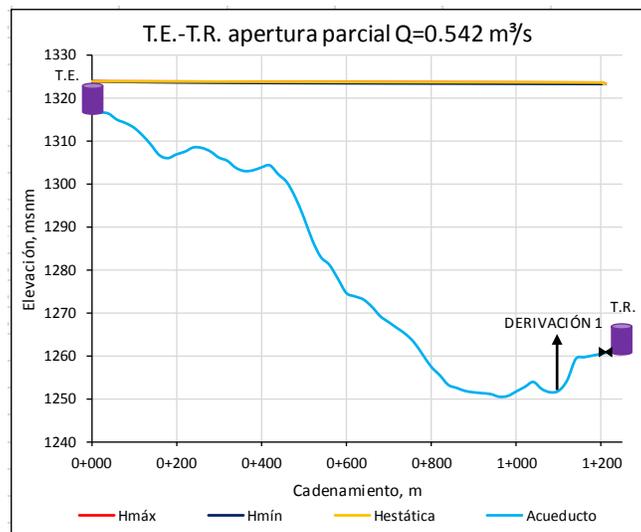


Figura 4.27 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m³/s.

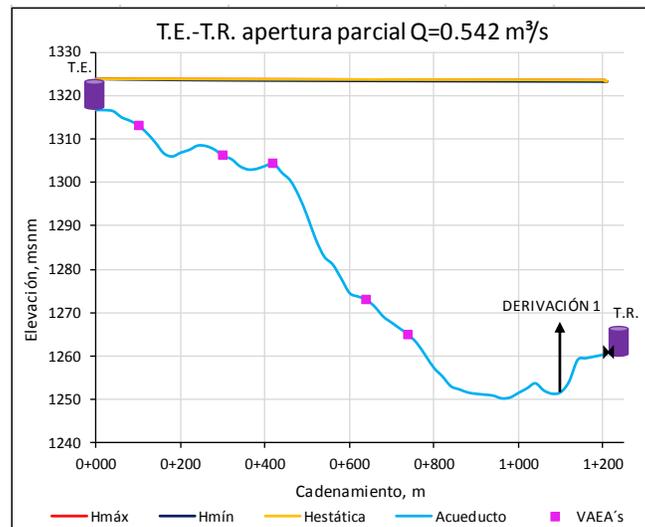


Figura 4.28 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial de la válvula antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto 0.542 m³/s.

Al igual que para las simulaciones con los gastos de 1.075 m³/s y 1.62 m³/s, se observa en las figuras anteriores y en la Tabla 4.5 que para el gasto de 0.542 m³/s, existe una mayor afectación si no se consideran las válvulas de aire a lo largo de la conducción. En el caso de la maniobra de cierre total se observan presiones mayores en comparación a las otras maniobras, pero menores en comparación con las presiones máximas obtenidas para los gastos de 1.075 m³/s y 1.62 m³/s. Lo anterior se debe a la ecuación de Joukowski (Ecuación 44), la cual permite una aproximación de la magnitud de la sobrepresión que se ejercerá en el momento que se produce el transitorio (Cisneros, 2015). Debido a que en este caso el material es el mismo en todo el tramo al igual que el diámetro de la tubería, la magnitud de la sobrepresión máxima depende de la velocidad del fluido, la cual a su vez depende del gasto ya que a mayor gasto mayor velocidad. Esta ecuación es igualmente válida para sobrepresiones y subpresiones (Ecuación 45).

$$\Delta H = -\frac{a}{g}\Delta V \quad (44)$$

$$\Delta H = |-\Delta H| \quad (45)$$

Donde:

ΔH : sobrepresión máxima, m

a: celeridad de la onda de presión, m/s

g: constante de la aceleración de la gravedad, m/s²

ΔV : variación de la velocidad causado por la sobrepresión, m/s

Además, en la maniobra de cierre total entre la válvula de mariposa considerada y el cadenamiento 0+815 m se observa una modificación en la forma de la línea de carga máxima, lo cual podría indicar probable presencia de aire en la tubería (Figura 4.22). Por otra parte, en el único caso donde se presentan depresiones es en la maniobra de cierre total sin considerar las VAEA's (entre los cadenamientos 0+080 y 0+500 m), por lo que en la Figura 4.22 se observa que trabajarán las tres primeras VAEA's. La maniobra de cierre parcial disminuye el impacto de las presiones transitorias sobre la conducción. En el caso de las maniobras de apertura parcial y apertura total no se ve una



variación de las cargas máximas y mínimas con respecto a la carga estática, estas maniobras no presentan un problema en la operación de la conducción. Debido a que no trabajan las VAEA's, las Figuras 4.27 y 4.28 se ven iguales, lo mismo pasa con las Figuras 4.25 y 4.26.

Para el gasto de 0.542 m³/s en comparación con la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo con la norma AWWA C905 (165 psi, 116 m.c.a.), la presión máxima registrada en todas las maniobras simuladas está por debajo de la presión nominal. En el caso de la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.) y la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.) de acuerdo con la norma AWWA C905, todas las maniobras simuladas con el gasto de 0.542 m³/s no sobrepasan las presiones de estas pruebas.

En la línea 1 no se presentaron fallas como se mencionó anteriormente. Además, en todos los casos las simulaciones de las maniobras de apertura total y apertura parcial, con y sin VAEA's, se comportaron de manera similar al análisis estático.

4.2.2 Simulaciones de los tramos de los Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.) y del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.)

En el tramo de los Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.) y del tramo del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.) se obtuvieron los siguientes resultados para los tres gastos elegidos.

4.2.2.1 Simulaciones para el gasto 1.075 m³/s

Las Tablas 4.6 y 4.7 y las Figuras 4.29 a 4.36 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.075 m³/s.

Tabla 4.6 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]			
		cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
1.075	T.E.-T.P.E.C.	179.0	173.3	122.7	117.4
	T.P.E.C.-T.A.	132.0	119.8	76.2	75.5

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]			
		cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
1.075	T.E.-T.P.E.C.	179.0	173.3	122.7	117.4
	T.P.E.C.-T.A.	141.2	119.8	76.2	75.5

En los valores expresados en la Tabla 4.6 se observa que las cargas máximas más desfavorables en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. tanto para las simulaciones con y sin VAEA's para el gasto 1.075 m³/s son iguales casi en todas las maniobras a excepción del cierre total, esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto.



Tabla 4.7 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]				Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]			
		Cadenamiento	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial	cierre total	cierre parcial	apertura total
T.E.-T.P.E.C.	2+040	144.4	139.0	89.4	86.5	144.4	139.0	89.4	86.5
	2+060	143.3	137.9	88.4	85.4	143.3	137.9	88.4	85.4
	2+080	142.8	137.4	87.8	84.8	142.8	137.4	87.8	84.8
	2+100	144.1	138.7	89.1	86.1	144.1	138.7	89.1	86.1
	3+125	167.8	162.2	111.9	107.3	167.8	162.2	111.9	107.3
	4+150	147.3	141.5	90.5	84.4	147.3	141.5	90.5	84.4
	4+160	147.2	141.4	90.4	84.3	147.2	141.4	90.4	84.3
	4+220	145.3	139.5	88.4	82.2	145.3	139.5	88.4	82.2
	4+310	141.9	136.0	84.9	78.6	141.9	136.0	84.9	78.6
	4+330	142.1	136.2	85.0	78.7	142.1	136.2	85.0	78.7
T.P.E.C.-T.A.	5+710	126.9	107.7	62.9	62.1	118.8	107.7	62.9	62.1
	5+745	126.1	107.2	62.0	61.1	118.0	107.2	62.0	61.1
	5+810	124.7	106.4	60.6	59.6	116.6	106.4	60.6	59.6
	5+842	118.9	100.6	54.5	53.5	110.6	100.6	54.5	53.5
	6+010	113.8	96.1	49.6	48.4	106.0	96.1	49.6	48.4
	6+094	113.6	95.9	49.3	48.0	105.7	95.9	49.3	48.0
	6+262	124.5	106.9	60.3	58.7	116.9	106.9	60.3	58.7
	6+312	127.0	109.6	62.9	61.3	119.7	109.6	62.9	61.3
	6+494	134.7	117.1	70.2	68.4	127.2	117.1	70.2	68.4
	6+560	130.3	113.4	66.5	64.6	123.5	113.4	66.5	64.6

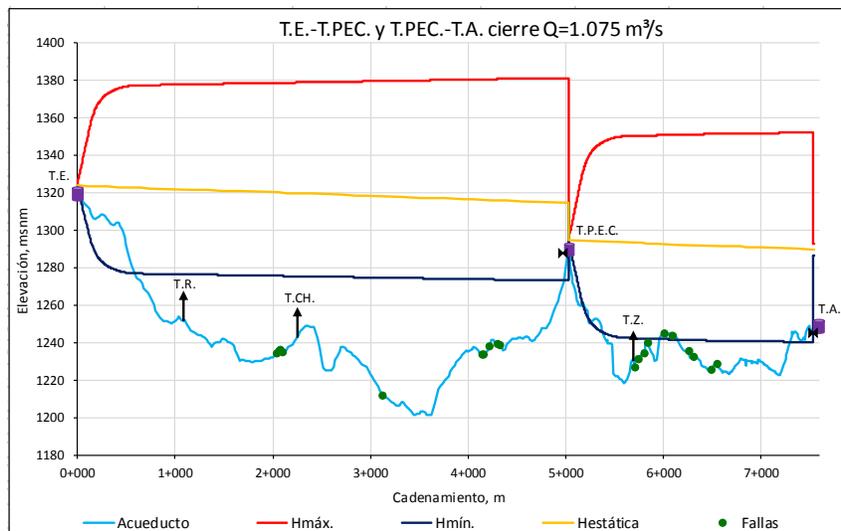


Figura 4.29 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

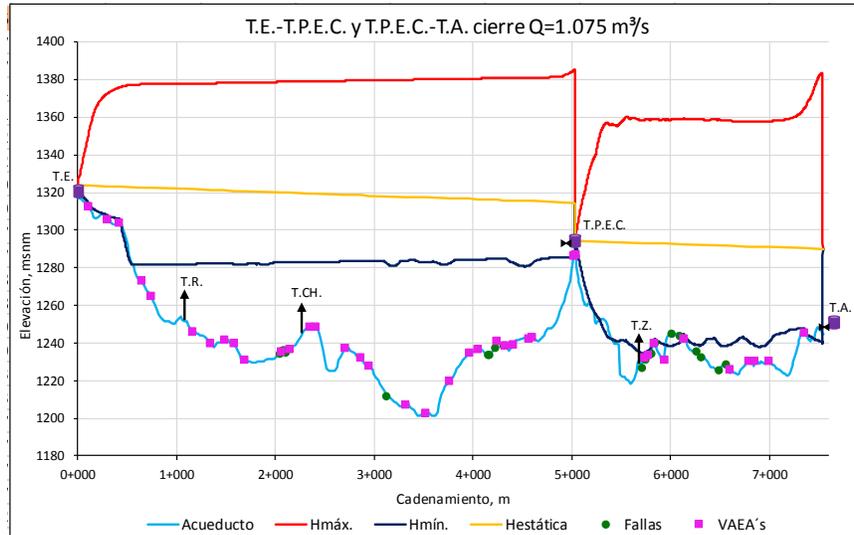


Figura 4.30 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

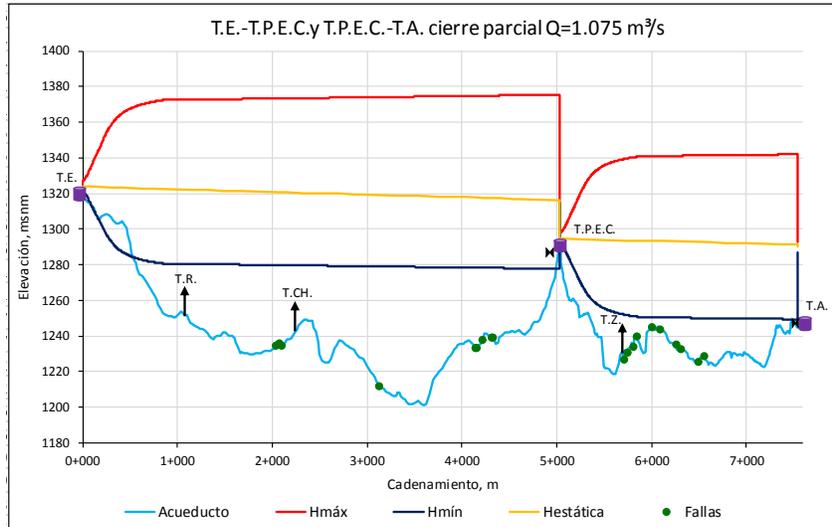


Figura 4.31 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

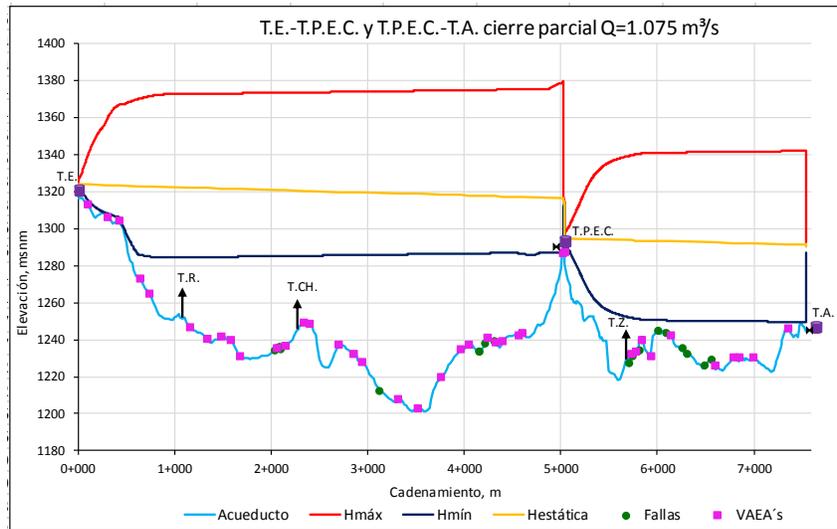


Figura 4.32 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

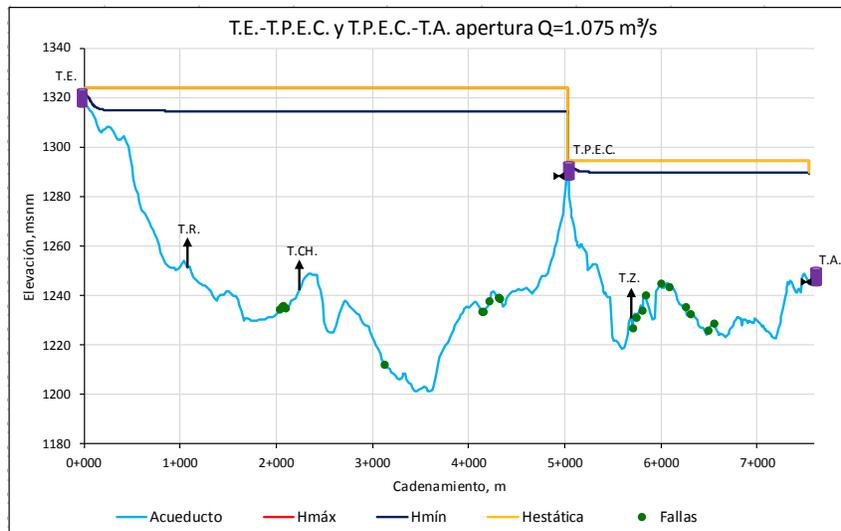


Figura 4.33 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

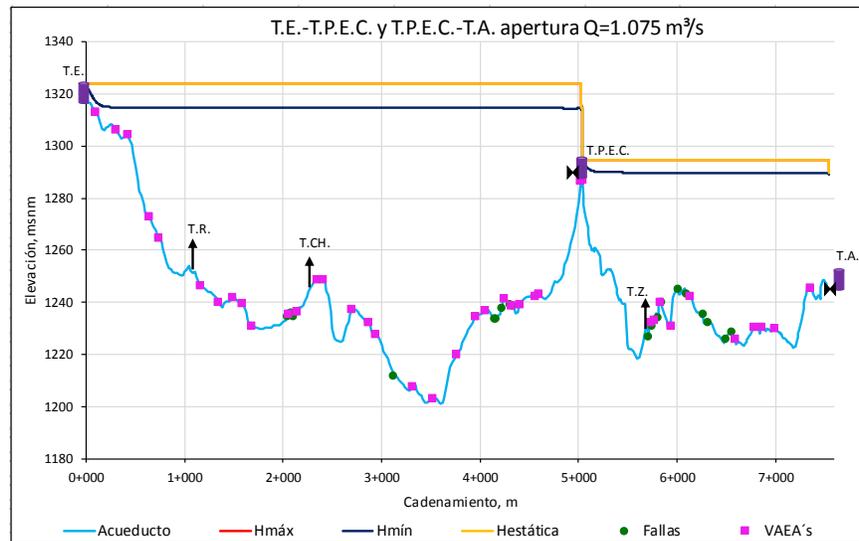


Figura 4.34 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

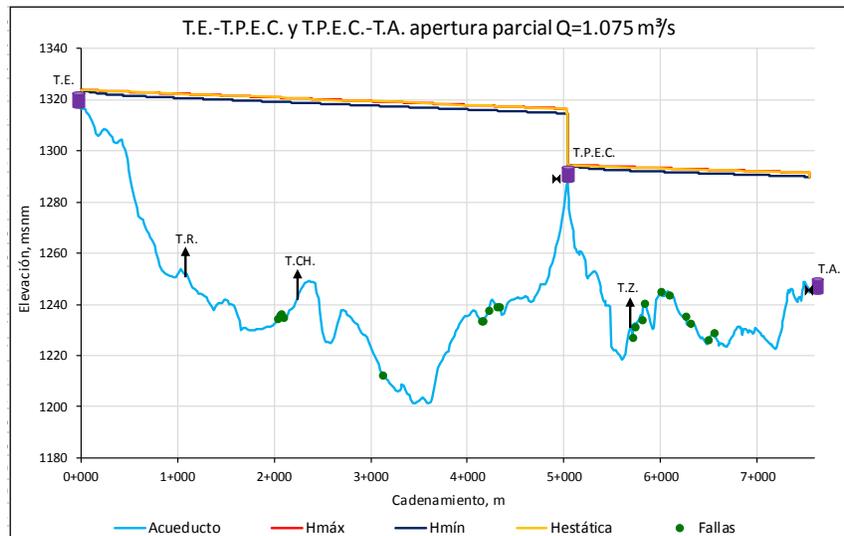


Figura 4.35 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

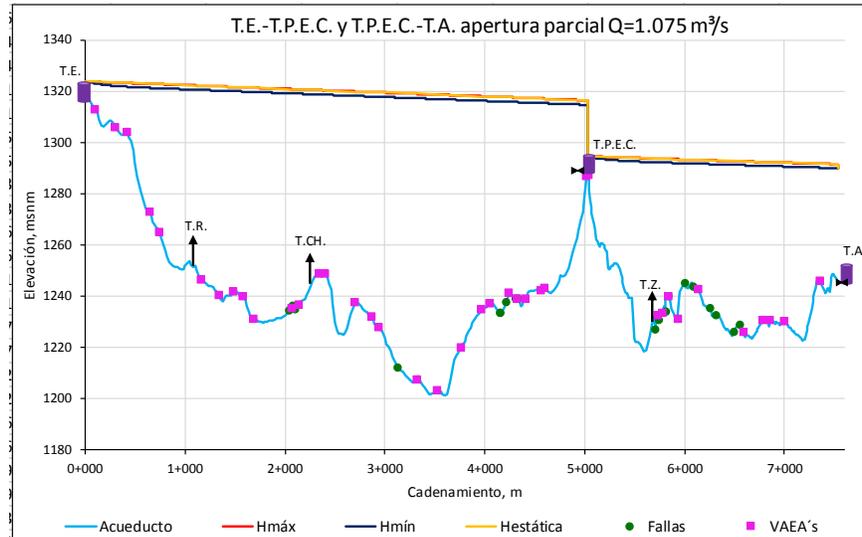


Figura 4.36 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

En el caso de la maniobra de cierre total simultáneo de las válvulas antes de los T.P.E.C. y T.A., como se observa en la Figura 4.29, el tramo crítico sin considerar VAEA's es afectado por depresiones que ocurren entre los cadenamientos 0+050 y 0+575 m, por lo que en la Figura 4.30 se observa cómo trabajan las VAEA's ubicadas entre esos cadenamientos. Las presiones máximas más desfavorables en las maniobras de cierre parcial y cierre total en ambos tramos, T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A., sobrepasan la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo a la norma AWWA C905 de 116 m.c.a. (165 psi), pero no sobrepasan la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.), ni la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.). Además, en las simulaciones con VAEA's de las maniobras de cierre total y cierre parcial en el tramo T.E.-T.P.E.C. se observa un pico en la línea de cargas máximas por donde se consideró la válvula de mariposa (Figuras 4.30 y 4.32), lo cual indica probable presencia de aire en la tubería, lo mismo se observa en el tramo T.P.E.C.-T.A. en la maniobra de cierre total, además del pico se observa una modificación en la forma de la línea de cargas máximas al inicio de ese tramo (Figura 4.30). En el caso de la maniobra de apertura parcial no se ve una gran variación de las cargas máximas y mínimas con respecto a la carga estática, mientras que en la apertura total la línea de cargas mínimas tiene una ligera separación de la línea de carga estática; estas maniobras no presentan un problema en la operación de la conducción. Debido a que no trabajan las VAEA's, las Figuras 4.33 y 4.34 se ven iguales, lo mismo pasa con las Figuras 4.35 y 4.36.

En la Tabla 4.7 que presenta los puntos donde se dieron las fallas en la conducción, se observa que para este gasto en las maniobras de cierre total y cierre parcial, tanto en el caso con y sin considerar las VAEA's, la mayoría de las presiones máximas en los puntos de las fallas sobrepasan la presión nominal, principalmente en el cierre total, pero no sobrepasan la presión de las pruebas de estallamiento ni la hidrostática. Otro aspecto interesante es que considerando las VAEA's en los puntos de las fallas se presentan mayores presiones en el tramo T.P.E.C.-T.A. para la maniobra de cierre total simultáneo, lo cual puede deberse a que ya había aire en la tubería que se estaba comprimiendo lo cual hace que aumente la presión.

4.2.2.2 Simulaciones para el gasto 1.62 m³/s

Las Tablas 4.8 y 4.9 y las Figuras 4.37 a 4.44 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.62 m³/s.



Tabla 4.8 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.62 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]			
		cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
1.620	T.E.-T.P.E.C.	206.0	198.2	122.7	110.7
	T.P.E.C.-T.A.	158.3	142.8	76.2	74.7

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]			
		cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
1.620	T.E.-T.P.E.C.	206.0	198.2	122.7	110.7
	T.P.E.C.-T.A.	160.2	147.9	76.2	74.7

En los valores expresados en la Tabla 4.8 se observa que las cargas máximas más desfavorables en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. tanto para las simulaciones con y sin VAEA's para el gasto 1.62 m³/s son iguales a excepción del cierre total y cierre parcial en el tramo T.P.E.C.-T.A., esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto. En el caso del cierre total y cierre parcial en el tramo T.P.E.C.-T.A. hay un aumento en la carga máxima al considerar las VAEA's lo cual podría deberse a que ya hay aire en la tubería que se está comprimiendo.

Tabla 4.9 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.62 m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas Cadenamiento	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]				Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]			
		cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
T.E.-T.P.E.C.	2+040	169.5	162.4	89.6	82.6	169.5	162.4	89.4	82.6
	2+060	168.5	161.3	88.5	81.4	168.5	161.3	88.4	81.4
	2+080	168.0	160.9	88.0	80.9	168.0	160.9	87.8	80.9
	2+100	169.3	162.2	89.2	82.1	169.3	162.2	89.1	82.1
	3+125	194.2	186.6	111.9	101.4	194.2	186.6	111.9	101.4
	4+150	174.9	166.9	90.5	76.5	174.9	166.9	90.5	76.5
	4+160	174.8	166.8	90.4	76.4	174.8	166.8	90.4	76.4
	4+220	172.9	164.9	88.4	74.2	172.9	164.9	88.4	74.2
	4+310	169.6	161.6	84.9	70.4	169.6	161.6	84.9	70.4
	4+330	169.8	161.8	85.0	70.5	169.8	161.8	85.0	70.5
T.P.E.C.-T.A.	5+710	145.3	128.7	62.9	61.0	145.3	128.7	62.9	61.0
	5+745	144.5	128.6	62.0	60.0	144.5	128.6	62.0	60.0
	5+810	143.3	128.4	60.5	58.4	143.3	128.4	60.5	58.4
	5+842	137.3	122.9	54.5	52.2	137.3	122.9	54.5	52.2
	6+010	132.8	118.8	49.6	46.9	132.8	118.8	49.6	46.9
	6+094	132.7	118.6	49.3	46.4	132.7	118.6	49.3	46.4
	6+262	144.1	129.8	60.2	56.8	144.1	129.8	60.2	56.8
	6+312	147.0	132.5	62.9	59.3	147.0	132.5	62.9	59.3
	6+494	154.6	140.2	70.2	66.2	154.6	140.2	70.2	66.2
	6+560	150.9	136.6	66.5	62.2	150.9	136.6	66.5	62.2

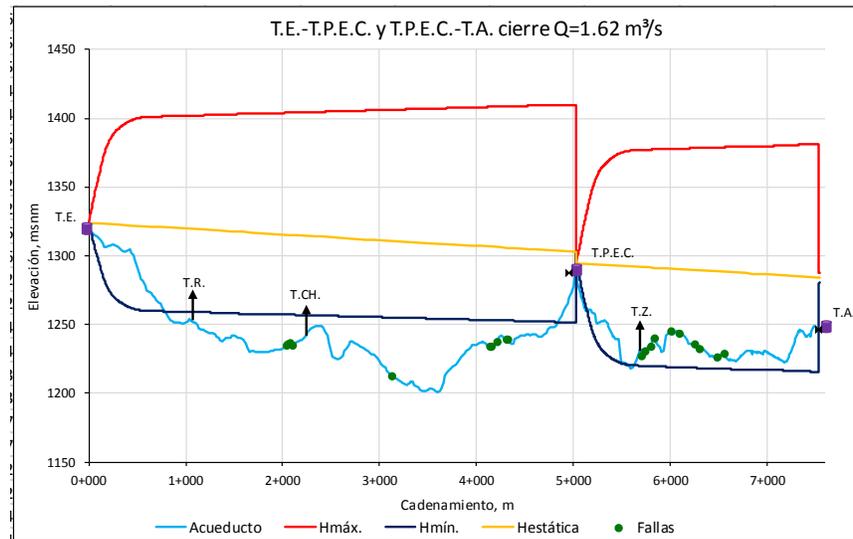


Figura 4.37 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

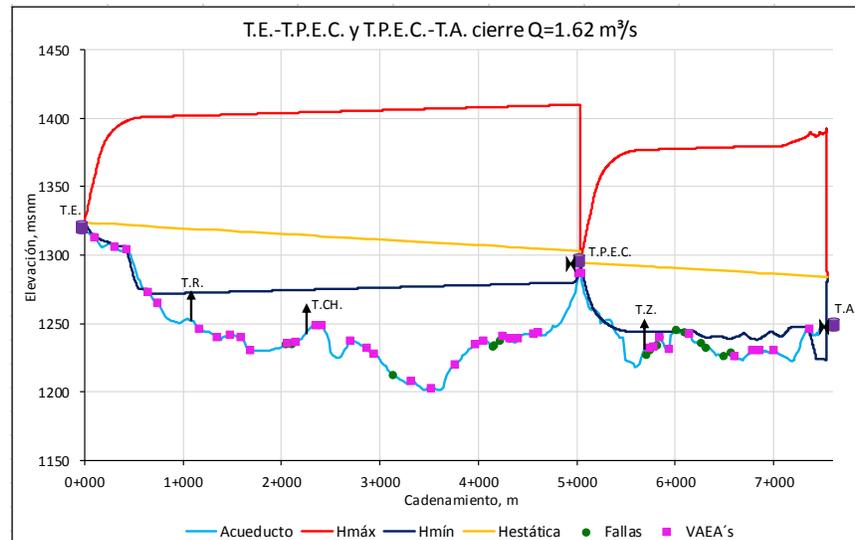


Figura 4.38 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

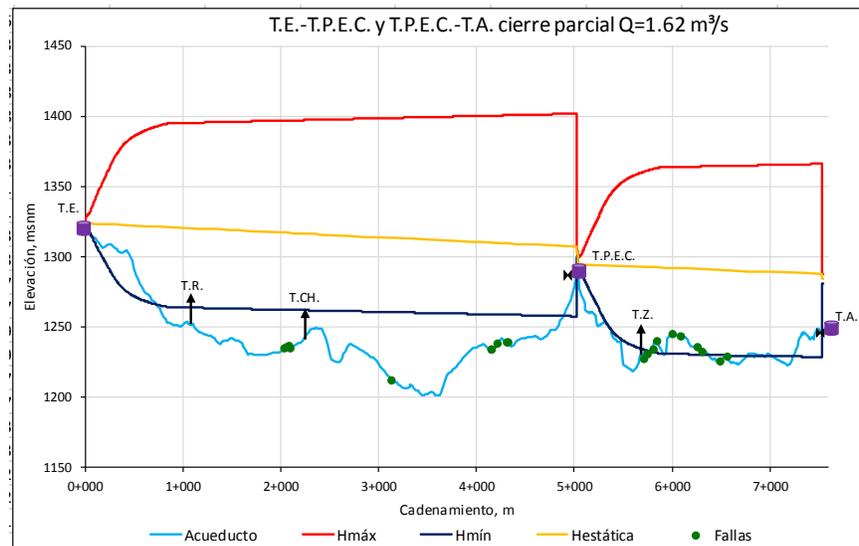


Figura 4.39 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

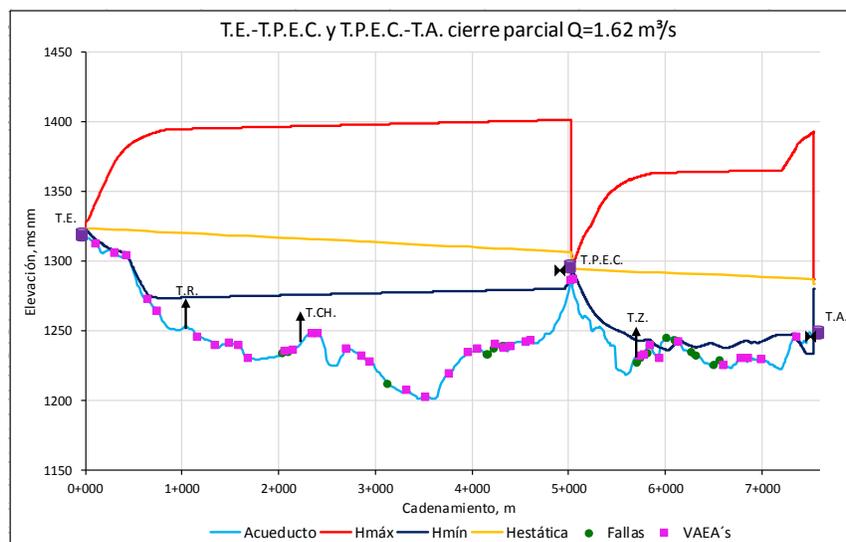


Figura 4.40 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

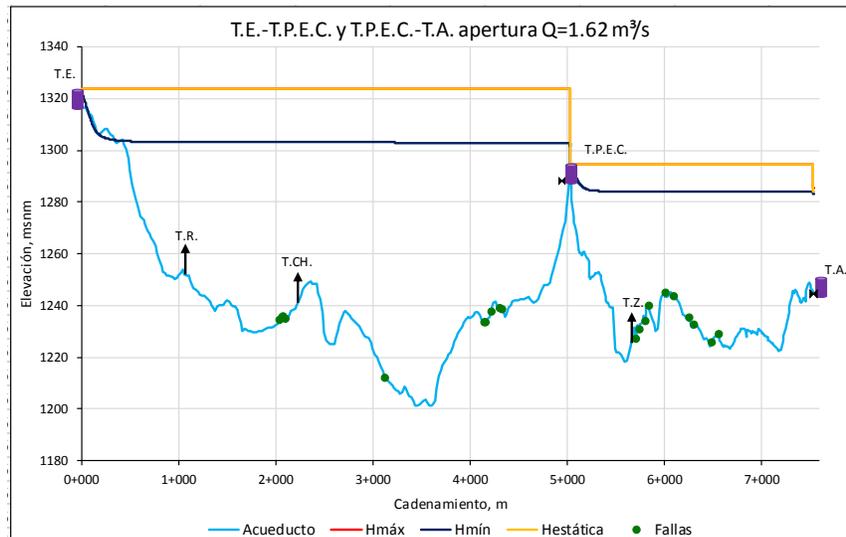


Figura 4.41 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.62 m³/s.

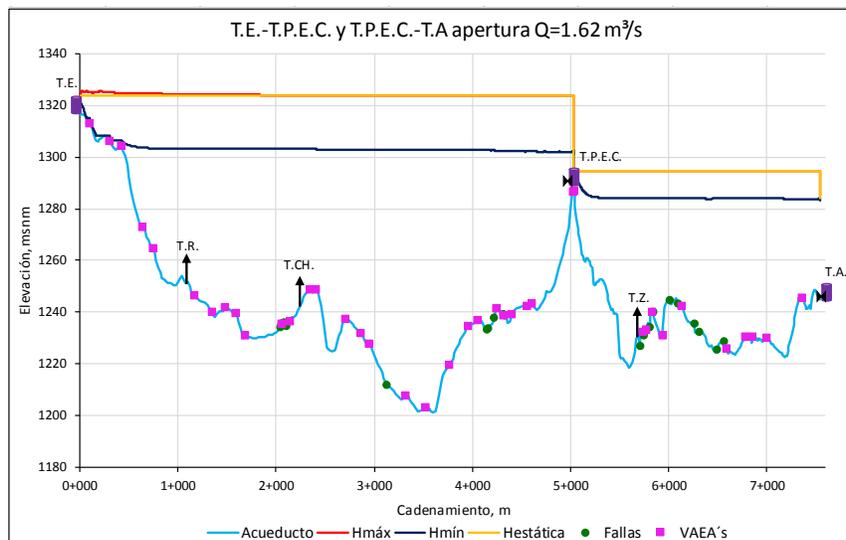


Figura 4.42 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.62 m³/s.

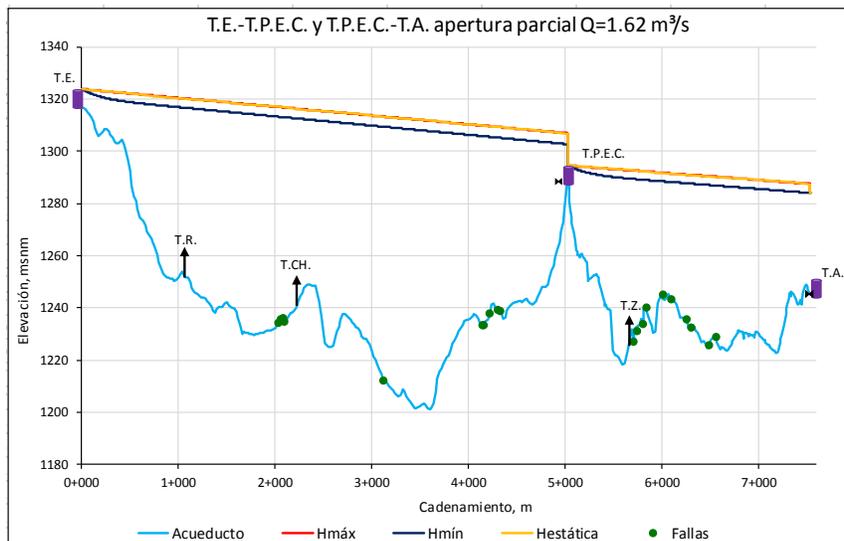


Figura 4.43 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

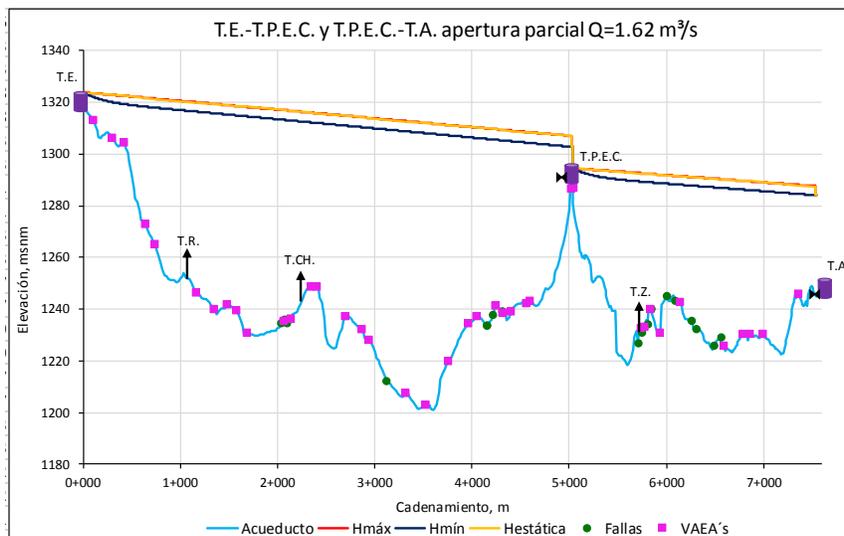


Figura 4.44 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para el gasto de $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$, en el caso de las maniobras de cierre total simultáneo de las válvulas antes de los T.P.E.C. y T.A. sin considerar VAEA's, se ve afectado todo el tramo T.P.E.C.-T.A. por las depresiones (Figura 4.37), por lo que en la Figura 4.38 se observa cómo trabajan las VAEA's en ese tramo, mientras que en el tramo T.E.-T.P.E.C. únicamente trabajarán las VAEA's entre los cadenamientos 0+040 y 0+815 m. Además, en la Figura 4.38 en el tramo T.P.E.C.-T.A. se observa un pico con perturbaciones en la línea de cargas máximas, lo cual indica probable presencia de aire en la tubería. En la maniobra de cierre parcial (Figura 4.40) se observa que en el tramo T.E.-T.P.E.C. únicamente trabajarán las VAEA's entre los cadenamientos 0+040 y 0+765 m y también se observa un pico en la línea de cargas máximas en el tramo T.P.E.C.-T.A. cercano a la ubicación de la válvula de mariposa propuesta, lo cual indica probable presencia de aire en la tubería.



Las presiones máximas en las maniobras de cierre parcial y cierre total en ambos tramos, T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A., son mayores que aquellas obtenidas con el gasto 1.075 m³/s. Lo anterior se debe a la ecuación de Joukowski (Ecuación 44), dado que el material es el mismo en todo el tramo al igual que el diámetro de la tubería, la magnitud de la sobrepresión máxima depende de la velocidad del fluido, la cual a su vez depende del gasto ya que a mayor gasto mayor velocidad. Por otra parte, las presiones máximas más desfavorables en las maniobras de cierre total y cierre parcial en ambos tramos, T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A., sobrepasan la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo a la norma AWWA C905 (165 psi, 116 m.c.a.), pero no sobrepasan la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.), ni la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.). En el caso de la maniobra de apertura total en el tramo T.E.-T.P.E.C. las presiones máximas más desfavorables sobrepasan la presión nominal de la tubería, pero no sobrepasan la presión de la prueba de estallamiento al corto plazo ni la presión de la prueba hidrostática. En el caso de la maniobra de apertura total en el tramo T.E.-T.P.E.C se ve que trabajarán las VAEA's entre los cadenamientos 0+090 y 0+450 m (Figura 4.42). En el caso de la maniobra de apertura parcial no se ve una gran variación de las cargas máximas y mínimas con respecto a la carga estática; esta maniobra no presenta un problema en la operación de la conducción. Debido a que no trabajan las VAEA's, las Figuras 4.43 y 4.44 se ven iguales.

En la Tabla 4.9 donde se presentan los puntos donde se dieron las fallas en la conducción, se observa que para este gasto en las maniobras de cierre total y cierre parcial en todos los cadenamientos donde ocurrieron las fallas, las presiones máximas sobrepasan la presión nominal, pero no sobrepasaron las presiones de las pruebas de estallamiento ni la hidrostática.

4.2.2.3 Simulaciones para el gasto 0.542 m³/s

Las Tablas 4.10 y 4.11 y las Figuras 4.45 a 4.52 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 0.542 m³/s.

Tabla 4.10 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]			
		cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
0.542	T.E.-T.P.E.C.	151.6	148.9	122.7	121.2
	T.P.E.C.-T.A.	104.9	99.4	76.2	76.0
Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]			
		cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
0.542	T.E.-T.P.E.C.	151.8	148.9	122.7	121.2
	T.P.E.C.-T.A.	104.9	99.4	76.2	76.0

En los valores expresados en la Tabla 4.10 se observa que las cargas máximas más desfavorables en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. tanto para las simulaciones con y sin VAEA's para el gasto 0.542 m³/s son iguales, esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto.



Tabla 4.11 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]				Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]			
	Cadenamiento	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial	cierre total	cierre parcial	apertura total	apertura parcial
T.E.-T.P.E.C.	2+040	118.8	115.3	89.4	88.6	118.0	115.3	89.4	88.6
	2+060	117.8	114.2	88.4	87.5	116.9	114.2	88.4	87.5
	2+080	117.2	113.7	87.8	87.0	116.4	113.7	87.8	87.0
	2+100	118.4	115.0	89.1	88.3	117.7	115.0	89.1	88.3
	3+125	141.1	138.0	111.9	110.6	140.7	138.0	111.9	110.6
	4+150	119.5	116.8	90.5	88.7	119.5	116.8	90.5	88.7
	4+160	119.4	116.7	90.4	88.7	119.4	116.7	90.4	88.7
	4+220	117.4	114.7	88.4	86.6	117.4	114.7	88.4	86.6
	4+310	114.0	111.2	84.9	83.1	114.0	111.2	84.9	83.1
	4+330	114.1	111.4	85.0	83.3	114.1	111.4	85.0	83.3
T.P.E.C.-T.A.	5+710	91.6	86.5	62.9	62.6	91.6	86.5	62.9	62.6
	5+745	90.8	85.7	62.0	61.7	90.8	85.7	62.0	61.7
	5+810	89.4	84.4	60.6	60.2	89.4	84.4	60.6	60.2
	5+842	83.3	78.5	54.5	54.2	83.3	78.5	54.5	54.2
	6+010	78.6	73.7	49.6	49.3	78.6	73.7	49.6	49.3
	6+094	78.3	73.5	49.3	48.9	78.3	73.5	49.3	48.9
	6+262	89.3	84.4	60.3	59.8	89.3	84.4	60.3	59.8
	6+312	92.0	87.1	62.9	62.4	92.0	87.1	62.9	62.4
	6+494	99.4	94.5	70.2	69.7	99.4	94.5	70.2	69.7
	6+560	95.7	90.8	66.5	65.9	95.7	90.8	66.5	65.9

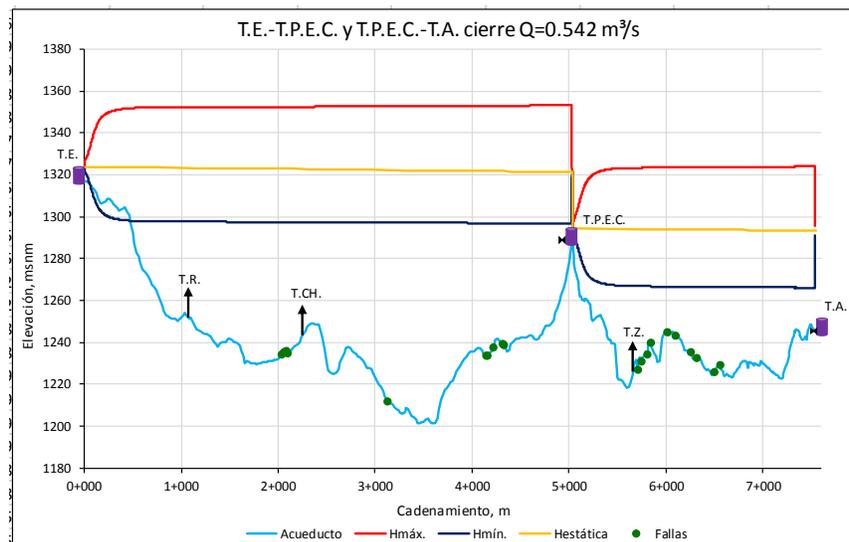


Figura 4.45 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m³/s.

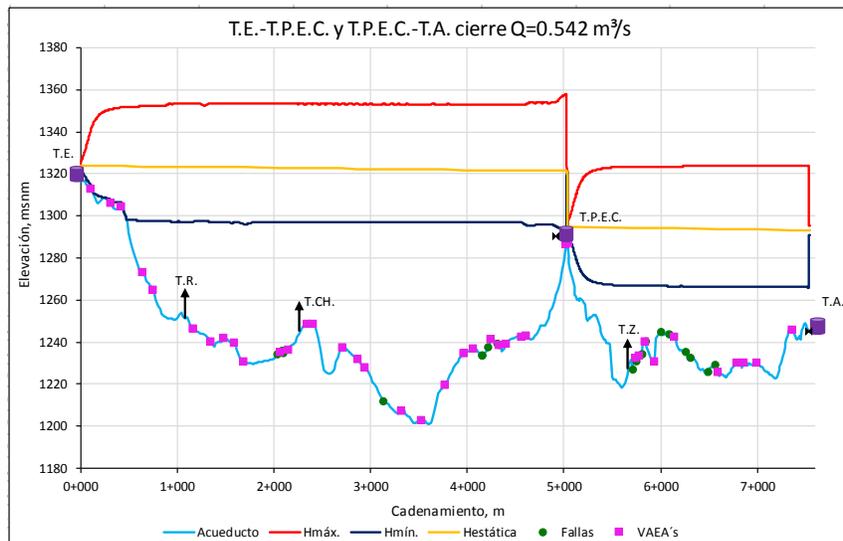


Figura 4.46 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.

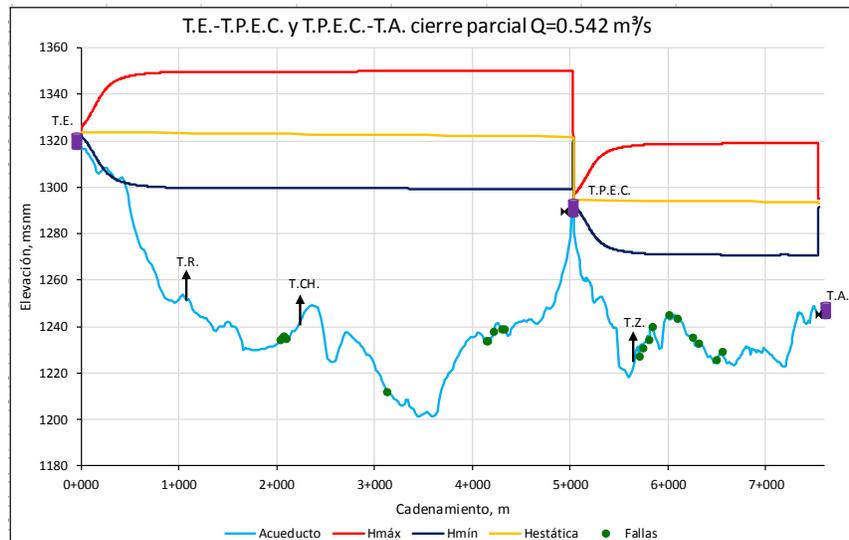


Figura 4.47 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.

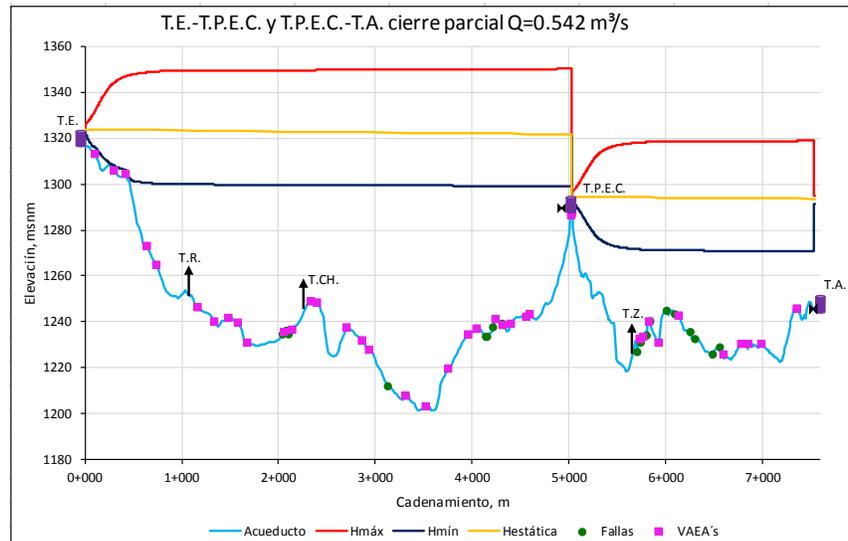


Figura 4.48 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre parcial simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m³/s.

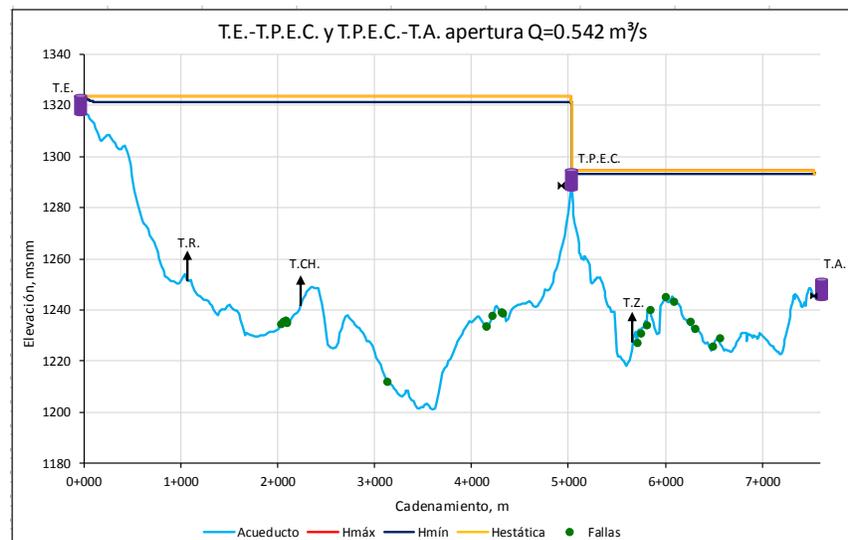


Figura 4.49 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 0.542 m³/s.

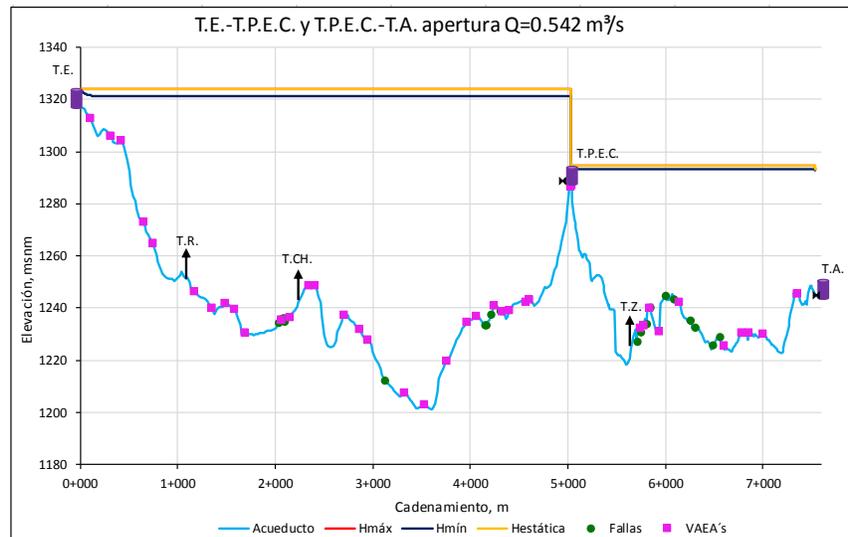


Figura 4.50 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.

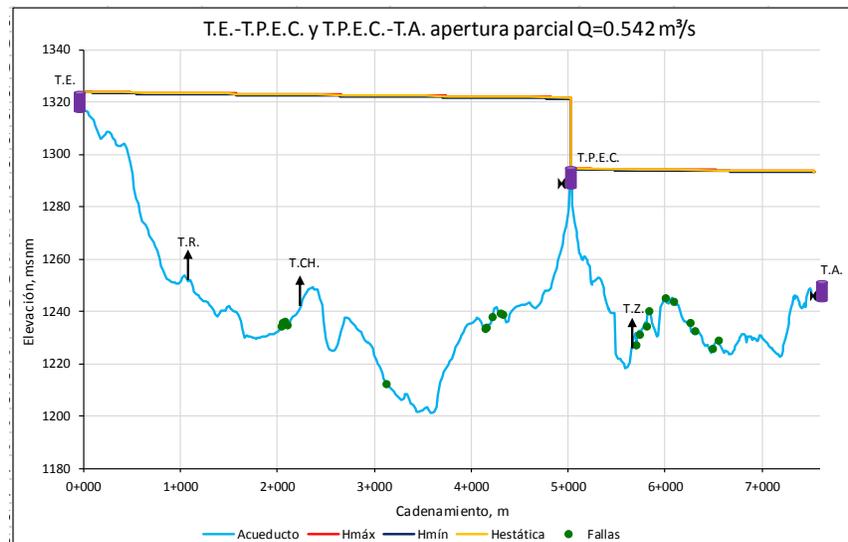


Figura 4.51 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.

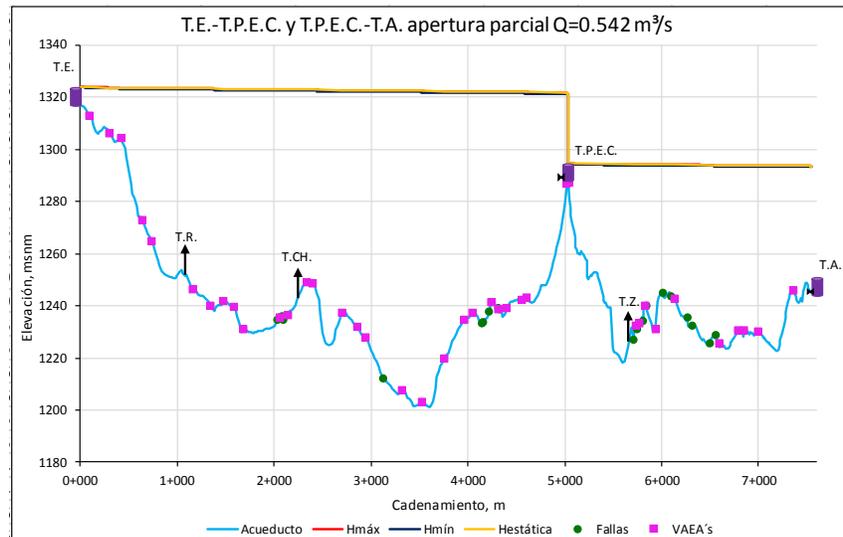


Figura 4.52 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura parcial simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.

En el caso del gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$, para la maniobra de cierre total simultáneo de las válvulas antes de los T.P.E.C. y T.A., se observa que trabajarán las VAEA's entre los cadenamientos 0+060 y 0+480 m (Figura 4.45). Además, en el tramo T.E.-T.P.E.C. (Figura 4.46) se observa una modificación en la forma de la línea de cargas máximas y un pequeño pico donde se consideró la válvula de mariposa, lo cual indica probable presencia de aire en la tubería. En las maniobras de cierre total y cierre parcial en el tramo T.P.E.C.-T.A. no trabajan las VAEA's. Las presiones máximas más desfavorables en las maniobras de cierre parcial y cierre total en el tramo T.E.-T.P.E.C. sobrepasan la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo a la norma AWWA C905 (165 psi, 116 m.c.a.), pero no sobrepasan la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.), ni la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.). En el caso de la maniobra de apertura total no se ve una gran variación de las cargas máximas y mínimas con respecto a la carga estática, y en la maniobra de apertura parcial las cargas máximas y mínimas prácticamente se ven igual a la línea de carga estática; estas maniobras no presentan un problema en la operación de la conducción. Debido a que no trabajan las VAEA's, las Figuras 4.49 y 4.50 se ven iguales, lo mismo pasa con las Figuras 4.51 y 4.52.

Se observa en la Tabla 4.11 donde se presentan los puntos donde se dieron las fallas en la conducción, que para este gasto en las simulaciones de la maniobra de cierre total en el tramo T.E.-T.P.E.C. la mayoría sobrepasan la presión nominal, pero no sobrepasaron las presiones de las pruebas de estallamiento ni la hidrostática. Sin embargo, en el tramo T.P.E.C.-T.A. no se ve sobrepasada la presión nominal.

4.2.3 Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.), del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.) y de T.E. al Tanque Renovación (T.E.-T.R.)

Al simular en conjunto el tramo de los Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.), el tramo del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.) y el tramo de los Tanques de Entrega al Tanque Renovación (T.E.-T.R.) se obtuvieron los siguientes resultados para los tres gastos elegidos. En el caso de estas simulaciones no se simuló el cierre parcial y apertura parcial debido a que no se consiguió calibrar los gastos. Por ello, únicamente se muestran los resultados de las simulaciones de las maniobras de cierre y apertura de las válvulas antes del T.R., T.P.E.C. y T.A. Sin embargo, se simuló el caso más extremo que es el cierre total y el cierre parcial genera un transitorio menos severo como se observó con los resultados anteriores.



4.2.3.1 Simulaciones para el gasto 1.075 m³/s

Las Tablas 4.12 y 4.13 y las Figuras 4.53 a 4.56 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.075 m³/s.

Tabla 4.12 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]	
		cierre total	apertura total
1.075	T.E.-T.P.E.C.	169.7	124.4
	T.P.E.C.-T.A.	111.0	76.2
	T.E.-T.R.	108.9	74.3

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]	
		cierre total	apertura total
1.075	T.E.-T.P.E.C.	169.7	124.4
	T.P.E.C.-T.A.	111.0	76.2
	T.E.-T.R.	110.0	74.3

En los valores expresados en la Tabla 4.12 se observa que las cargas máximas más desfavorables son iguales tanto para las simulaciones con y sin VAEA's a excepción de la maniobra de cierre total en el tramo T.E.-T.R., esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto. En la maniobra de cierre total en el tramo T.E.-T.R. hay un aumento en la carga máxima al considerar las VAEA's lo cual podría deberse a que ya hay aire en la tubería que se está comprimiendo.

Tabla 4.13 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]		Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]	
		cierre total	apertura total	cierre total	apertura total
T.E.-T.P.E.C.	Cadenamiento				
	2+040	130.0	90.7	130.0	90.7
	2+060	129.6	89.7	129.6	89.7
	2+080	129.5	89.3	129.5	89.3
	2+100	131.1	90.6	131.1	90.6
	3+125	158.0	113.0	158.0	113.0
	4+150	146.2	91.0	146.2	91.0
	4+160	146.2	90.9	146.2	90.9
	4+220	144.5	88.9	144.5	88.9
	4+310	141.3	85.3	141.3	85.3
	4+330	141.5	85.5	141.5	85.5
	5+710	97.7	62.9	97.7	62.9
	5+745	96.9	62.0	96.9	62.0
	5+810	95.5	60.6	95.5	60.6
5+842	89.4	54.5	89.4	54.5	
T.P.E.C.-T.A.	6+010	84.7	49.6	84.7	49.6
	6+094	84.4	49.3	84.4	49.3
	6+262	95.4	60.3	95.4	60.3
	6+312	98.2	62.9	98.2	62.9
	6+494	105.6	70.2	105.6	70.2
	6+560	101.9	66.5	101.9	66.5

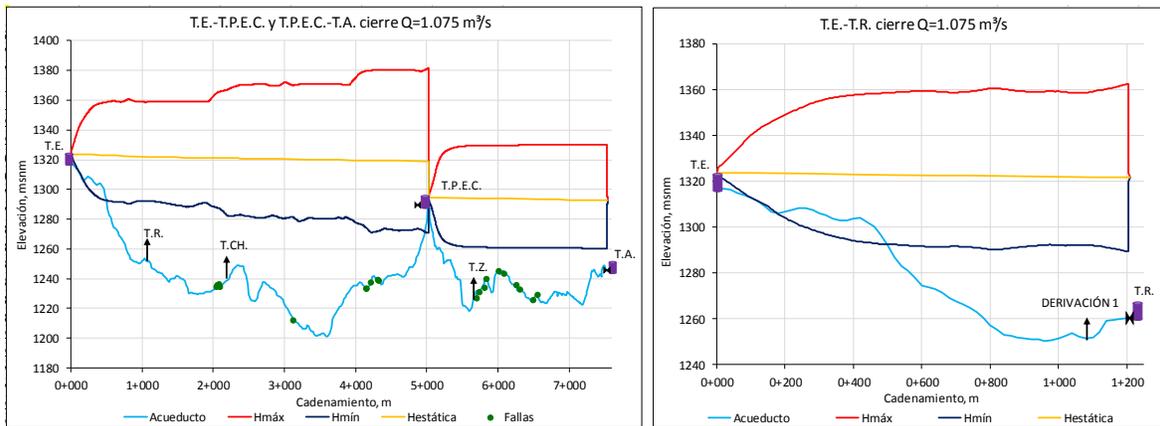


Figura 4.53 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

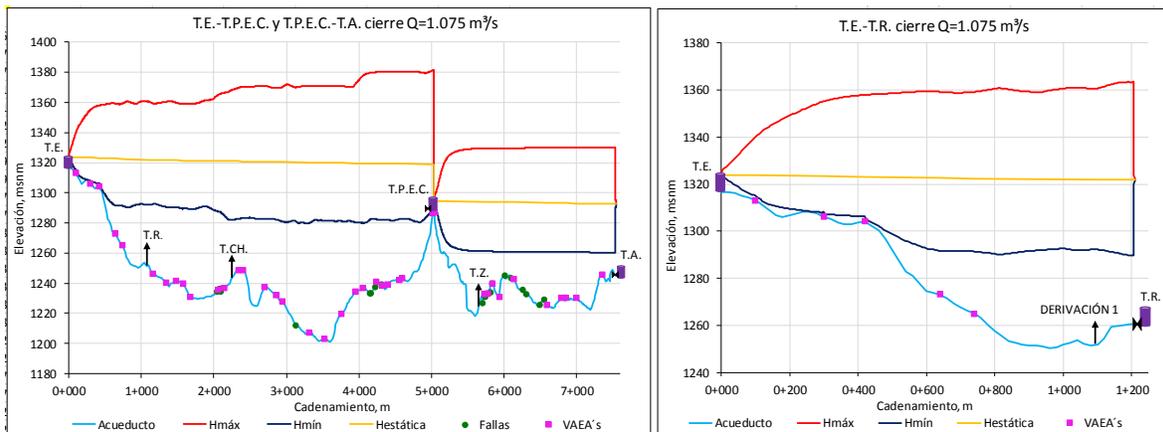


Figura 4.54 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

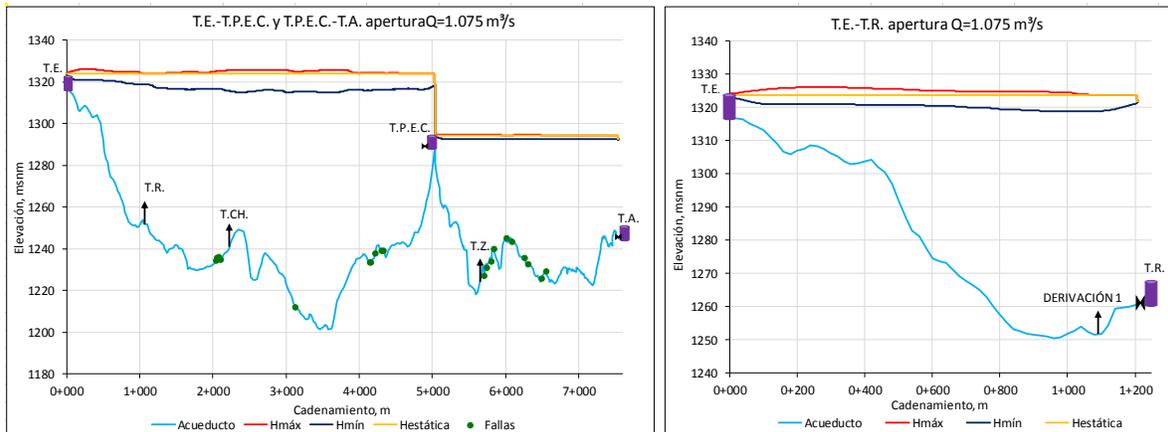


Figura 4.55 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

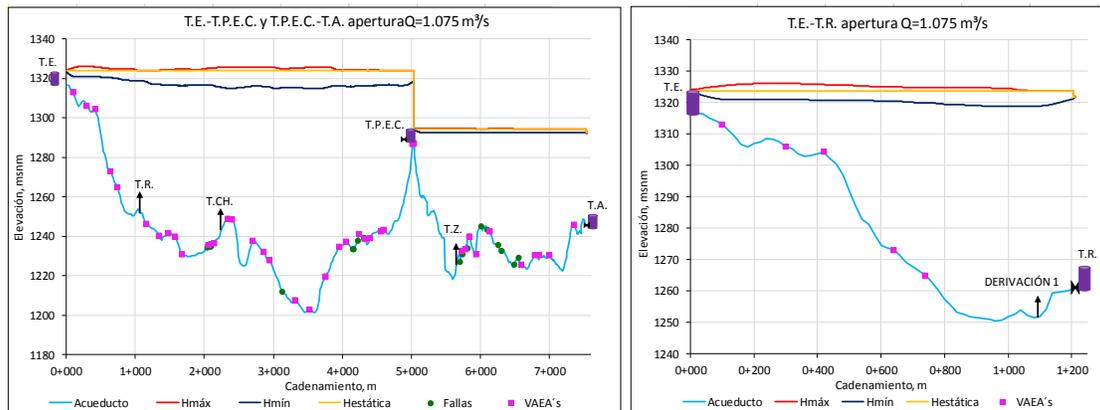


Figura 4.56 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

En la maniobra de cierre total simultáneo de las válvulas antes de los T.R., T.P.E.C. y T.A. sin considerar VAEA's para el gasto 1.075 m³/s, se observan presiones negativas entre los cadenamientos 0+180 y 0+510 m (Figura 4.53) por lo que las VAEA's ubicadas en esa sección van a operar (Figura 4.54). Además, en la maniobra de cierre total con y sin VAEA's se observan escalonamientos en la línea de cargas máximas en el tramo T.E.-T.P.E.C., lo cual puede deberse a la interferencia de las tres ondas de presión generadas por los cierres simultáneos. Únicamente en el tramo T.E.-T.P.E.C, las presiones máximas en los puntos donde ocurrieron las fallas de 2011-2013 (Tabla 4.13) para el caso de la maniobra de cierre total sobrepasan la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo a la norma AWWA C905 (165 psi, 116 m.c.a.), pero no sobrepasan la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.), ni la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.). Sin embargo, en el tramo T.P.E.C.-T.A. no se ve sobrepasada la presión nominal. En el caso de la maniobra de apertura total se ve una pequeña separación de la línea de las cargas máximas y la línea de las cargas mínimas con respecto a la línea de la carga estática, esta maniobra no presenta un problema en la operación de la conducción. Debido a que no trabajan las VAEA's, las Figuras 4.55 y 4.56 se ven iguales.



4.2.3.2 Simulaciones para el gasto 1.62 m³/s

Las Tablas 4.14 y 4.15 y las Figuras 4.57 a 4.60 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.62 m³/s.

Tabla 4.14 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]	
		cierre total	apertura total
1.62	T.E.-T.P.E.C.	198.8	126.5
	T.P.E.C.-T.A.	140.9	76.2
	T.E.-T.R.	136.5	75.8

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]	
		cierre total	apertura total
1.62	T.E.-T.P.E.C.	198.8	126.5
	T.P.E.C.-T.A.	154.1	76.2
	T.E.-T.R.	136.5	75.8

En los valores expresados en la Tabla 4.14 se observa que las cargas máximas más desfavorables son iguales tanto para las simulaciones con y sin VAEA's a excepción de la maniobra de cierre total en el tramo T.P.E.C.-T.A., esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto. En la maniobra de cierre total en el tramo T.P.E.C.-T.A. hay un aumento en la carga máxima al considerar las VAEA's lo cual podría deberse a que ya hay aire en la tubería que se está comprimiendo.

Tabla 4.15 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.62 m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas Cadenamiento	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]		Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]	
		cierre total	apertura total	cierre total	apertura total
T.E.-T.P.E.C.	2+040	155.4	92.1	155.4	92.1
	2+060	154.8	91.2	154.8	91.2
	2+080	154.7	90.9	154.7	90.9
	2+100	156.2	92.3	156.2	92.3
	3+125	186.5	114.3	186.5	114.3
	4+150	171.1	90.6	171.1	90.6
	4+160	171.1	90.5	171.1	90.5
	4+220	169.3	88.6	169.3	88.6
	4+310	165.8	85.1	165.8	85.1
	4+330	166.0	85.3	166.0	85.3
T.P.E.C.-T.A.	5+710	127.9	62.9	127.8	62.9
	5+745	129.1	62.0	127.0	62.0
	5+810	131.0	60.6	125.7	60.6
	5+842	125.6	54.5	119.7	54.5
	6+010	118.4	49.6	115.1	49.6
	6+094	119.4	49.3	114.8	49.3
	6+262	130.1	60.2	126.1	60.2
	6+312	132.6	62.9	128.9	62.9
	6+494	140.3	70.2	136.5	70.2
	6+560	136.0	66.5	132.7	66.5

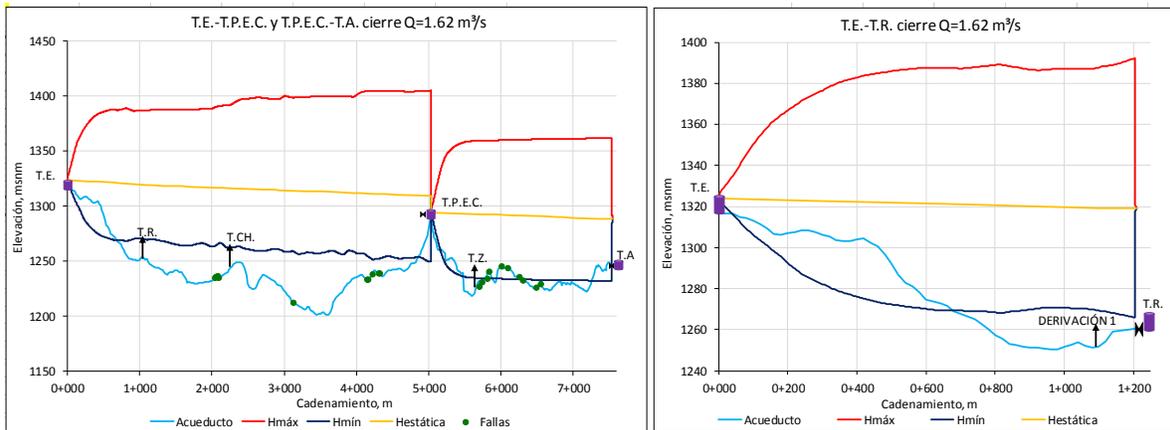


Figura 4.57 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

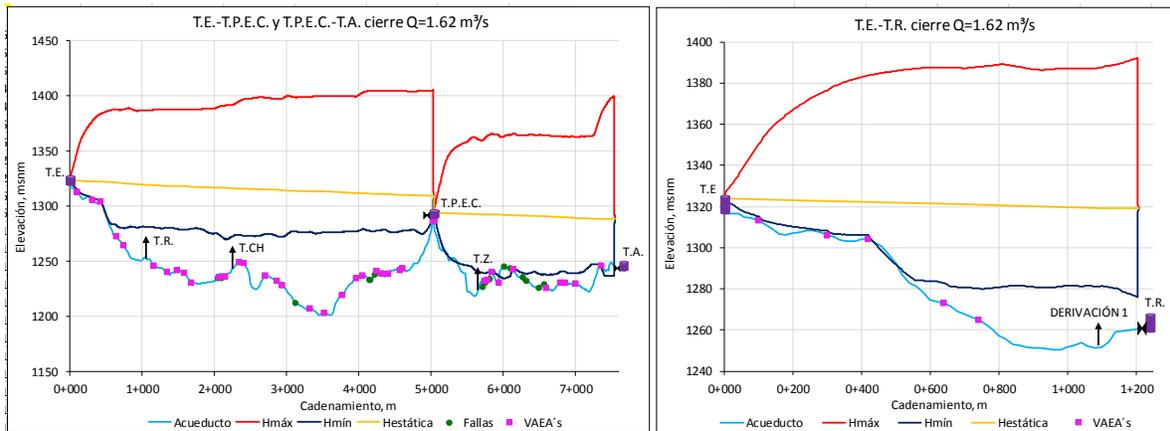


Figura 4.58 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

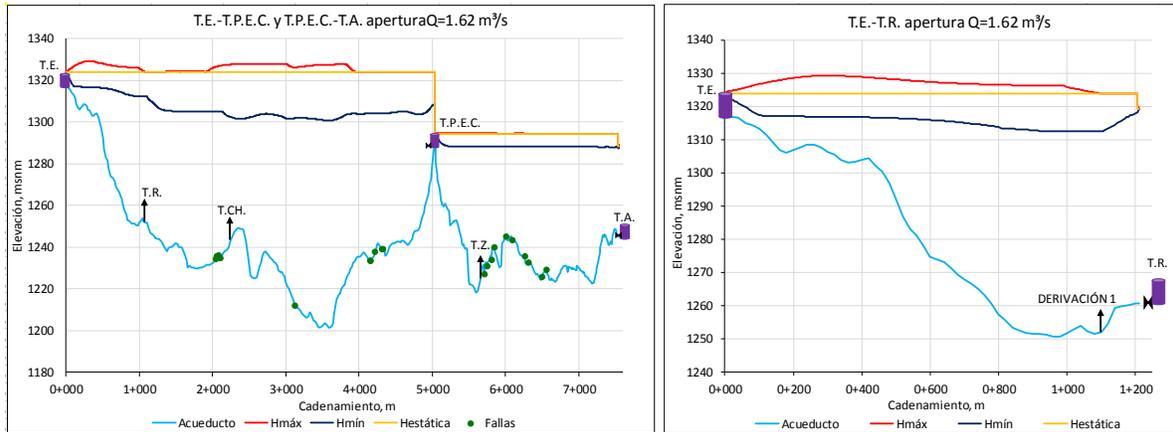


Figura 4.59 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

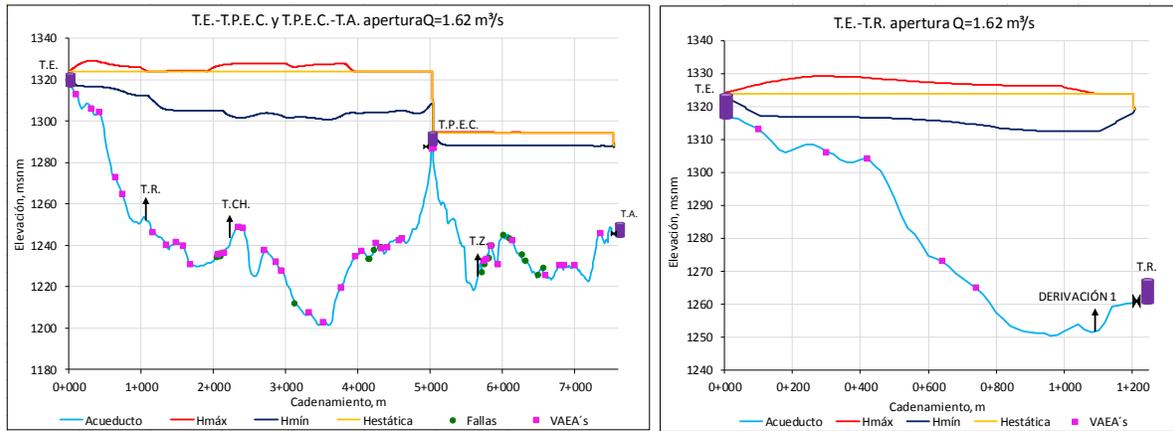


Figura 4.60 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para el gasto $1.62 \text{ m}^3/\text{s}$ se observaron presiones negativas entre los cadenamamientos 0+080 y 0+700 m, en la maniobra de cierre total simultáneo de las válvulas antes de los T.R., T.P.E.C. y T.A. sin considerar VAEA's (Figura 4.57), por lo que las VAEA's ubicadas en esa sección trabajarán. También en la maniobra de cierre total se observa un ligero escalonamiento en el tramo T.E.-T.P.E.C. debido a la interferencia de las ondas de presión de los cierres simultáneos. En la Figura 4.58 de la maniobra de cierre total considerando las VAEA's se observa un pico en la línea de cargas máximas en el tramo T.P.E.C.-T.A., lo cual indica probable presencia de aire en la tubería. En los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R., las presiones máximas en los puntos donde ocurrieron las fallas de 2011-2013 (Tabla 4.15) para el caso de la maniobra de cierre total con VAEA's sobrepasan la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo a la norma AWWA C905 (165 psi, 116 m.c.a.), pero no sobrepasan la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.), ni la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.). En el caso la maniobra de apertura total se ve una separación de la línea de las cargas máximas y la línea de las cargas mínimas con respecto a la línea de la carga estática, esta maniobra no presenta un problema en la operación de la conducción. Debido a que no trabajan las VAEA's, las Figuras 4.59 y 4.60 se ven iguales.



4.2.3.3 Simulaciones para el gasto 0.542 m³/s

Las Tablas 4.16 y 4.17 y las Figuras 4.61 a 4.64 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 0.542 m³/s.

Tabla 4.16 Cargas máximas más desfavorables resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]	
		cierre total	apertura total
0.542	T.E.-T.P.E.C.	148.7	123.3
	T.P.E.C.-T.A.	96.9	76.2
	T.E.-T.R.	94.7	73.9

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]	
		cierre total	apertura total
0.542	T.E.-T.P.E.C.	148.7	123.3
	T.P.E.C.-T.A.	96.9	76.2
	T.E.-T.R.	94.7	73.9

En los valores expresados en la Tabla 4.16 se observa que las cargas máximas más desfavorables son iguales tanto para las simulaciones con y sin VAEA's, esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto.

Tabla 4.17 Cargas máximas resultado de las maniobras simuladas en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas	Cargas máximas al simular las maniobras con VAEA's [m]		Cargas máximas al simular las maniobras sin VAEA's [m]		
		cierre total	apertura total	cierre total	apertura total	
T.E.-T.P.E.C.	2+040	112.9	90.0	112.9	90.0	
	2+060	112.0	89.0	112.0	89.0	
	2+080	111.6	88.5	111.6	88.5	
	2+100	113.0	89.7	113.0	89.7	
	3+125	137.7	112.6	138.1	112.6	
	4+150	119.7	90.7	119.7	90.7	
	4+160	119.6	90.6	119.6	90.6	
	4+220	117.7	88.6	117.7	88.6	
	4+310	114.2	85.1	114.2	85.1	
	4+330	114.4	85.3	114.4	85.3	
	T.P.E.C.-T.A.	5+710	83.6	62.9	83.6	62.9
		5+745	82.7	62.0	82.7	62.0
		5+810	81.3	60.6	81.3	60.6
5+842		75.2	54.5	75.2	54.5	
6+010		70.5	49.6	70.5	49.6	
6+094		70.2	49.3	70.2	49.3	
6+262		81.1	60.3	81.1	60.3	
6+312		83.8	62.9	83.8	62.9	
6+494		91.2	70.2	91.2	70.2	
6+560	87.5	66.5	87.5	66.5		

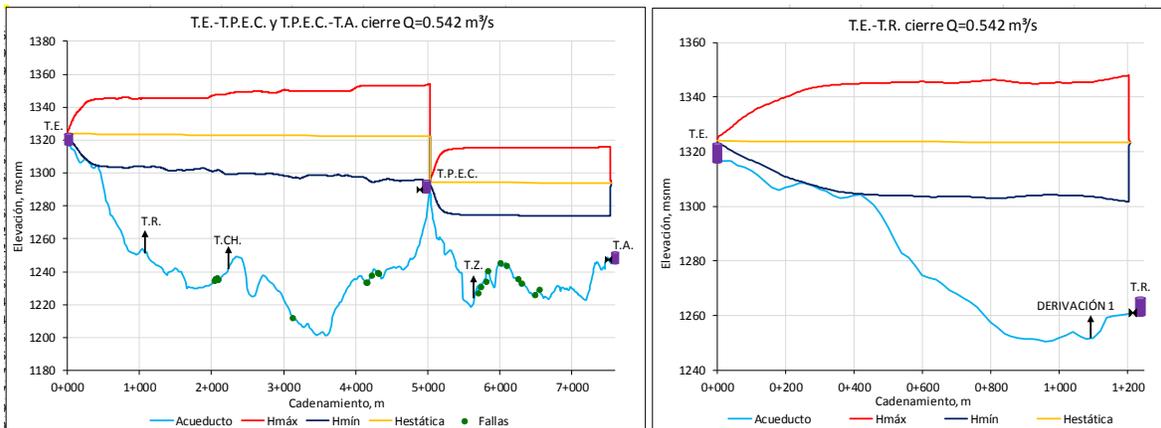


Figura 4.61 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m³/s.

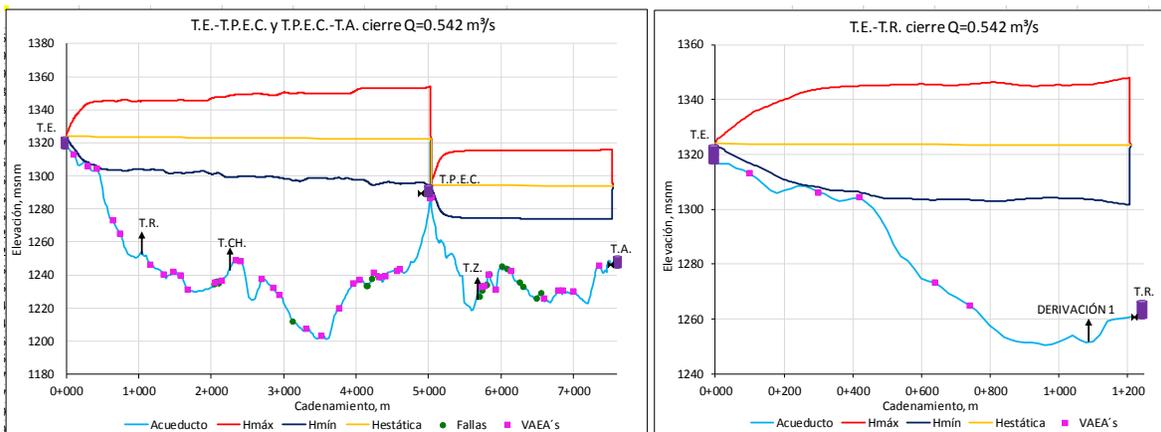


Figura 4.62 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 0.542 m³/s.

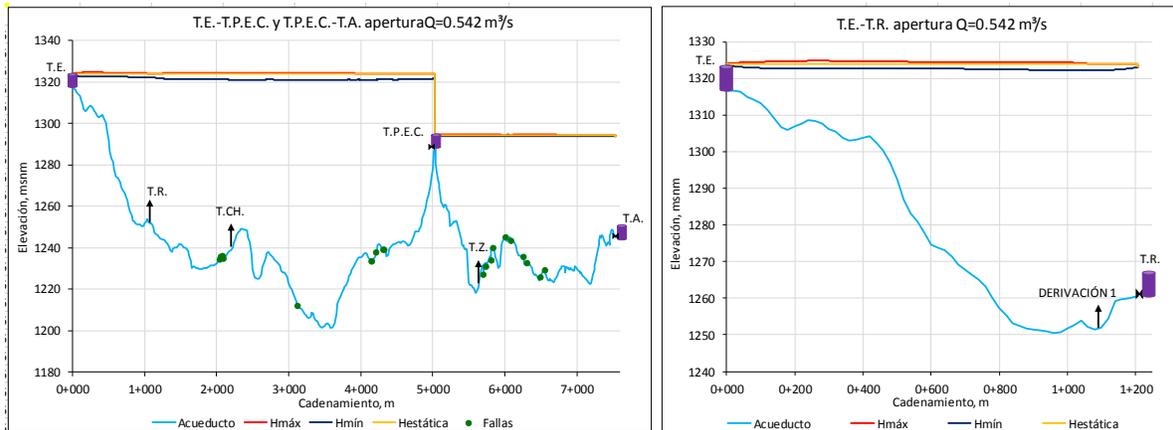


Figura 4.63 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.

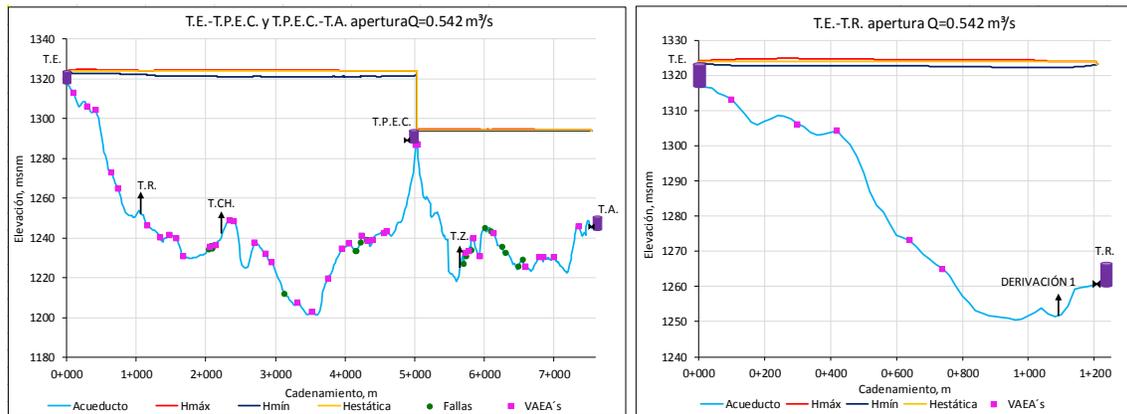


Figura 4.64 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación de la apertura total simultánea de las válvulas antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para el gasto $0.542 \text{ m}^3/\text{s}$, no se observan depresiones en la línea 1 en la maniobra de cierre simultáneo de las válvulas antes de los T.R., T.P.E.C. y T.A. sin considerar VAEA's (Figura 4.61). En el tramo T.E.-T.P.E.C. se ve una modificación en la forma de la línea de cargas máximas en el tramo T.E.-T.P.E.C., lo que indica interferencia de las ondas de presión debidas a los cierres totales simultáneos. En el tramo T.P.E.C.-T.A. no trabajan las VAEA's (Figura 4.62). Solamente en el tramo T.E.-T.P.E.C., la presión máxima en el punto más desfavorable excede la presión nominal, tanto para la maniobra de cierre total como en la maniobra de apertura total (Tabla 4.16). En los puntos donde ocurrieron las fallas de 2011-2013 (Tabla 4.17) para el caso de la maniobra de cierre total la mayoría no sobrepasan la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo a la norma AWWA C905 (165 psi, 116 m.c.a.), tampoco sobrepasan la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.), ni la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.). Para la maniobra de apertura no se ve una gran variación de las cargas máximas y mínimas con respecto a la carga estática, esta maniobra no presenta un problema en la operación de la conducción. Debido a que no trabajan las VAEA's, las Figuras 4.63 y 4.64 se ven iguales.



4.3 Resultados y Análisis de los transitorios lentos

En todos los resultados de las simulaciones se revisó la carga máxima en el punto más desfavorable que es en el que hay una mayor diferencia entre la línea de la tubería del acueducto y la línea de cargas máximas. Además, se observó que la maniobra del cierre total de la válvula es la más desfavorable.

A continuación, se muestran los resultados y su análisis después de realizar las simulaciones de cierre de válvulas de mariposa consideradas en 1 minuto en el acueducto Conejos-Médanos para el gasto de diseño de 1.075 m³/s. Adicionalmente se simuló el tiempo de cierre de 30 segundos.

4.3.1 Tanques de Entrega al Tanque Renovación (T.E.-T.R.)

La Tabla 4.18 y las Figuras 4.65 y 4.66 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.075 m³/s y un tiempo de cierre de 30 segundos. Mientras que la Tabla 4.19 y las Figuras 4.67 y 4.68 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.075 m³/s y un tiempo de cierre de 1 minuto.

Tabla 4.18 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 30s en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.075m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]
	cierre total	cierre total
1.075	103.6	103.6

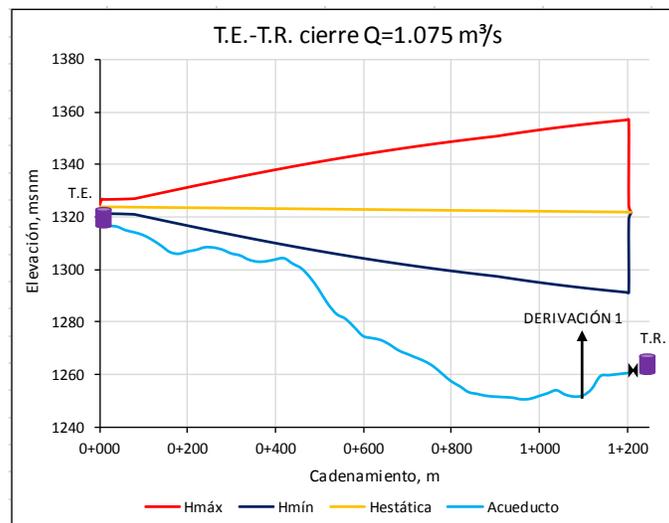


Figura 4.65 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula en 30 segundos antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto de diseño 1.075 m³/s.

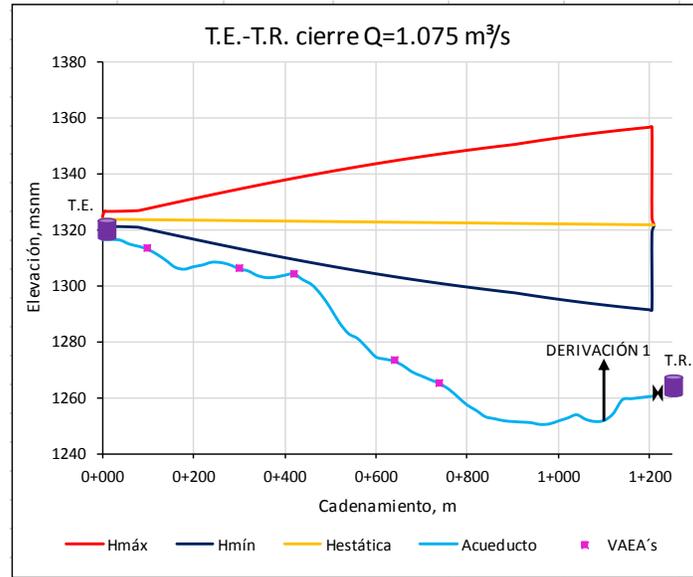


Figura 4.66 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula en 30 segundos antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto de diseño 1.075 m³/s.

Tabla 4.19 Resumen de las cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 1min en el tramo T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]
	cierre total	cierre total
1.075	84.4	84.4

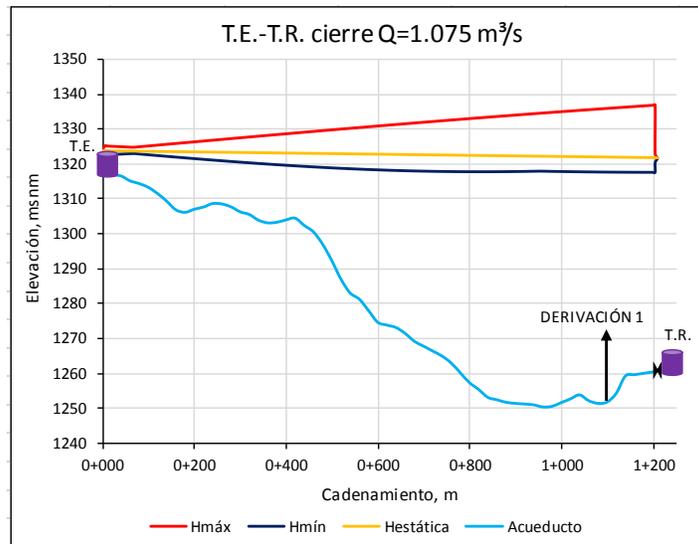


Figura 4.67 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula en 1 minuto antes del T.R. sin considerar las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto de diseño 1.075 m³/s.

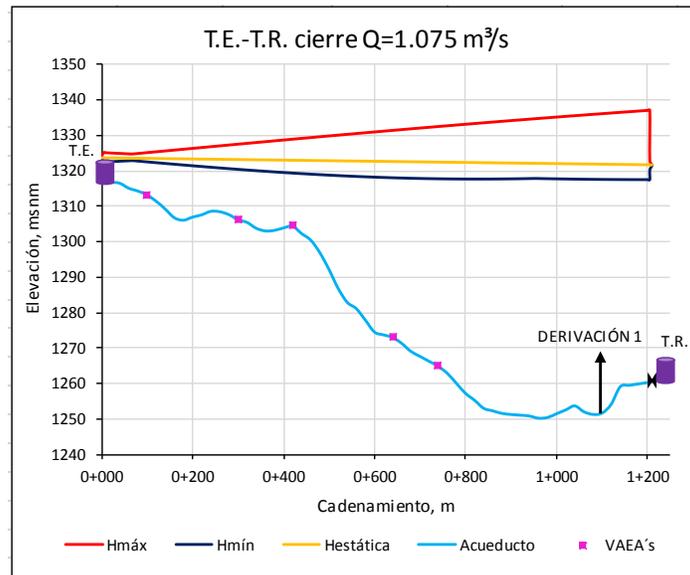


Figura 4.68 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total de la válvula en 1 minuto antes del T.R. considerando las VAEA's en el tramo de T.E.-T.R para el gasto de diseño 1.075 m³/s.

En los valores expresados en las Tablas 4.18 y 4.19 se observa que las cargas máximas más desfavorables son iguales tanto para las simulaciones con y sin VAEA's, esto se debe a que no hay depresiones y no están trabajando las VAEA's.

En las gráficas se puede observar que al aumentar el tiempo de la maniobra de cierre total disminuye la presión máxima registrada en el punto más desfavorable. Debido a que las VAEA's no están trabajando, las Figuras 4.65 y 4.66 se ven iguales, lo mismo sucede con las Figuras 4.67 y 4.68. Las presiones máximas no exceden la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo a la norma AWWA C905 (165 psi, 116 m.c.a.), tampoco sobrepasan la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.), ni la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.).

4.3.2 Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.) y del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.)

Las Tablas 4.20 y 4.21 y las Figuras 4.69 y 4.70 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.075 m³/s y un tiempo de cierre de 30 segundos. Mientras que las Tablas 4.22 y 4.23 y las Figuras 4.71 y 4.72 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.075 m³/s y un tiempo de cierre de 1 minuto.

Tabla 4.20 Cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 30s en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

Gasto (m³/s)	Tramo	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]
		cierre total	cierre total
1.075	T.E.-T.P.E.C.	175.9	175.9
	T.P.E.C.-T.A.	123.3	123.3



Tabla 4.21 Cargas máximas resultado de la maniobra de cierre total simulada en 30s en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]
	Cadenamiento	cierre total	cierre total
T.E.-T.P.E.C.	2+040	140.1	140.1
	2+060	139.1	139.1
	2+080	138.7	138.7
	2+100	140.0	140.0
	3+125	164.7	164.7
	4+150	144.1	144.1
	4+160	144.0	144.0
	4+220	142.0	142.0
	4+310	138.6	138.6
	4+330	138.8	138.8
T.P.E.C.-T.A.	5+710	91.8	91.8
	5+745	92.3	92.3
	5+810	93.4	93.4
	5+842	88.4	88.4
	6+010	88.7	88.7
	6+094	90.4	90.4
	6+262	104.5	104.5
	6+312	107.9	107.9
	6+494	117.4	117.4
6+560	114.2	114.2	

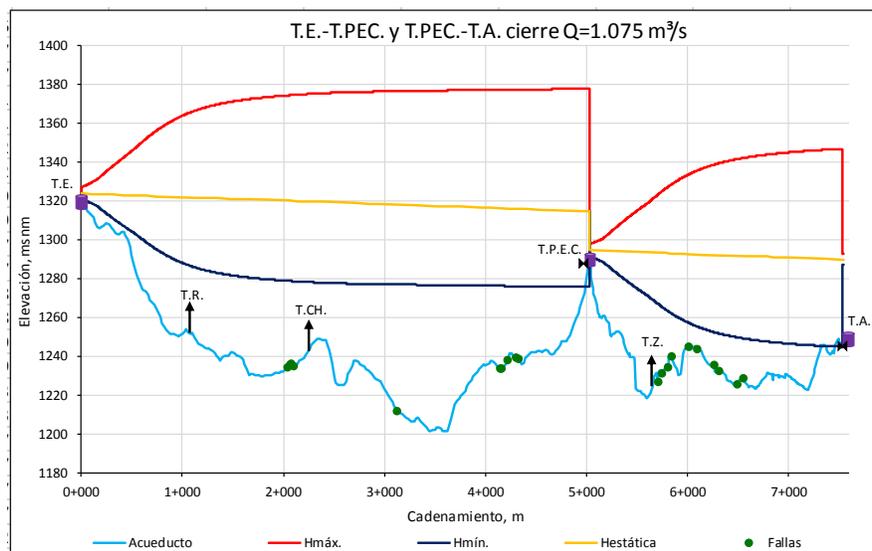


Figura 4.69 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 30 segundos antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

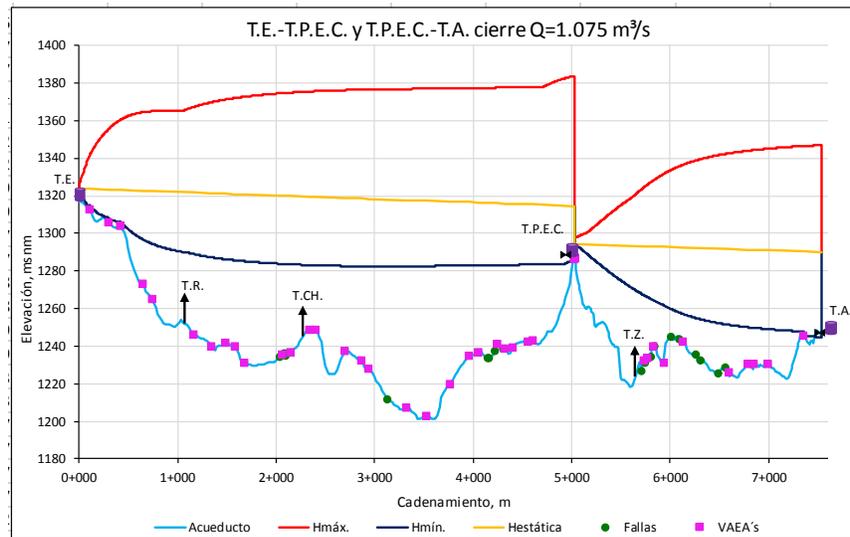


Figura 4.70 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 30 segundos antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

Tabla 4.22 Cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 1min en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

Gasto (m³/s)	Tramo	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]
		cierre total	cierre total
1.075	T.E.-T.P.E.C.	171.2	171.2
	T.P.E.C.-T.A.	104.9	104.9

Tabla 4.23 Cargas máximas resultado de la maniobra de cierre simulada en 1min en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]
	Cadenamiento	cierre total	cierre total
T.E.-T.P.E.C.	2+040	129.6	129.6
	2+060	128.8	128.8
	2+080	128.5	128.5
	2+100	130.0	130.0
	3+125	159.1	159.1
	4+150	139.9	139.9
	4+160	139.9	139.9
	4+220	137.9	137.9
	4+310	134.6	134.6
T.P.E.C.-T.A.	4+330	134.8	134.8
	5+710	75.5	75.5
	5+745	75.2	75.2
	5+810	74.8	74.8
	5+842	69.3	69.3
	6+010	67.2	67.2
	6+094	68.1	68.1
	6+262	81.5	81.5
	6+312	84.8	84.8
6+494	94.5	94.5	
6+560	91.5	91.5	

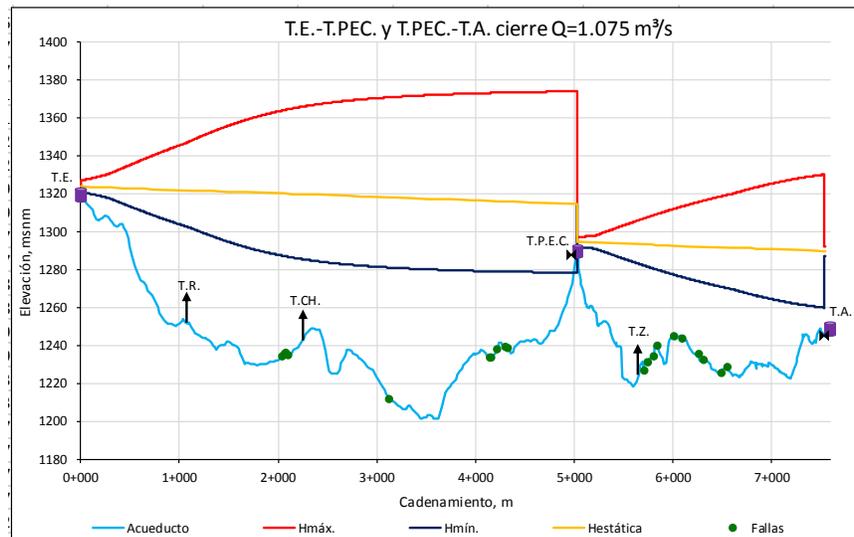


Figura 4.71 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 1 minuto antes del T.P.E.C. y del T.A. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.



Figura 4.72 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 1 minuto antes del T.P.E.C. y del T.A. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. para el gasto 1.075 m³/s.

En los valores expresados en las Tablas 4.20 y 4.22 se observa que las cargas máximas más desfavorables son iguales tanto para las simulaciones con y sin VAEA's, esto se debe a que una vez que se produce el transitorio en el punto donde se consideró la válvula de mariposa se alcanza la carga máxima porque la energía liberada por el fluido no ha tenido pérdidas debidas a la fricción con las paredes del conducto.

Se observó que al aumentar el tiempo de la maniobra de cierre disminuyó la presión máxima calculada. Sin embargo, las presiones máximas en el tramo de T.E.-T.P.E.C. (Tablas 4.21 y 4.23) siguen sobrepasando la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo a la norma AWWA C905 (165 psi, 116 m.c.a.), sin sobrepasar la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.), ni la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.), y al parecer de



haber ocurrido esta maniobra ella pudo producir las fallas. En las simulaciones sin VAEA's (Figuras 4.69 y 4.71) parece que no trabajan las VAEA's, sin embargo, cuando se simuló considerándolas (Figuras 4.70 y 4.72) parece que entran en operación y hasta se observa un pico en el tramo T.E.-T.P.E.C. que indica probable presencia de aire en el caso de la simulación del cierre total en 30 segundos (Figura 4.70), por lo que se revisaron los resultados de la simulación de la operación de las VAEA's para la simulación de cierre total en 1 minuto y se observó que la tercera VAEA es la que se abre. Si al cerrar la válvula en un minuto entró en operación la VAEA, seguramente también abrió en la simulación de cierre total en 30 segundos.

4.3.3 Tanques de Entrega al Tanque Plutarco Elías Calles (T.E.-T.P.E.C.), del Tanque P.E.C. al Tanque Altamirano (T.P.E.C.-T.A.) y de T.E. al Tanque Renovación (T.E.-T.R.)

Las Tablas 4.24 y 4.25 y las Figuras 4.73 y 4.74 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.075 m³/s y un tiempo de cierre de 30 segundos. Mientras que las Tablas 4.26 y 4.27 y las Figuras 4.75 y 4.76 presentan los resultados de las simulaciones para el caso de un gasto por la conducción de 1.075 m³/s y un tiempo de cierre de 1 minuto.

Tabla 4.24 Cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 30s en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]
		cierre total	cierre total
1.075	T.E.-T.P.E.C.	165.7	165.7
	T.P.E.C.-T.A.	104.9	104.9
	T.E.-T.R.	101.3	101.3

Tabla 4.25 Cargas máximas resultado de la maniobra de cierre simulada en 30s en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]
	Cadenamiento	cierre total	cierre total
T.E.-T.P.E.C.	2+040	123.3	123.3
	2+060	122.4	122.4
	2+080	122.1	122.1
	2+100	123.5	123.5
	3+125	154.2	154.2
	4+150	135.7	135.7
	4+160	135.8	135.8
	4+220	134.3	134.3
	4+310	131.5	131.5
	4+330	131.9	131.9
T.P.E.C.-T.A.	5+710	83.8	83.8
	5+745	83.7	83.7
	5+810	83.8	83.8
	5+842	78.4	78.4
	6+010	76.5	76.5
	6+094	77.3	77.3
	6+262	89.8	89.8
	6+312	92.8	92.8
	6+494	101.2	101.2
	6+560	97.8	97.8

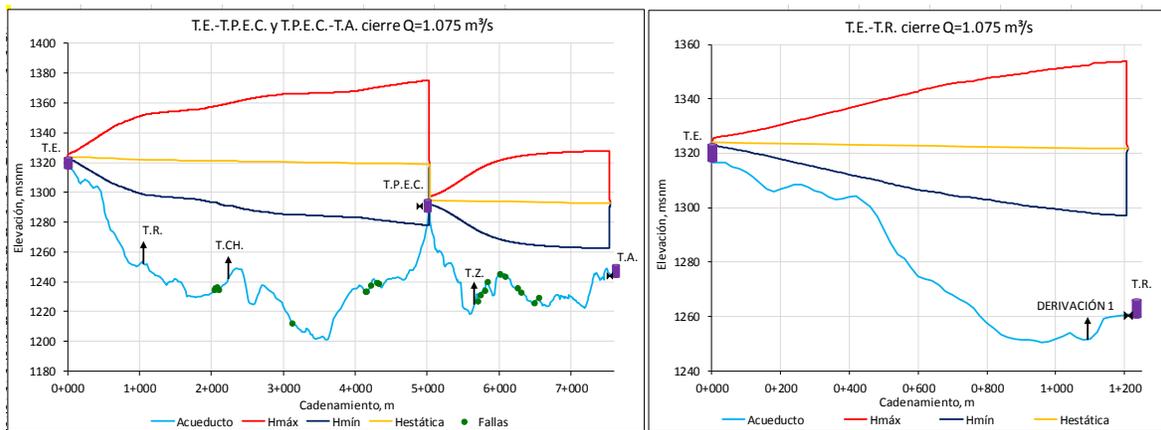


Figura 4.73 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 30 segundos antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

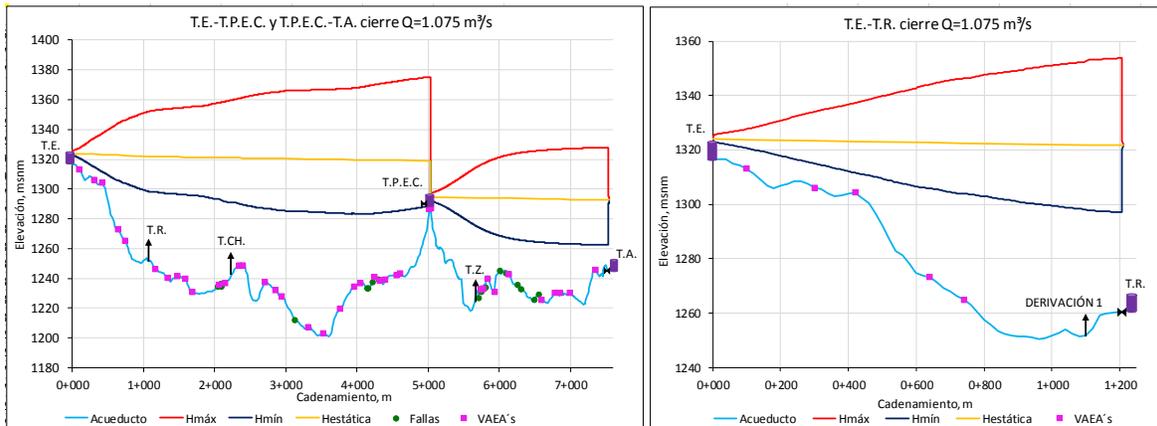


Figura 4.74 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 30 segundos antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

Tabla 4.26 Cargas máximas más desfavorables resultado de la maniobra de cierre total simulada en 1min en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

Gasto (m ³ /s)	Tramo	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]
		cierre total	cierre total
1.075	T.E.-T.P.E.C.	161.1	161.1
	T.P.E.C.-T.A.	95.9	95.9
	T.E.-T.R.	90.9	90.9



Tabla 4.27 Cargas máximas resultado de la maniobra de cierre simulada en 1min en los tramos T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075m³/s en los puntos donde ocurrieron las fallas del 2011-2013.

Tramo	Fallas	Cargas máximas al simular la maniobra con VAEA's [m]	Cargas máximas al simular la maniobra sin VAEA's [m]
	Cadenamiento	cierre total	cierre total
T.E.-T.P.E.C.	2+040	119.0	119.0
	2+060	118.1	118.1
	2+080	117.7	117.7
	2+100	119.2	119.2
	3+125	149.3	149.3
	4+150	130.3	130.3
	4+160	130.3	130.3
	4+220	128.4	128.4
	4+310	125.0	125.0
	4+330	125.2	125.2
T.P.E.C.-T.A.	5+710	72.0	72.0
	5+745	71.5	71.5
	5+810	70.8	70.8
	5+842	65.1	65.1
	6+010	62.2	62.2
	6+094	62.8	62.8
	6+262	75.9	75.9
	6+312	79.2	79.2
	6+494	88.6	88.6
	6+560	85.6	85.6

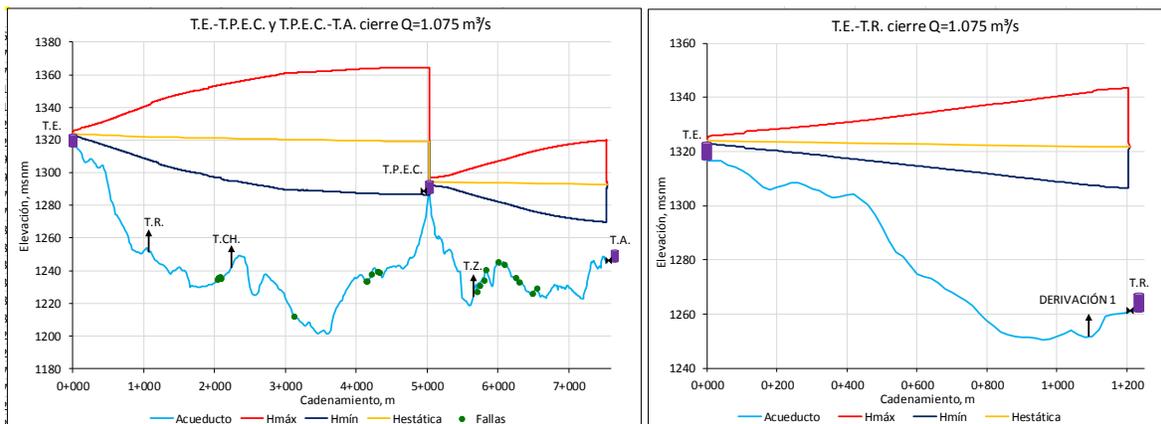


Figura 4.75 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 1 minuto antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. sin considerar las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto 1.075 m³/s.

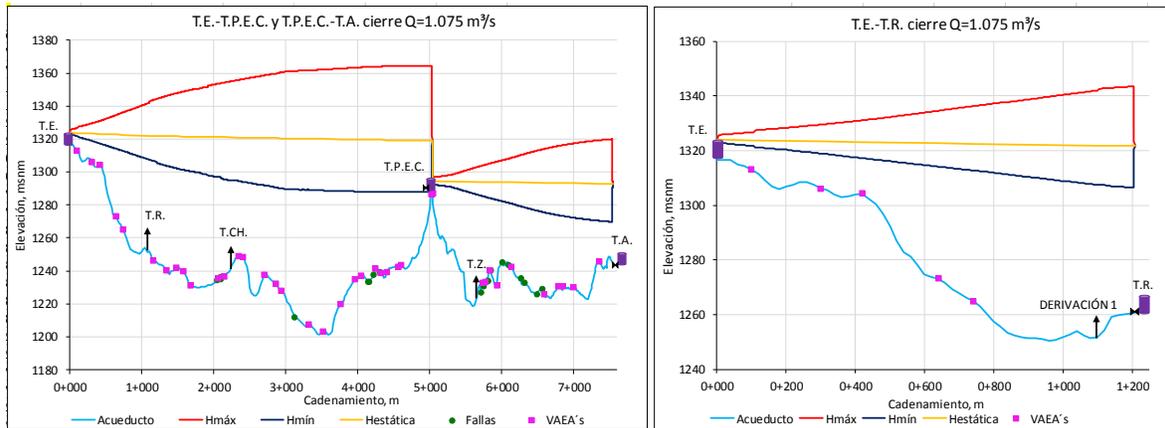


Figura 4.76 Cargas máximas y mínimas resultantes de la simulación del cierre total simultáneo de las válvulas en 1 minuto antes del T.P.E.C., del T.A. y del T.R. considerando las VAEA's en los tramos de T.E.-T.P.E.C., T.P.E.C.-T.A. y T.E.-T.R. para el gasto $1.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

En los valores expresados en las Tablas 4.24 y 4.26 se observa que las cargas máximas más desfavorables son iguales tanto para las simulaciones con y sin VAEA's, esto se debe a que no trabajan las VAEA's.

Se observó que al aumentar el tiempo de la maniobra de cierre disminuyó la carga máxima. Se observan presiones máximas en el tramo de T.E.-T.P.E.C. (Tablas 4.25 y 4.27) que siguen sobrepasando la presión nominal de la tubería de PVC RD25 de acuerdo a la norma AWWA C905 (165 psi, 116 m.c.a.), sin sobrepasar la presión de la prueba por estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.), ni la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.). En el tramo T.E.-T.P.E.C. para un tiempo de cierre de 30 segundos (Figuras 4.73 y 4.74) se observa un ligero escalonamiento por la interferencia de tres ondas de presión por el cierre simultáneo. Además, tanto en el tramo T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. no trabajan las VAEA's, por lo que las Figuras 4.73 y 4.74 son iguales, y lo mismo sucede con las Figuras 4.75 y 4.76.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las tuberías plásticas han sustituido en gran medida a tuberías de otros materiales en los acueductos en todo el mundo debido a los ahorros en los costos de instalación. Las principales tuberías plásticas son las de policloruro de vinilo (PVC) y el polietileno (PE).

Cuando explicaciones comunes y obvias en fallas en el material de tuberías no corresponden a un diseño inadecuado, instalación incorrecta, defectos de fabricación de las tuberías y asentamientos inesperados del suelo. Otras posibles causas que se pueden examinar son los transitorios hidráulicos, las bolsas de aire atrapadas en los conductos, la fatiga del material y la rápida propagación de grietas.

Un problema recurrente en el uso de las tuberías plásticas son las roturas del tipo Propagación Rápida de Falla (PRF), las cuales pueden prolongarse hasta cientos de metros principalmente en el caso de las tuberías de PVC unidas por fusión a tope ya que no hay ningún obstáculo que la frene como en el caso de las tuberías de PVC con unión espiga-campana.

La propagación rápida de falla se caracteriza porque la falla se produce de manera totalmente sorpresiva y progresa a muy alta velocidad (100 m/s a 600 m/s). Además, la PRF no es precedida por deformaciones macroscópicas que hagan posible tomar medidas para evitarla o para reducir la gravedad de sus consecuencias, ya que comúnmente el origen de este tipo de falla se debe a factores introducidos durante la fabricación de los tubos, los cuales no son detectados por los fabricantes ni por los responsables de la construcción.

Con respecto al caso de estudio de este trabajo, el acueducto Conejos-Médanos, por estudios realizados en fecha posterior a que se presentaron las 20 fallas en tubería de PVC de la marca JM Eagle RD25 diámetro 36 in en las líneas 2 y 3 (2011-2013) se determinó que éstas no fueron causadas por sobrepresión, ni por errores de diseño o instalación; la tubería en cuestión pasó las pruebas que indica la norma AWWA C905. Debido a que en el momento de las fallas la tubería era relativamente nueva, llevaba un año de operación, es muy poco probable que la fatiga sea una causa de las fallas por el número de ciclos de variación de presión. Por ello, el fenómeno de propagación rápida de falla es la causa más probable de las roturas, las cuales se debieron a posibles defectos de fabricación, lo cual produjo el fenómeno de PRF. Aunque la tubería de PVC fue revisada bajo la norma AWWA C905 bajo la cual fueron fabricados en Estados Unidos por la marca JM Eagle, en esta normativa no se considera el fenómeno de PRF.

Además, con los resultados obtenidos en este trabajo se observó que varias de las fallas se dieron con presiones por debajo de su presión nominal (165 psi, 116 m.c.a.) en el tramo T.P.E.C.-T.A, a excepción de los cierres rápidos (tiempo de maniobra de 5 segundos) principalmente para el gasto 1.62 m³/s. También, se corroboró que no excede los parámetros establecidos en la norma AWWA C905 en cuanto a la presión de la prueba de estallamiento al corto plazo (535 psi, 376 m.c.a.) y la presión de la prueba hidrostática (330 psi, 232 m.c.a.).

Las tuberías de PVC son susceptibles a la PRF durante la prueba hidrostática debido a que la presión es mayor que la presión nominal, de acuerdo con la norma AWWA C905 una tubería de PVC RD25 debe soportar presión transitoria de 264 psi (185 m.c.a.), con los resultados de este trabajo se observó que se sobrepasó este valor principalmente para el gasto simulado de 1.62 m³/s en el tramo T.E.-T.P.E.C en el cadenamamiento 3+125 m en las maniobras de 5 segundos de cierre rápido y cierre parcial (Tablas 4.9 y 4.15).

De un análisis de transitorios el resultado más importante son las líneas envolventes de cargas máximas y mínimas que se producen en el transitorio. Con las simulaciones de cierre total, cierre parcial, apertura total y apertura parcial de las válvulas de mariposa consideradas se observó que las envolventes obtenidas dependen del tiempo de maniobra, del gasto con el que opera y de la



longitud de la conducción. También se concluye que el transitorio es más perjudicial cuando el tiempo de maniobra es menor y principalmente en la maniobra de cierre.

En el caso de las maniobras de cierre total y cierre parcial se analizaron para definir las presiones máximas a las cuales estará sujeta la tubería y se observan cambios en las envolventes de cargas máximas y mínimas, en este caso la maniobra de cierre total se observó como el caso más desfavorable tanto para las cargas máximas como para las mínimas, mientras que con las maniobras de apertura y apertura parcial no se observaron grandes cambios de las líneas de cargas máximas y mínimas con respecto a la carga estática. En el caso de la mayoría de las simulaciones realizadas, las maniobras de apertura total y apertura parcial muestran que no trabajan las VAEA's, a excepción de la simulación de apertura total en 5 segundos en los tramos T.E.-T.P.E.C. y T.P.E.C.-T.A. con el gasto 1.62 m³/s (Figuras 4.41 y 4.42).

La resistencia de la tubería debe ser mayor a la máxima carga transitoria que se puede presentar, en este trabajo se observó que lo anterior no ocurrió principalmente en el tramo T.E.-T.P.E.C. para los gastos 1.075 m³/s y 1.62 m³/s (Tablas 4.7, 4.9, 4.13, 4.15, 4.21, 4.23, 4.25 y 4.27) en las maniobras de cierre total y cierre parcial en todos los tiempos de maniobra (5 segundos, 30 segundos y 1 minuto). De haberse presentado la maniobra de cierre total en las condiciones simuladas en este trabajo en el tramo T.E.-T.P.E.C., esto pudo favorecer el origen de las fallas por sobrepasar la presión nominal de la tubería.

Al momento de suceder las fallas en el acueducto Conejos-Médanos en las líneas 2 y 3, únicamente existían válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA) a lo largo de la conducción. Con los resultados obtenidos se observó que en particular en la línea 1 entre los cadenamientos 0+000 y 0+700 m para todos los tiempos de cierre simulados es en donde se presenta una depresión en la tubería por lo que es en ese tramo en donde entran en operación las VAEA's.

Previamente a iniciar las simulaciones presentadas en este trabajo, se hizo un análisis rápido previo con el método de González y Pozos (2012) basado en el cambio de pendiente a partir del cual se obtuvieron los puntos donde se pueden generar bolsas de aire en el acueducto Conejos-Médanos, éste no se presentó en este trabajo debido a que las simulaciones fueron sin considerar las bolsas de aire. Sin embargo, a partir de lo obtenido con el método de cambio de pendiente era posible que existiera una bolsa de aire en el cadenamiento 0+480 m de la línea 1, donde no había una válvula de aire y por la pendiente del tramo sería recomendable una válvula combinada. Además, algunas de las fallas en la línea 2 y principalmente la línea 3 se produjeron cercanas a donde había una VAEA, lo que podría deberse a que esa válvula fuera insuficiente. También en algunos puntos donde se dieron las fallas (línea 2 y 3) con el estudio previo del cambio de pendiente se obtuvo que era posible tener bolsas de aire, por ejemplo en el cadenamiento 3+125 m que presentó los valores más altos de carga máxima para todas las maniobras y gastos, no hay una VAEA en esa ubicación y sería recomendable una válvula combinada en ese punto, además, cercano a ese punto era posible tener una bolsa de aire.

Con las figuras mostradas en el capítulo de resultados de este trabajo se observó que en una depresión entran en funcionamiento las VAEA's, se simula la compresión del aire que ingresó y por lo tanto aumenta la presión. Además, la modificación en la forma de la línea de cargas máximas entre las simulaciones con y sin VAEA's indica probable presencia de aire en la tubería. Y con el análisis previo del método de cambio de pendiente se obtuvo que se pueden generar bolsas de aire en los puntos donde se dieron las fallas. Varias de las fallas se dieron cercanas o en la ubicación de las VAEA's. También se observaron presiones mayores a la presión nominal principalmente en el tramo T.E.-T.P.E.C. para las maniobras de cierre total y cierre parcial en todos los tiempos de cierre simulados con los gastos de 1.075 m³/s y 1.62 m³/s. Todo lo mencionado anteriormente son indicios de que se trató de propagación rápida de falla (PRF). Sin olvidar que la tubería del acueducto Conejos-Médanos es una tubería de PVC RD25 de 36 in de diámetro, por lo que es una tubería de diámetro grande y un RD con el que comúnmente se presenta PRF.



Las soluciones que recomendó el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) después de realizar una revisión de los hechos en este acueducto fueron, la primera solución y la más segura fue suspender temporalmente la operación del acueducto Conejos-Médanos y sustituir las tuberías de PVC por tuberías de otro material, solución que el JMAS, organismo operador de Ciudad Juárez, no aceptó. Y la otra alternativa fue operar el acueducto con presiones menores de la presión crítica (se tuvo que calcular a partir de la Ecuación 3) para el fenómeno propagación rápida de falla, lo cual se puede lograr teniendo pérdidas de carga artificiales que reduzcan la presión en las partes bajas, que por lo que se observó con las envolventes de cargas máximas y mínimas son los puntos críticos.

Algunas de las recomendaciones para una conducción a gravedad emitidas en el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, en el libro 11- Fenómenos transitorios en líneas de conducción, son las siguientes:

- Evitar que la tubería pase por puntos altos acentuados, debido a que son lugares donde se puede producir separación de columna en el transitorio. Sin embargo, esto resulta un poco complicado ya que depende de la topografía del lugar.
- Es recomendable que la conducción este en varias etapas para evitar transitorios fuertes, esto se logra por medio de tanques o cajas rompedoras de presión intermedios, de tal manera que el transitorio es menos severo porque se desarrolla de manera independiente en las tuberías de cada etapa.
- Es recomendable que el material de la tubería sea menos rígido, lo que disminuye la celeridad (velocidad de propagación de la onda) y con ello los efectos del transitorio hidráulico (material flexible como el PVC o muy flexible como el Polietileno).
- Para el análisis de transitorios en una conducción es importante contar con la siguiente información: elevaciones de la tubería en todos los puntos de cambio de pendiente del terreno; diámetro, material, clase y espesor de pared de la tubería; tipo de válvula y tiempo de maniobra; y, gastos y políticas de operación de la conducción. Además, es importante que el programa de cómputo que simula el transitorio es aplicable al caso de estudio por el método numérico en que se basa y asegurarse de analizar el caso más desfavorable.
- Mientras mayor sea el diámetro, menor es la velocidad del flujo, y con esto son menores las variaciones de presión en los transitorios. También debe considerarse la relación Diámetro/Espesor, ya que mientras menor sea ese valor, más rígida es la tubería. Para tubería no enterrada, se puede considerar que no hay peligro de aplastamiento si la relación Diámetro/Espesor en tubos de PVC es menor a 33 y en tubos de polietileno menor a 22. La clase de tubos vulnerable a aplastamiento por efecto del vacío en tubos de polietileno son RD41, RD32.5 y RD26; y, para tubos de PVC son RD64 y RD41. Sin olvidar un RD mínimo de 13 para evitar el fenómeno de PRF en tuberías de PVC y un RD mínimo de 29 para tuberías de Polietileno. En este caso de estudio, el acueducto Conejos-Médanos es una tubería de PCV RD25 de 36in de diámetro, por lo tanto se concluye que por sobrepasar los límites recomendados para las tuberías de PVC era propenso a desarrollar Propagación rápida de falla.
- Considerar a lo largo de la conducción, implementar medios de protección que eliminan presiones negativas y reducen presiones máximas. El principal medio y más sencillo es hacer el cierre o apertura más lentos.
- Válvulas de admisión de aire. El diseño de cualquier conducción normalmente considera cierto número de válvulas de aire con el objeto de asegurar la expulsión del aire en su llenado y la admisión de aire en el vaciado. Sin embargo, este tipo de válvulas tienen un efecto local para eliminar la presión negativa en los transitorios, por lo que se necesitaría una en cada punto donde se produce tal presión lo que representa un gran número de éstas y no resulta factible usar únicamente este tipo de válvulas para aminorar los efectos del transitorio en la conducción.

Las recomendaciones para evitar la PRF en tuberías en funcionamiento y diseño de nuevas tuberías de PVC son:



- Evitar la acumulación de aire en las tuberías, debido a que reduce la presión crítica para una rápida propagación de falla. Lo anterior se puede lograr con un número suficiente y ubicación adecuada de válvulas de aire del tamaño correcto, además del mantenimiento adecuado de las mismas.
- Mantener en las tuberías una presión de agua inferior a la presión crítica para propagación rápida de falla.
- Revisar para evitar que las tuberías empleadas tengan defectos de fabricación y en el transporte e instalación, ya que son causas que pueden desencadenar la PRF.
- No emplear tuberías de presión de PVC de gran diámetro (más de 4 in de diámetro). Comúnmente, las fallas de este tipo se han dado en tuberías de PVC con RD entre 25 y 18, por lo que es recomendable seleccionar una tubería con RD mínimo de 13 para evitar el fenómeno de PRF.

Se sugiere para desarrollos futuros probar simular el comportamiento del mismo acueducto considerando la intrusión de aire o cambiar el material para mejorar la detección de una falla del tipo Propagación rápida de falla. También sería recomendable conocer el volumen de aire que está entrando a la tubería.

Identificar oportunamente los problemas relacionados a las tuberías y al funcionamiento de las conducciones de agua potable hará más eficiente la administración y aprovechamiento de este recurso. Es importante detectar la problemática en cualquier etapa del proyecto con una corresponsabilidad desde el establecimiento de una correcta normativa, la fabricación, inspección, traslado, el diseño, la instalación y construcción de la infraestructura, además de la correcta operación y mantenimiento pertinente.



REFERENCIAS

Andrade, A., Mosquera, W. y Vanegas, L., 2015. Modelos de crecimiento de grietas por fatiga. Entre Ciencia e Ingeniería, ISSN 1909-8367, Año 9, No. 18, Segundo Semestre de 2015, pp. 39 – 48.

Aranibar, Alexander, 2016. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico: Determinación predictiva de la cavitación por parámetros sónicos. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

AWWA, 2001. Manual M51, Air Release, Air/Vacuum Valves & Combination Air Valves. USA: American Water Works Association.

AWWA, 2002. Manual M23, PVC Pipe - Design and Instalation. USA: American Water Works Association.

AWWA, 2001. Manual M49, Butterfly valves: torque, head loss, and cavitation analysis. USA: American Water Works Association.

AWWA, 2010. C905-10 Polyvinyl Chloride (PVC) Pressure Pipe and Fabricated Fittings, 14 In. Through 48in. (350mm Through 1,200mm) for Water Transmission and Distribution. USA: American Water Works Association.

Balvant, R. y Yehuda K., 2011. Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models. Urban Water. Año 3, pp. 151-164.

Beamer, R., Kendall, D. y Romer, A., 2009. Several Failures of a 16-inch PVC Transmission Main within 12 Years. Pipelines 2009: Infrastructure's Hidden Assets © 2009 ASCE, pp. 198-209.

Bernal-Lara, T., Summers, J., Hiltner, A. y Baer, E., 2004. Stepwise Fatigue Crack Propagation in Poly (vinyl chloride). Journal of Vinyl and Additive Technology, Vol. 10 (N° 1), pp. 5 - 10.

Cafaggi, F., Rodal, E. y Sánchez, A., 2016. Sistemas de Bombeo. Segunda ed. México. Facultad de Ingeniería, UNAM.

Carmona, R. y Carmona, L., 2013. Manual del sistema de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión: TRANS, versión 2010.1.0. SM14. Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Carmona, P. Rafael, 1987. Transitorios hidráulicos en conductos a presión. Ingeniería hidráulica en México, enero-abril.

Cervera, Luis, 2007. Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua. Estudios Fronterizos, vol. 8, núm. 16, julio-diciembre 2007, pp. 9-41.

Chaudhry, M., 2014. Applied hydraulic transients. 3ª Edición, Springer, pp. 583.

Cisneros, G., 2015. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil: Análisis del golpe de ariete en tuberías con comportamiento viscoelástico. UNAM, Facultad de Ingeniería, México.

Comisión Nacional del Agua, 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Conejos-Médanos (0823), Estado de Chihuahua. Diario Oficial de la Federación, 20 de abril de 2015.

Comisión Nacional del Agua, 2011. Agenda del Agua 2030. Primera ed. México, D.F.: Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.



Comisión Nacional del Agua, 2018. Estadísticas del agua en México. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 4 – Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 10 – Conducciones. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 11 – Fenómenos Transitorios en Líneas de Conducción. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 12 – Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Libro 42 – Mantenimiento y reparación de tuberías y piezas especiales. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Farshad, M., 2006. Plastic Pipe Systems, Failure Investigation and Diagnosis. s.l.:s.n.

Federation of Canadian Municipalities and National Research Council. 2003. Deterioration and inspection of water distribution systems. Issue N° 1.1, pp. 2-24.

Gas Technology Institute. 2009. Plastic Pipe Failure, Risk, and Threat Analysis.

Greenshields, C. J. y 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 N° 24.

Greenshields, C. J. y Leever, P. S., 1996. Rapid Crack Propagation in Plastic Water Pipes: Measurement of Dynamic Fracture Resistance. International Journal of Fracture, Issue N° 79, pp. 85-95.

Greenshields, C. J., Leever, P. S. y Morris, J., 1997. Brittle Fracture of Plastic Water Pipes. Pipes and Pipelines International.

Guarga, R., Sánchez, J., Carmona, R. y Aguilar, R., 1985. Diseño y operación hidráulicos de conducciones de agua a presión. Fascículo II. Llenado, vaciado y operación estacionaria de las conducciones de agua a presión. UNAM, Instituto de Ingeniería, México.

INEGI, agosto 2021. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos_abiertos

Jansen, Jeffrey. Characterization of Plastics in Failure Analysis. Tools and Techniques in Failure Analysis, pp. 439-459.

Junta Municipal del Agua y Saneamiento Ciudad Juárez (JMAS). 2013. Actualización de Plan Maestro para el Mejoramiento de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Juárez, Chihuahua. Resumen ejecutivo.

Junta Municipal del Agua y Saneamiento Ciudad Juárez (JMAS). <https://www.jmasjuarez.gob.mx/v2018/indexveda.php>



Martínez, Ángela, 2018. Relación entre las causas y los modos de fallo de tuberías en la red de distribución de Canal de Isabel II en Madrid. Ribagua. Revista Iberoamericana del Agua, VOL. 5, NO. 1, pp. 16–28.

Minjárez, Gabriela. Falla acueducto construido aquí por empresa de Slim. El diario, 26 de octubre 2014. <https://aguaparatodos.org.mx/falla-acueducto-construido-aqui-por-empresa-de-slim/>

Normas técnicas complementarias para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas. Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6 de octubre de 2004, pp. 78-233

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

Posada, B. Beatriz. La degradación de los plásticos. Revista Universidad Eafit. No.94.

Pozos, Ó., Fairuzov, Y., Sánchez, A. y Rodal, E., 2012. Manual SM13. Análisis de la problemática del aire atrapado en acueductos para mejorar su eficiencia. Primera ed. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería UNAM.

ROTOPLAS®. <https://rotoplas.com.mx/>

Salas, J., 2006. Problemática del Agua y Crecimiento Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. CULCyT, Mayo–Agosto, Año 3, No. 14-15.

Sánchez, José, 1998. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil: Control de los Transitorios Hidráulicos en el acueducto González Ortega II-Ucum II- Chetumal, Quintana Roo. Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. NORMA Oficial Mexicana NOM-001-CONAGUA-2011, Sistemas de agua potable, toma domiciliaria alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba. Diario oficial de la Federación, 17 de febrero de 2012.

Tolentino, Karen, 2015. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería: Propagación rápida de falla en tuberías plásticas. Programa de maestría y doctorado en ingeniería, UNAM, México.

Tzatchkov, V., y Alcocer, V., 2013. Análisis de las fallas en líneas de conducción abastecidas por el acueducto Conejos-Médanos en Ciudad Juárez, Chihuahua. Congreso IMTA, 2013.

Tzatchkov, V. y Alcocer, V., 2013. Non-evident Causes for Material Failure in an Operating Gravity Fed Water Supply Pipeline System. International Journal of Civil Engineering and Building Materials (ISSN 2223-487X) Vol. 3 No.2 2013 © 2013 International Science and Engineering Research Center.

Tzatchkov, V., Alcocer, V. y Bourguett, V., 2006. Diseño de acueductos seguro contra fatiga del material en los transitorios hidráulicos. VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua, Brasil, 5 a 7 de junio de 2006.

White, Frank M., 2009. Fluid Mechanics. 7th edición, Mc Graw Hill, pp.370.