

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. PROBLEMÁTICA DEL AIRE ATRAPADO EN TUBERÍAS

	PAGINA
1.1. INTRODUCCION	3
1.1.1. ORIGEN DEL AIRE ATRAPADO.....	3
1.1.2. PROBLEMAS CAUSADOS POR EL AIRE ATRAPADO.....	4
1.1.3. PATRONES DE FLUJO BIFÁSICO AIRE-AGUA.....	6
1.1.4. SOLUCIONES ACTUALES FRENTE A LA PROBLEMÁTICA DEL AIRE ATRAPADO.....	11
1.2. ANTECEDENTES	12
1.3. OBJETIVO	18

CAPÍTULO 2. TIPOLOGÍA DE VENTOSAS Y SUS FUNCIONES

	PAGINA
2.1. INTRODUCCION	23
2.2. TIPOS DE VENTOSAS SEGÚN LA FUNCIÓN QUE DESEMPEÑEN	25
2.2.1. PURGADORES AUTOMÁTICOS.....	25
2.2.2. VENTOSAS BIFUNCIONALES.....	26
2.2.3. VENTOSAS TRIFUNCIONALES.....	26
2.2.4. VENTOSAS DE ENTRADA DE AIRE (ADUCTORAS).....	27
2.3. VENTOSAS DE GRAN ORIFICIO: VENTOSAS NO CINÉTICAS Y VENTOSAS CINÉTICAS	28
2.3.1. BALANCE DE FUERZAS EN EL FLOTADOR DE UNA VENOSA DE GRAN ORIFICIO.....	28
2.3.2. VENTOSAS NO CINÉTICAS.....	32
2.3.3. VENTOSAS CINÉTICAS.....	33
2.4. DISEÑOS ESPECÍFICOS DE VENTOSAS	35
2.4.1. VENTOSAS PARA AGUAS RESIDUALES.....	35
2.4.2. VENTOSAS DE CIERRE PROGRESIVO.....	35
2.4.3. VENTOSA COMBINADA PARA CONTADORES DE AGUA.....	39
2.4.4. MECANISMOS ADICIONALES PARA DE PROTECCIÓN PARA EVITAR SOBREPRESIONES.....	40
2.5. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE VENTOSAS	48
2.6. UBICACIÓN DE LAS VENTOSAS EN UNA INSTALACIÓN	49
2.7. RECOMENDACIONES GENERALES SOBRE LA UBICACIÓN DE VENTOSAS DE LA AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION	51
2.7.1. TIPOS Y UBICACIONES ACONSEJADAS.....	52

2.7.2. DISEÑO DE LA CAPACIDAD DE DESCARGA DE LAS VENTOSAS.....	55
2.7.2.1. DIMENSIONADO DE UNA VENTOSA EN CASO DE EXPULSIÓN DE AIRE EN UN SISTEMA A PRESIÓN. PURGADOR.....	55
2.7.2.2. DIMENSIONADO DEL DIÁMETRO DEL ORIFICO DE LA VENTOSA EN CASO DE LLENADO DE UNA TUBERÍA.....	57
2.7.2.3. DIMENSIONADO DEL DIÁMETRO DEL ORIFICO DE LA VENTOSA EN CASO DE DRENAJE DE UNA TUBERÍA.....	59
2.7.2.4. DIMENSIONADO DEL DIÁMETRO DEL ORIFICO DE LA VENTOSA EN CASO DE FLUJO POR GRAVEDAD.....	59
2.7.2.5. DIMENSIONADO DEL DIÁMETRO DEL ORIFICO DE LA VENTOSA EN CASOS ESPECIALES.....	63

CAPÍTULO 3. PROGRAMA DE ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA DE VENTOSAS

	PAGINA
3.1. INTRODUCCIÓN.....	69
3.1.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VENTOSAS SOMETIDAS A ENSAYO.....	71
3.2. INSTRUMENTACIÓN.....	73
3.3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.....	78
3.3.1. INSTALACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE DESCARGA Y ADMISIÓN DE LAS VENTOSAS.....	79
3.3.2. INSTALACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LAS VENTOSAS.....	81
3.3.3. INSTALACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LA ADMISIÓN DE AIRE EN SITUACIONES DE SEPARACIÓN DE LA COLUMNA DE AGUA.....	83
3.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	85
3.4.1. PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE DESCARGA Y ADMISIÓN DE LAS VENTOSAS.....	85
3.4.2. PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS DINÁMICOS DE EXPULSIÓN DE AIRE.....	86
3.4.3. PROCEDIMIENTO DE LOS ENSAYOS DINÁMICOS DE ADMISIÓN DE AIRE.....	93
3.4.3.1. VACIADO DE UNA TUBERÍA.....	93
3.4.3.2. SEPARACIÓN DE LA COLUMNA DE AGUA.....	95

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

	PAGINA
4.1. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE EXPULSIÓN Y ADMISIÓN DE AIRE DE UNA VENTOSA.....	102
4.1.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE EXPULSIÓN DE LAS VENTOSAS.....	102
4.1.2. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE EXPULSIÓN DE UNA VENTOSA A PARTIR DE LA NORMA DE VÁLVULAS INDUSTRIALES ISA S75.01.....	107
4.1.2.1. DETERMINACIÓN GRÁFICA DE C_v Y X_T	108
4.1.2.2. DETERMINACIÓN DEL FLUJO MEDIANTE UNA ECUACIÓN PROPORCIONADA POR LA NORMA ISA S75.02.....	112

4.2. ENSAYOS DINÁMICOS DE EXPULSIÓN DE AIRE.....	114
4.2.1. EXPULSION DE AIRE AL FINAL DE UNA CONDUCCIÓN. VENTOSAS DN100.....	115
4.2.1.1 COMPARATIVA PRELIMINAR DEL COMPORTAMIENTO DE DOS VENTOSAS.....	123
4.2.1.2. ESTUDIO DE LAS RELACIONES ENTRE LAS PRINCIPALES VARIABLES DEL TRANSITORIO.....	129
4.2.2. EXPULSIÓN DE AIRE EN UN PUNTO INTERMEDIO DE LA CONDUCCIÓN. VENTOSAS DN100.....	140
4.2.2.1. VARIABLES CARACTERÍSTICAS.....	141
4.2.2.2. CASUÍSTICAS DETECTADAS.....	144
4.2.3. EXPULSIÓN DE AIRE AL FINAL DE UNA CONDUCCIÓN. VENTOSAS DN50.....	148
4.2.3.1. VENTOSA SOBRE LA CONDUCCIÓN.....	149
4.2.3.2. VENTOSA SOBRE CARRETE VERTICAL DE LONGITUD 1,185 m.....	158
4.2.3.3. VENTOSA SOBRE CARRETE VERTICAL DE LONGITUD 2,185 m.....	163
4.2.4. ENSAYOS DE EXPULSIÓN DE AIRE EN UN PUNTO INTERMEDIO DE LA CONDUCCIÓN. VENTOSAS DN50.....	170
4.2.4.1. VENTOSA SOBRE LA CONDUCCIÓN.....	170
4.2.4.2. VENTOSA SOBRE UN CARRETE VERTICAL DE LONGITUD 1,185 m.....	174
4.2.5. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE VENTOSAS, DN100 Y DN50, EN ENSAYOS DE EXPULSIÓN DE AIRE AL FINAL DE LA CONDUCCIÓN.....	180
4.3. ENSAYOS DINÁMICOS DE ADMISIÓN DE AIRE.....	181
4.3.1. ADMISIÓN DE AIRE CON SEPARACIÓN DE LA COLUMNA DE AGUA.....	182
4.3.1.1. SEPARACIÓN DE LA COLUMNA DE AIRE EN LA CONDUCCIÓN DE D= 500 mm..	184
4.3.1.2. SEPARACIÓN DE LA COLUMNA DE AIRE EN LA CONDUCCIÓN DE D= 200 mm..	186
4.3.2. ADMISIÓN DE AIRE DURANTE EL VACIADO DE UNA CONDUCCIÓN.....	188
4.3.2.1 ANÁLISIS DE LA PRESIÓN Y EL CAUDAL EN LOS ENSAYOS DE ADMISIÓN DE AIRE.....	189

CAPÍTULO 5. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL TRANSITORIO AGUA-AIRE

	PAGINA
5.1. INTRODUCCIÓN.....	195
5.2. MODELO NUMÉRICO PARA SIMULAR LA EXPULSIÓN DE AIRE AL FINAL DE UNA TUBERÍA.....	197
5.1.1. ECUACIONES DEL MODELO.....	198
5.1.1.1. BALANCE DIFERENCIAL DE MASA: ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	198
5.1.1.2. BALANCE DIFERENCIAL DE FUERZAS: ECUACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO.....	201
5.1.1.3. ECUACIONES DE LA BOLSA DE AIRE.....	204
5.1.2. RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES MEDIANTE EL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS.....	206
5.1.3. CONDICIONES INICIALES Y CONDICIONES DE CONTORN.....	210
5.3. APLICACIONES DEL MODELO NUMÉRICO	216
5.3.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL FENÓMENO TRANSITORIO FRENTE A DIFERENTES FACTORES.....	217
5.3.2. INFLUENCIA DE DIFERENTES PARÁMETRO EN EL FENÓMENOTRANSITORIO.....	227
5.3.3. SIMULACIÓN DEL TRANSITORIO CON LA INSTALACIÓN Y LA VENTOSA DE DN50..	235

5.4. PROGRAMAS COMERCIALES DE DIMENSIONADO E INSTALACIÓN DE VENTOSAS.....	238
5.4.1. ARI VALVES.....	238
5.4.2. VENT-O-MAT.....	244
5.4.3. APCO VALVES.....	249
5.4.4. HAMMER.....	253
5.4.5. WANDA.....	256
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	263
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS.....	281

LISTADO DE TABLAS Y FIGURAS

CAPÍTULO 1. PROBLEMÁTICA DEL AIRE ATRAPADO EN TUBERÍAS

	PAGINA
Figura 1.1. Medida de caudal en contador ultrasonidos.....	5
Figura 1.2. Medida de caudal en contador electromagnético.....	6
Figura 1.3. Patrones de flujo vertical.....	8
Figura 1.4. Patrones de flujo horizontal.....	9
Figura 1.5. Mapa de flujo bifásico en tubería horizontal.....	10
Figura 1.6. Mapas de flujo bifásico en tubería inclinada.....	10
Figura 1.7. Mapa de flujo bifásico en tubería vertical.....	11

CAPÍTULO 2. TIPOLOGÍA DE VENTOSAS Y SUS FUNCIONES

	PAGINA
Figura 2.1. Utilización de una ventosa trifuncional en un pozo.....	24
Figura 2.2. Ventosas en arqueta a la salida de un pozo.....	24
Figura 2.3. Ventosa en depósito.....	25
Figura 2.4. Purgador automático.....	26
Figura 2.5. Esquema del interior de una ventosa trifuncional de doble cuerpo.....	27
Figura 2.6. Ventosas trifuncionales instaladas en arquetas.....	27
Figura 2.7. Balance de fuerzas sobre el flotador durante la admisión de aire.....	29
Figura 2.8. Balance de fuerzas sobre el flotador durante la expulsión de aire.....	31
Figura 2.9. Ventosa cinética de ACMO Spa.....	34
Figura 2.10. Fuga de agua por una ventosa. Ensayos de laboratorio.....	34
Figura 2.11. Ventosa para aguas residuales de ARI.....	35
Figura 2.12. Expulsión de aire.....	36
Figura 2.13. Deceleración de la columna de agua.....	36
Figura 2.14. Purgador.....	37
Figura 2.15. Admisión de aire.....	37
Figura 2.16. Expulsión de grandes cantidades de aire.....	38
Figura 2.17. Salida de aire por orificio de menor tamaño.....	38
Figura 2.18. Purgador.....	39
Figura 2.19. Admisión de aire.....	39
Figura 2.20. Ventosa para contador Metair modelo M-40.....	40
Figura 2.21. Esquema de los componentes de la ventosa combinada.....	40
Figura 2.22. Esquema de calderín.....	41
Figura 2.23. Tanque unidireccional.....	42
Figura 2.24. Ventosa de cierre lento.....	43
Figura 2.25. Apco Valves. Funcionamiento del cierre lento.....	43
Figura 2.26. Ventosa controlada hidráulicamente.....	44
Figura 2.27. Ventosa antirretorno.....	45
Figura 2.28. Disposición de las ventosas y otros elementos.....	45

Figura 2.29. Puesta en marcha de la bomba.....	47
Figura 2.30. Parada de la bomba.....	48
Figura 2.31. Ventosas en puntos elevados de una instalación.....	52
Figura 2.32. Ventosas en cambio de pendiente creciente.....	52
Figura 2.33. Ventosa en cambio de pendiente creciente.....	53
Figura 2.34. Ventosas en tramos largos de tuberías descendentes.....	53
Figura 2.35. Ventosas en tramos largos de tuberías ascendentes.....	53
Figura 2.36. Ventosa en la tubería de impulsión de una bomba.....	54
Figura 2.37. Ventosa en la salida de un pozo.....	54
Figura 2.38. Ventosa en un sifón.....	55
Figura 2.39. Tabla para determinar el tamaño del orificio del purgador de una ventosa.....	57
Figura 2.40. Diagrama para determinar el tamaño del orificio del purgador.....	57
Figura 2.41. Tabla para determinar el diámetro de una ventosa en caso de llenado de tubería.....	58
Figura 2.42. Gráfico para determinar el diámetro de una ventosa en caso de llenado de tubería.....	59
Figura 2.43. Tabla para determinar el diámetro de una ventosa en caso de rotura de tubería por gravedad.....	60
Figura 2.44. Gráfico para determinar el diámetro de una ventosa en caso de rotura de tubería por gravedad.....	61
Figura 2.45. Gráfico para determinar el diámetro del orificio de gran tamaño en entrada de aire.....	62
Figura 2.46. Arqueta para ventosa.....	63
Figura 2.47. Ventosas en arqueta.....	64

CAPÍTULO 3. PROGRAMA DE ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA DE VENTOSAS

	PAGINA
Figura 3.1. Fotografías de las ventosa A y B durante los ensayos.....	71
Figura 3.2. Características constructivas de la ventosa A.....	72
Figura 3.3. Características constructivas de la ventosa B.....	72
Figura 3.4. Transductores de presión.....	74
Figura 3.5. Esquema componentes transductor de presión marca Kistler.....	74
Figura 3.6. Transductor de presión instalado sobre la tubería.....	75
Figura 3.7. Transductor de presión P1.....	75
Figura 3.8. Caudalímetro electromagnético DN500 y DN200.....	75
Figura 3.9. Caudalímetro tipo vórtex DN25 en by-pass.....	76
Figura 3.10. Transductor de posición marca HBM.....	76
Figura 3.11. Tubo piezométrico en depósito 1.....	77
Figura 3.12. Válvula de mariposa BV1 junto a la ventosa.....	77
Figura 3.13. Depósito de agua con válvula de mariposa BV2 en la parte superior.....	78
Figura 3.14. Instalación para la determinación de la capacidad de descarga/admisión de aire.....	80
Figura 3.15. Instalación para los ensayos en flujo permanente. Detalle del By-pass.....	80
Figura 3.16. Depósito que contiene aire.....	80
Figura 3.17. Esquema de la ubicación de la instrumentación sobre la instalación.....	81
Figura 3.18. Montaje de la ventosa en el punto más elevado de la conducción.....	81

Figura 3.19. Dimensiones de la instalación para la determinación del comportamiento dinámico de las ventosas.....	83
Figura 3.20. Instalación con ventosa y válvula de retención.....	84
Figura 3.21. Sistema de bombeo.....	84
Figura 3.22. Medidas generales de la instalación para el estudio de la admisión de aire.....	85
Figura 3.23. Proceso de expulsión de aire al final de la conducción. Etapa 1.....	87
Figura 3.24. Proceso de expulsión de aire al final de la conducción. Etapa 2.....	87
Figura 3.25. Proceso de expulsión de aire al final de la conducción. Etapa 3.....	88
Figura 3.26. Proceso de expulsión de aire al final de la conducción. Etapa 4.....	88
Figura 3.27. Proceso de expulsión de aire en un punto intermedio de la conducción. Etapa 1.....	89
Figura 28. Proceso de expulsión de aire en un punto intermedio de la conducción. Etapa 2.....	89
Figura 3.29. Proceso de expulsión de aire en un punto intermedio de la conducción. Etapa 3.....	90
Figura 3.30. Proceso de expulsión de aire en un punto intermedio de la conducción. Etapa 4.....	90
Figura 3.31. Proceso de expulsión de aire en un punto intermedio de la conducción. Etapa 5.....	91
Figura 3.32. Esquema de la disposición del carrete vertical.....	91
Figura 3.33. Ventosa sobre carrete vertical.....	92
Figura 3.34. Expulsión de aire con la ventosa sobre un carrete vertical.....	92
Figura 3.35. Proceso de admisión de aire en la conducción. Etapa 1.....	94
Figura 3.36. Proceso de admisión de aire en la conducción. Etapa 2.....	95
Figura 3.37. Proceso de admisión de aire en la conducción. Etapa 3.....	95
Figura 3.38. Esquema instalación para el estudio de la separación de la columna de agua.....	96
Figura 3.39. Depósito de agua.....	96
Figura 3.40. Proceso para el estudio de la separación de la columna de agua. Etapa 1.....	97
Figura 3.41. Proceso para el estudio de la separación de la columna de agua. Etapa 2.....	97
Tabla 3.1. Características de las conducciones.....	82
Tabla 3.2. Características metrológicas de la instalación.....	82
Tabla 3.3. Ensayos de expulsión realizados en el laboratorio.....	93

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

PAGINA

Figura 4.1. Factor de calibración del caudalímetro vórtex de 200 mm de diámetro.....	103
Figura 4.2. Caudal nominal en ensayos para la determinación de la capacidad de expulsión de aire de las ventosas.....	104
Figura 4.3. Caudal nominal en ensayos para la determinación de la capacidad de admisión de aire de las ventosas.....	104
Figura 4.4. Caudal nominal en ensayos para la determinación del coeficiente de expulsión de aire de las ventosas.....	105
Figura 4.5. Coeficiente de descarga de las ventosas.....	106
Figura 4.6. Cálculo de X_t	110
Figura 4.7. Cálculo de X_t para diferentes aperturas de la ventosa.....	111
Figura 4.8 Cálculo de X_t . Ventosa B DN50.....	112
Figura 4.9. Comparación entre caudales calculados y caudales medidos.....	113
Figura 4.10. Comparación gráfica de dos ensayos de expulsión de aire similares con ventosas DN100. Ensayos A17 y B28.....	116

Figura 4.11. Comparación gráfica de dos ensayos de expulsión de aire similares con ventosas DN100. Ensayos A18 y B30.....	117
Figura 4.12. Comparación gráfica de dos ensayos de expulsión de aire similares con ventosas DN100. Ensayos A19 y B33.....	117
Figura 4.13. Comparación gráfica de dos ensayos de expulsión de aire similares con ventosas DN100. Ensayos A20 y B31.....	117
Figura 4.14. Comparación gráfica de dos ensayos de expulsión de aire similares con ventosas DN100. Ensayos A21 y B32.....	118
Figura 4.15. Comparación gráfica del cierre del flotador en dos ensayos similares de ventosas DN10.....	118
Figura 4.16. Variables principales en un ensayo de expulsión de aire.....	120
Figura 4.17. Definición de la velocidad del flujo en cada instante de tiempo.....	120
Figura 4.18. Medida de las alturas iniciales de la columna de agua: L1, L2.....	123
Figura 4.19. Presión máxima en ensayos similares de dos ventosas diferentes.....	125
Figura 4.20. Variación de la velocidad del flujo en ensayos similares de dos ventosas diferentes.....	125
Figura 4.21. Variación de la velocidad del flujo en ensayos similares de dos ventosas diferentes.....	126
Figura 4.22. Volumen de agua circulado en ensayos similares de ventosas diferentes.....	126
Figura 4.23. Relaciones de velocidades.....	127
Figura 4.24. Duración del cierre.....	128
Figura 4.25. Relaciones entre dos instantes de tiempo.....	129
Figura 4.26. Evolución dv/dt_{cz} con la presión máxima.....	130
Figura 4.27. Evolución dv/dt_{cz} con Δp	131
Figura 4.28. Velocidad de llegada de la columna de agua frente a Δp	131
Figura 4.29. Evolución de la deceleración dv/dt_{cz} con la anchura del pico.....	132
Figura 4.30. Evolución dv/dt_{cz} con la duración del cierre de la ventosa.....	133
Figura 4.31. Evolución de la anchura del pico de presión con la sobrepresión aplicada.....	134
Figura 4.32. Evolución de la anchura del pico de presión con la duración del cierre de la ventosa.....	134
Figura 4.33. Evolución de la presión máxima con la anchura del pico de presión.....	135
Figura 4.34. Evolución de la anchura del pico de presión con la suma de caudales.....	136
Figura 4.35. Evolución de la presión máxima con la sobrepresión aplicada.....	137
Figura 4.36. Evolución de la suma de caudales con la sobrepresión aplicada.....	137
Figura 4.37. Evolución de la suma de caudales con V_{min}/V_o	138
Figura 4.38. Evolución de la presión máxima con la suma de caudales.....	139
Figura 4.39. Presión máxima según velocidad de llegada a la ventosa.....	139
Figura 4.40. Evolución de la presión máxima con la sobrepresión aplicada.....	142
Figura 4.41. Evolución de la velocidad mínima con la sobrepresión aplicada.....	143
Figura 4.42. Evolución de la presión máxima con la velocidad mínima.....	143
Figura 4.43. Presión máxima según la velocidad de llegada a la ventosa.....	144
Figura 4.44. Fuga de agua a través de la ventosa.....	145
Figura 4.45. Ensayo de la ventosa a. oscilaciones en el pico de presión.....	145
Figura 4.46. Oscilaciones en la curva de presión y desplazamiento del flotador.....	146
Figura 4.47. Ensayo de la ventosa a. rebote del flotador y oscilaciones en la presión.....	146
Figura 4.48. Evolución general de un ensayo de la ventosa b. presión máxima.....	147
Figura 4.49. Detalle de la ventosa sobre carrete vertical.....	149
Figura 4.50. Presiones máximas según la sobrepresión inicial.....	150
Figura 4.51. Relación entre la presión máxima y la anchura del pico de presión máxima.....	151

Figura 4.52. Presión máxima cuando la ventosa está sobre la conducción.....	151
Figura 4.53. Secuencia de cierres de la ventosa.....	152
Figura 4.54. Presión máxima en segundo cierre.....	153
Figura 4.55. Oscilaciones de la presión en múltiples cierres.....	153
Figura 4.56. Presión máxima en ventosa A, DN50.....	156
Figura 4.57. Evolución del ensayo.....	156
Figura 4.58. Evolución general del ensayo.....	155
Figura 4.59. Presión máxima en ensayos de la ventosa B en el punto más elevado de la conducción.....	155
Figura 4.60. Sucesión de cierres de la ventosa y presión máxima.....	156
Figura 61. Oscilaciones de presión y cierres de la ventosa DN50 con valores de sobrepresión intermedios.....	156
Figura 4.62. Presión máxima en el segundo cierre de la ventosa.....	157
Figura 4.63. Presión máxima. Ventosa B.....	157
Figura 4.64. Relación entre la frecuencia de cierres y la oscilación de la presión en ensayos con ventosa DN50.....	158
Figura 4.65. Relación entre la frecuencia de cierres y la oscilación de la presión.....	158
Figura 4.66. Presión máxima en ensayos con ventosa sobre carrete vertical corto.....	159
Figura 4.67. Presión máxima y anchura del pico de presión en ensayos con ventosa sobre carrete vertical corto.....	160
Figura 4.68. Evolución general de un ensayo con ventosa A DN50 sobre carrete vertical corto.....	161
Figura 4.69. Evolución general de un ensayo con ventosa A DN50 sobre carrete vertical corto con una velocidad de llegada menor.....	161
Figura 4.70. Evolución general de un ensayo con ventosa B sobre carrete vertical corto.....	162
Figura 4.71. Ensayo con la ventosa B sobre carrete vertical corto con sobrepresión inicial menor de 2 m.c.a.....	162
Figura 4.72. Ensayo con la ventosa B sobre carrete vertical corto con sobrepresión inicial mayor de 2 m.c.a.....	163
Figura 4.73. Presión máxima en ensayos con ventosas sobre carrete vertical largo.....	164
Figura 4.74. Comparación de resultados entre los tres tipos de ensayos de expulsión de aire al final de la conducción con ventosa DN50.....	164
Figura 4.75. Presión máxima frente a la anchura del pico de presión en ventosas sobre carrete vertical largo.....	165
Figura 4.76. Evolución general de un ensayo con la ventosa A montada sobre un carrete vertical largo. Sobrepresion inicial = 1,9 m.c.a.....	166
Figura 4.77. Evolución de un ensayo con la ventosa A montada sobre un carrete vertical largo. Sobrepresion inicial = 2,6 m.c.a.....	166
Figura 4.78. Evolución de un ensayo con la ventosa A montada sobre un carrete vertical largo. Sobrepresion inicial = 3,03 m.c.a.....	167
Figura 4.79. Evolución de un ensayo con la ventosa A montada sobre un carrete vertical largo. Sobrepresion inicial = 2,22 m.c.a.....	167
Figura 4.80. Evolución de un ensayo con la ventosa A montada sobre un carrete vertical largo. Sobrepresion inicial = 1,65 m.c.a.....	168
Figura 4.81. Evolución de un ensayo con la ventosa A montada sobre un carrete vertical largo. Sobrepresion inicial = 1,87 m.c.a.....	168
Figura 4.82. Evolución de un ensayo con la ventosa B montada sobre un carrete vertical largo. Sobrepresion inicial = 2,99 m.c.a.....	169

Figura 4.83. Evolución de un ensayo con la ventosa B montada sobre un carrete vertical largo. Sobrepresión inicial = 3,07 m.c.a.....	169
Figura 4.84. Presión máxima en ensayos de expulsión de aire un punto intermedio instalación. Ventosas DN50.....	171
Figura 4.85. Presión máxima frente a la anchura del pico de presión en ensayos de expulsión de aire en un punto intermedio instalación. Ventosas DN50.....	172
Figura 4.86. Evolución general de un ensayo de la ventosa A sobre conducción y en punto intermedio de la instalación. Sobrepresión inicial = 2,23 m.c.a.....	173
Figura 4.87. Evolución general de un ensayo de la ventosa B sobre conducción y en punto intermedio de la instalación. Sobrepresión inicial = 2,51 m.c.a.....	173
Figura 4.88. Relación entre la presión máxima y la sobrepresión aplicada.....	174
Figura 4.89. Comparación entre las presiones máximas obtenidas en ensayos de expulsión de aire a través de una ventosa situada sobre la t o al final de un carrete vertical corto.....	175
Figura 4.90. Relación entre la presión máxima y la anchura del pico de presión en expulsión de aire en un punto intermedio de la instalación con ventosa sobre carrete vertical corto.....	176
Figura 4.91. Cierre parcial de la ventosa y pico de presión.....	177
Figura 4.92. Movimiento del flotador de la ventosa A DN50 y presión medida.....	177
Figura 4.93. Movimiento del flotador de la ventosa A DN50 y presión medida.....	178
Figura 4.94. Presión en el cuello la ventosa.....	178
Figura 4.95. Ondulaciones en el perfil de la onda de presión.....	179
Figura 4.96. Presión máxima frente a la velocidad en el instante que aumenta la presión.....	180
Figura 4.97. Velocidad cuando aumenta la presión frente a la sobrepresión inicial.....	181
Figura 4.98. Presión máxima frente a la sobrepresión inicial.....	181
Figura 4.99. Variación de la velocidad de la columna de agua en ensayo de admisión de aire a través de una ventosa debido al cierre de una válvula.....	183
Figura 4.100. Separación columna de agua. Ensayo sin y con ventosa.....	184
Figura 4.101. Presiones máximas y deceleración del flujo en ensayos de cierre de válvula de retención por inversión del flujo.....	185
Figura 4.102. Velocidad mínima y presión máxima en ensayos de cierre de válvula de retención por inversión del flujo.....	185
Figura 4.103. Velocidad mínima y presión máxima en ensayos de cierre de válvula de retención por inversión del flujo.....	185
Figura 4.104. Relación entre la presión máxima y la duración de la depresión.....	186
Figura 4.105. Relación entre la velocidad mínima, la duración de la depresión y la sobrepresión inicial aplicada en ensayos con y sin ventosa.....	186
Figura 4.106. Presión aguas arriba y aguas abajo de la válvula de retención.....	187
Figura 4.107. Medida de la presión en el lado de las bajas presiones.....	187
Figura 4.108. Duración de la depresión frente a la sobrepresión que invierte el flujo.....	188
Figura 4.109. Evolución de un ensayo de admisión de aire a través de una ventosa.....	189
Figura 4.110. Presión mínima medida junto a la ventosa.....	189
Figura 4.111. Caudales mínimos registrados durante los ensayos.....	190
Figura 4.112. Evolución general de un ensayo de admisión de aire.....	190
Tabla 4.1. Coeficientes de descarga promedio según el grado de apertura de la ventosa.....	106
Tabla 4.2. C_v y X_T según el grado de apertura de la ventosa.....	111
Tabla 4.3. Comparación de los resultados numéricos de algunas variables en ensayos similares de dos ventosas diferentes.....	116

CAPÍTULO 5. MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL TRANSITORIO AGUA-AIRE

PAGINA

Figura 5.1. Experimento de Thorley y Spurret (1990).....	196
Figura 5.2. Fases en la resolución del transitorio.....	197
Figura 5.3. Balance de masa.....	199
Figura 5.4. Celeridad del fluido según la proporción de gas y líquido.....	201
Figura 5.5. Balance de fuerzas.....	202
Figura 5.6. Esquema del método de las características.....	208
Figura 5.7. Esquema del método de las características.....	211
Figura 5.8. Esquema de la instalación introducida en el modelo.....	213
Figura 5.9. Expulsión de aire con ventosa A DN100, $\Delta P = 3,31$ m.....	223
Figura 5.10. Expulsión de aire con ventosa A DN100, $\Delta P = 3,43$ m.....	223
Figura 5.11. Expulsión de aire con ventosa A DN100, $\Delta P = 3,57$ m.....	224
Figura 5.12. Expulsión de aire con ventosa A DN100, $\Delta P = 3,78$ m.....	224
Figura 5.13. Expulsión de aire con ventosa A DN100, $\Delta P = 3,79$ m.....	224
Figura 5.14. Expulsión de aire con ventosa A DN100, $\Delta P = 3,94$ m.....	225
Figura 5.15. Expulsión de aire con ventosa A DN100, $\Delta P = 3,36$ m.....	225
Figura 5.16. Expulsión de aire con ventosa B DN100, $\Delta P = 3,52$ m.....	226
Figura 5.17. Expulsión de aire con ventosa B DN100, $\Delta P = 3,98$ m.....	226
Figura 5.18. Expulsión de aire con ventosa B DN100, $\Delta P = 3,85$ m.....	226
Figura 5.19. Expulsión de aire con ventosa B DN100, $\Delta P = 3,91$ m.....	227
Figura 5.20. Expulsión de aire con ventosa A DN100. datos de partida.....	228
Figura 5.21. Efectos sobre el transitorio al modificar k	229
Figura 5.22. Efectos sobre el transitorio al modificar t_{cierre}	230
Figura 5.23. Efectos sobre el transitorio del C_d	231
Figura 5.24. Efectos sobre el transitorio al modificar C_d	231
Figura 5.25. Efectos sobre el transitorio al modificar f	232
Figura 5.26. Efectos sobre el transitorio al modificar la longitud del tubo.....	233
Figura 5.27. Efectos sobre el transitorio al modificar el volumen de aire.....	234
Figura 5.28. Presión medida y calculada en ventosas A y B, DN50.....	237
Figura 5.29 Coeficiente de Hazen Williams según el material de la tubería.....	239
Figura 5.30. Entrada de datos del perfil de la instalación.....	240
Figura 5.31 Punto de rotura.....	242
Figura 5.32. Perfil de la instalación.....	243
Figura 5.33. Selección de la ventosa.....	243
Figura 5.34. Selección del tipo de sistema.....	244
Figura 5.35. Análisis que efectúa el programa VENTOMAT.....	247
Figura 5.36. Pantalla de resultados.....	247
Figura 5.37. Tabla de resultados.....	248
Figura 5.38. Pantalla de resultados del estudio económico.....	248
Figura 5.39. Pantalla inicial del programa.....	249
Figura 5.40. Datos iniciales.....	250
Figura 5.41. Información de diseño del sistema.....	250
Figura 5.42. Datos del perfil de la instalación.....	251
Figura 5.43. Elección de la presión de colapso.....	251

Figura 5.44. Elección del orificio de salida de la ventosa.....	252
Figura 5.45. Elección del tamaño del orificio de entrada de aire.....	252
Figura 5.46. Tabla de las ventosas disponibles en el catálogo de APCO.....	253
Figura 5.47. Dispositivos de control disponibles.....	254
Figura 5.48. Representación gráfica del transitorio.....	254
Figura 5.49. Tabla de resultados.....	255
Figura 5.50. Resultados gráficos.....	255
Figura 5.51. Gráficas de resultados.....	256
Figura 5.52. Mapas de colores.....	256
Figura 5.53. Módulos de los que consta el programa.....	257
Figura 5.54. Curvas de la bomba.....	258
Figura 5.55. Salida de datos en diferentes idiomas.....	258
Tabla 5.1. Tabla de rugosidades del material.....	245
LISTADO DE SÍMBOLOS.....	Ai