

# FACULTAD DE INGENIERÍA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL PREGRADO EN INGENIERÍA CIVIL

Presentado por:

#### DANIEL RICARDO VARELA ROMERO

### COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO EN CÁMARAS DE INSPECCIÓN DE 90 GRADOS CON FLUJO SUPERCRÍTICO: MODELACIÓN FÍSICA.

Asesorado por:

JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA

Diciembre de 2013





El presente documento es el resultado de una investigación realizada como proyecto de grado, por medio del cual finalizo mi pregrado como ingeniero civil de la Universidad de los Andes.





# CONTENIDO

1.	IN	ITRC	DDUCCIÓN	1
1.1	L	OBJ	JETIVOS	2
	Obje	etivo	General	2
	Obje	etivo	s Específicos	2
2.	A١	NTE	CEDENTES	3
3.	M	ARC	CO CONCEPTUAL	7
	3.1	Ċ	Generalidades	7
	3.2	C	Caracterización del flujo	7
	3.3	P	Propiedades geométricas de tubería circular fluyendo parcialmente llena	9
	3.4	F	lujo supercrítico en cámaras de unión de 90° (Gissoni y Hager, 2002)	11
	3.4	4.1	Descripción del experimento	11
	3.4	4.2	Resultados	12
	3.5	C	Comportamiento Hidráulico de Cámaras de Inspección Bajo Condiciones de Flu	јо
	Supe	ercrí	tico (CIACUA ,2011)	16
	3.5.1	1	Descripción del experimento	16
	3.5.2	2	Resultados	17
	3.	5.2.	1 Patrones de ondas en flujo directo	17
	3.	5.2.	2 Patrones de ondas en flujo lateral	19
	3.	5.2.	3 Patrones de ondas en unión de flujos	21
4.	DI	ISEÑ	IO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO	26
	5.1.	۵	DESCRIPCIÓN DEL MODELO	26
	5.2.	C	CANAL DE CONDUCCIÓN O CAÑUELA	29
	5.2	2.1.	Diseño	29
	5.2	2.2.	Proceso Constructivo	31
	5.3.	I	NSTRUMENTACIÓN DEL MODELO	36
	5.3	3.1.	Estructura de medición de niveles	





	5.3.	.2. Instrumentos de medición	37
6.	PRC	DCEDIMIENTO DE MEDICIÓN	
7.	ANÁ	ÁLISIS DE RESULTADOS	42
	7.1.	Análisis de ondas	42
	7.1.1.	Flujo directo	42
	7.1.2.	Flujo lateral	44
	7.1.3.	Unión de flujos	47
8.	CON	NCLUSIONES	51
9.	REC	COMENDACIONES	53
1(	). B	BIBLIOGRAFÍA	54
11	L. A	ANEXOS	55





# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Caracterización del flujo según número de Froude . Hager (2002)8
Tabla 2.Tabla técnica de sensores de caudal
Tabla 3. Tabla técnica de sensores de nivel
Tabla 4.Optimizacíon del orden de medición de las configuraciones40
Tabla 5. Orden de medición de las distintas configuraciones en el montaje41
Tabla 6. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 1.55
Tabla 7. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 2.
Tabla 8. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 356
Tabla 9. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 456
Tabla 10. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 557
Tabla 11. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 6. 57
Tabla 12. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 7.58
Tabla 13. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0Do - Prueba No 158
Tabla 14. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0Do - Prueba No 2. 59
Tabla 15. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0Do - Prueba No 3. 59
Tabla 16. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0Do - Prueba No 4. 60
Tabla 17. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 160
Tabla 18. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 261
Tabla 19. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 361
Tabla 20. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 462
Tabla 21. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 562
Tabla 22.Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 663
Tabla 23.Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 763
Tabla 24. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída ODo - Prueba No 864
Tabla 25. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 164
Tabla 26. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 265
Tabla 27. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 365
Tabla 28. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 466
Tabla 29. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 566
Tabla 30. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 167
Tabla 31. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 267
Tabla 32. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 368
Tabla 33. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 468
Tabla 34. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 569





Tabla 35. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 6. ......69 Tabla 36. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 7. ......70 Tabla 37. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 8. ......70 Tabla 38. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas 0Do - Prueba No 1. ....71 Tabla 39. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas 0Do - Prueba No 2. .....72 Tabla 40. Propiedades geométricas e hidráulicas-Fluio directo para caídas 0Do - Prueba No 3. .....73 Tabla 41. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas ODo - Prueba No 4. .....74 Tabla 42. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas ODo - Prueba No 5 ......75 Tabla 43. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas ODo - Prueba No 6. .....76 Tabla 44. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas ODo - Prueba No 7. .....77 Tabla 45. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caídas ODo - Prueba No 1......78 Tabla 46. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caídas ODo - Prueba No 2......79 Tabla 47. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caídas ODo - Prueba No 3......80 Tabla 48. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caídas ODo - Prueba No 4......81 Tabla 49. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 1...82 Tabla 50. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 2...83 Tabla 51. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas ODo - Prueba No 3...84 Tabla 52. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 4..85 Tabla 53. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 5...86 Tabla 54. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 6. ..87 Tabla 55. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 7...88 Tabla 56. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas ODo - Prueba No 8. ..89 Tabla 57. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75Do - Prueba No Tabla 58. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75Do - Prueba No Tabla 59. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75 Do - Prueba No Tabla 60. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75 Do - Prueba No Tabla 61. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75Do - Prueba Tabla 62. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 1......95 Tabla 63. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba 





Tabla 64. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba
No 397
Tabla 65. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba
No 4
Tabla 66.Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba
No 5
Tabla 67. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba
No 6100
Tabla 68. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba
No 7101
Tabla 69. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba
No 8





# **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Propiedades geométricas de una sección circular fluyendo parcialmente llena. FUEN	TE:
Notas de clase de sistemas integrados de drenaje urbano, Juan Saldarriaga	9
Figura 2. Configuración del experimento de Hager y Gissoni (2002)	11
Figura 3.Onda tipo A (Flujo directo).	17
Figura 4.Ondas tipo C y D (Flujo lateral).	19
Figura 5.Ondas tipo E (Unión de flujos)	21
Figura 6. Detalle de la cámara de inspección.	26
Figura 7. Detalle del montaje experimental realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la	
Universidad de los Andes	28
Figura 8. Diseño del canal de conducción (Cañuela)	30
Figura 9. Modelo tridimensional para el diseño del canal de conducción	31
Figura 10. Detalle de la estructura de medición de niveles en la cámara	36
Figura 11. Análisis de curva de remanso para unión de flujos	49
Figura 12.Perfil del Flujo directo para caída ODo - Prueba No 1	71
Figura 13.Perfil del Flujo directo para caída ODo - Prueba No 2	72
Figura 14.Perfil del Flujo directo para caída ODo - Prueba No 3	73
Figura 15.Perfil del Flujo directo para caída ODo - Prueba No 4	74
Figura 16.Perfil del Flujo directo para caída ODo - Prueba No 5	75
Figura 17.Perfil del Flujo directo para caída ODo - Prueba No 6	76
Figura 18.Perfil del Flujo directo para caída ODo - Prueba No 7	77
Figura 19.Perfil del Flujo lateral para caída ODo - Prueba No 1	78
Figura 20.Perfil del Flujo lateral para caída ODo - Prueba No 2	79
Figura 21.Perfil del Flujo lateral para caída ODo - Prueba No 3.	80
Figura 22.Perfil del Flujo lateral para caída ODo - Prueba No 4.	81
Figura 23.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 1	82
Figura 24.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 1	82
Figura 25.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 2	83
Figura 26.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 2	83
Figura 27.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 3	84
Figura 28.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 3	84
Figura 29.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 4	85
Figura 30.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 4	85
Figura 31.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 5	86
Figura 32.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 5	86
Figura 33.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 6	87





Figura 34.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 687
Figura 35.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 788
Figura 36.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 788
Figura 37.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 8
Figura 38.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída ODo - Prueba No 8
Figura 39.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 190
Figura 40.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 291
Figura 41.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 392
Figura 42.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 493
Figura 43.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 594
Figura 44. Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 195
Figura 45. Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 195
Figura 46.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 296
Figura 47. Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 296
Figura 48. Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 397
Figura 49.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 397
Figura 50.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 498
Figura 51.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 498
Figura 52. Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 599
Figura 53.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 599
Figura 54. Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 6100
Figura 55 .Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 6100
Figura 56.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 7101
Figura 57. Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 7101
Figura 58.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 8102
Figura 59.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 8102





# ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Cámara de inspección utilizada	27
Fotografía 2.Estructura de conexión.	27
Fotografía 3. Modelo construido en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Ande	es29
Fotografía 4. Molde de espuma	32
Fotografía 5. Proceso de lijado del primer molde	32
Fotografía 6. Pulimiento con masilla gruesa	32
Fotografía 7. Pulimiento con masilla fina	32
Fotografía 8. Anillos de acero para segundo molde	33
Fotografía 9. Lamina de poliestireno para segundo molde	33
Fotografía 10. Lubricación del molde terminado	34
Fotografía 11. Fundición de la fibra de vidrio	34
Fotografía 12. Definición de aristas del modelo	34
Fotografía 13. Pulimiento final de detalles	34
Fotografía 14. Cañuela terminada (A)	35
Fotografía 15. Cañuela terminada (B)	35
Fotografía 16.Estructura de medición de nivel en tuberías	36
Fotografía 17. Caudalímetro tuberías	37
Fotografía 18. Pantalla del caudalímetro	37
Fotografía 19. Sensor de medición de nivel de flujo	38
Fotografía 20. Formación de Onda tipo A en flujo directo	43
Fotografía 21. Extensión de la Onda tipo A hacia la tubería de salida	44
Fotografía 22. Formación de onda tipo C en flujo lateral (Vista hacia adentro)	45
Fotografía 23. Formación de onda tipo C en flujo lateral (Vista desde adentro)	45
Fotografía 24. Riesgo de obstrucción de tubería de salida por onda C	46
Fotografía 25. Represamiento de agua en tubería principal por flujo lateral	46
Fotografía 26. Tipos de ondas característicos de unión de flujos	48
Fotografía 27. Formación de resalto hidráulico en la entrada de la tubería principal del sistem	a48
Fotografía 28. Riesgo de sobrecarga en unión de flujos por formación de resaltos hidráulicos.	49





# ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Número de Froude para conductos circulares parcialmente llenos	7
Ecuación 2.Simplificación de la ecuación de número de Froude (Hager ,1999)	3
Ecuación 3.Ángulo que describe la sección transversal mojada10	)
Ecuación 4.Área Mojada10	)
Ecuación 5.Ancho Superficial10	)
Ecuación 6.Profundidad Hidráulica10	)
Ecuación 7.Perímetro Mojado10	)
Ecuación 8.Radio Hidráulico10	)
Ecuación 9.Altura Relativa Onda B. Fuente: (Gissoni y Hager ,2002)	2
Ecuación 10.Altura Relativa Onda J. Fuente: (Gissoni y Hager ,2002)	3
Ecuación 11.Localización en x de la Onda J. Fuente: (Gissoni y Hager, 2002)	3
Ecuación 12. Altura Relativa Onda S para flujo directo. Fuente: (Gissoni y Hager ,2002)13	3
Ecuación 13.Altura Relativa Onda S para flujo lateral. Fuente: (Gissoni y Hager ,2002)14	1
Ecuación 14.Altura Relativa Onda S para unión de flujos. Fuente: (Gissoni y Hager ,2002)14	1
Ecuación 15. Capacidad de descarga de la cámara para flujo solo directo o lateral. Fuente: (Gissoni	
y Hager, 2002)15	5
Ecuación 16. Número de Froude de descarga máximo de la cámara para flujo solo directo o lateral.	•
Fuente: (Gissoni y Hager, 2002)15	5
Ecuación 17. Número de Froude de descarga máximo de la cámara para unión de flujos. Fuente:	
(Gissoni y Hager, 2002)	5
Ecuación 18.Altura de la cañuela usada por CIACUA,201116	5
Ecuación 19.Regresión para altura máxima Onda tipo A, incluidas todas las variables. Fuente:	
(CIACUA,2011)	3
Ecuación 20.Regresión para altura máxima Onda tipo A, sin incluir todas las variables. Fuente:	
(CIACUA, 2011)	3
Ecuación 21. Altura máxima Onda tipo A. Fuente: (CIACUA, 2011)18	3
Ecuación 22. Relación de llenado de la tubería de entrada principal. Fuente: (CIACUA, 2011)18	3
Ecuación 23.Número de Froude de la tubería de entrada principal. Fuente: (CIACUA, 2011)18	3
Ecuación 24. Caída de la tubería de entrada principal. Fuente: (CIACUA, 2011)	)
Ecuación 25. Regresión para altura máxima Onda tipo C en flujo lateral, incluidas todas las	
variables. Fuente: (CIACUA,2011)20	)
Ecuación 26. Regresión para altura máxima Onda tipo C en flujo lateral, sin incluir todas las	
variables. Fuente: (CIACUA, 2011)20	)
Ecuación 27. Altura máxima Onda tipo C. Fuente: (CIACUA, 2011)	)
Ecuación 28. Relación de llenado de la tubería de entrada lateral. Fuente: (CIACUA, 2011)20	)





Ecuación 29. Número de Froude de la tubería de entrada lateral. Fuente: (CIACUA, 2011)21
Ecuación 30. Caída de la tubería de entrada lateral. Fuente: (CIACUA, 2011)21
Ecuación 31. Regresión para altura máxima Onda tipo C en unión de flujos, incluidas todas las
variables. Fuente: (CIACUA, 2011)23
Ecuación 32. Regresión para altura máxima Onda tipo C en unión de flujos, sin incluir todas las
variables. Fuente: (CIACUA, 2011)23
Ecuación 33. Altura máxima Onda tipo C para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011)23
Ecuación 34. Relación de llenado de la tubería de entrada principal para unión de flujos. Fuente:
(CIACUA, 2011)
Ecuación 35. Relación de llenado de la tubería de entrada lateral para unión de flujos. Fuente:
(CIACUA, 2011)
Ecuación 36. Número de Froude de la tubería de entrada principal para unión de flujos. Fuente:
(CIACUA, 2011)
Ecuación 37. Número de Froude de la tubería de entrada lateral para unión de flujos. Fuente:
(CIACUA, 2011)
Ecuación 38. Caída de la tubería de entrada principal para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011).
Ecuación 39. Caída de la tubería de entrada lateral para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011). 24
Ecuación 40. Regresión para altura máxima Onda tipo E en unión de flujos, incluidas todas las
variables. Fuente: (CIACUA, 2011)25
Ecuación 41. Regresión para altura máxima Onda tipo E en unión de flujos, sin incluir todas las
variables. Fuente: (CIACUA, 2011)25
Ecuación 42. Altura máxima Onda tipo Cipara unión de fluios. Fuente: (CIACUA, 2011)





# **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

- Aguas abajo: En hidráulica, hace referencia a la zona posterior a un volumen de control, en la dirección del flujo.
- Aguas arriba: En hidráulica, hace referencia a la zona anterior a un volumen de control, en la dirección del flujo.
- Aguas lluvias: Aguas provenientes de la precipitación pluvial.
- Aguas residuales: Desechos líquido provenientes de residencias, edificios, locales comerciales, instituciones, fábricas o industrias.
- Alcantarillado: Conjunto de obras para la recolección, conducción, tratamiento y disposición final de las aguas residuales o de las aguas lluvias.
- Ancho superficial: Es el ancho de la sección de la tubería en la superficie libre.
- Área mojada: Es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.
- Cámara de caída: Estructura utilizada para dar continuidad al flujo cuando una tubería llega a una altura considerable respecto de la tubería de salida.
- Cámara de inspección: Estructura de forma usualmente cilíndrica, que remata generalmente en su parte superior en forma tronco-cónica, y con tapa removible para permitir la ventilación, el acceso y el mantenimiento de las redes de alcantarillado.
- **Canal:** Conducto descubierto que transporta agua a flujo libre.
- Cañuela: Parte interior de una estructura de conexión o cámara de inspección, cuya forma orienta el flujo. Puede utilizarse en la cámara de unión o inspección a media banca cuando cubre la mitad de la altura de los conductos entrantes o a banca llena cuando cubre una altura mayor o igual que la altura de los conductos entrantes.
- **Capacidad hidráulica:** Caudal máximo que puede manejar un componente o una estructura hidráulica conservando sus condiciones normales de operación.
- **Caudal:** Cantidad de fluido que pasa por determinado elemento en la unidad de tiempo.





- Coeficiente de pérdida menor: Medida de las pérdidas de energía que se producen por el paso del flujo en un accesorio o estructura, y que es factor de la altura piezométrica de velocidad.
- Conducto: Estructura hidráulica destinada al transporte de agua.
- Cota de batea: Nivel del punto más bajo de la sección transversal interna de una tubería o colector.
- Cota de clave: Nivel del punto más alto de la sección transversal externa de una tubería o colector.
- Diámetro interno real: Diámetro interno de una tubería determinado con elementos apropiados.
- Diámetro nominal: Es una denominación comercial con la cual se conoce comúnmente el diámetro de una tubería, a pesar de que algunas veces su valor no coincida con el diámetro real interno.
- **Ducto:** Canal de cualquier sección transversal que puede transportar agua a superficie libre o a presión.
- Estructura de disipación: Estructura cuyo objetivo es disminuir la energía específica del flujo en un canal abierto.
- Flujo a presión: Aquel transporte en el cual el agua ocupa todo el interior del conducto, quedando sometida a una presión superior a la atmosférica.
- Flujo crítico: Estado de flujo en el cual la energía específica es la mínima para un caudal determinado.
- Flujo cuasicrítico: Estado de flujo en el cual la energía específica se acerca a su valor mínimo para un caudal determinado.
- Flujo gradualmente variado: Flujo permanente cuya profundidad y velocidad varían de manera gradual a lo largo de la longitud del canal.
- Flujo libre: Aquel transporte en el cual el agua presenta una superficie libre donde la presión es igual a la presión atmosférica.





- **Flujo no permanente:** El flujo en un canal abierto es no permanente si la profundidad y la velocidad del flujo cambian durante el intervalo de tiempo en consideración.
- Flujo subcrítico: Flujo en el cual las fuerzas gravitacionales son más importantes que las fuerzas inerciales.
- Flujo supercrítico: Flujo en el cual las fuerzas inerciales son más importantes que las fuerzas gravitacionales.
- Flujo turbulento: Se presenta cuando las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales. Las partículas se mueven con trayectorias irregulares, que no son suaves ni fijas, pero que en conjunto todavía representan el movimiento hacia adelante de la corriente entera.
- Flujo turbulento hidráulicamente liso: Flujo en el cual la altura de rugosidad es bastante menor que el espesor de la capa límite viscosa.
- Flujo turbulento hidráulicamente rugoso: Flujo en el cual la altura de rugosidad es bastante mayor que el espesor de la capa límite viscosa.
- Flujo uniforme: Flujo en el cual la profundidad de agua es la misma en cada sección de un canal.
- Nivel: es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia o datum hasta la superficie libre. Si el punto más bajo de la sección del canal se escoge como el nivel de referencia, el nivel es igual a la profundidad de flujo.
- **Número de Froude:** Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, que representa el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo.
- Optimización: Proceso de diseño y/o construcción para lograr la mejor armonía y compatibilidad entre los componentes de un sistema o incrementar su capacidad o la de sus componentes, aprovechando al máximo todos los recursos disponibles.
- Pared interna de la tubería: Zona de contacto entre la tubería y el flujo que pasa a través de ella y que genera las pérdidas de energía debido a la fricción.
- **Pendiente:** Inclinación longitudinal de un canal o ducto.





- **Perímetro mojado:** Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de la tubería mojada y de un plano transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.
- **Precisión:** Es el grado de exactitud con respecto a una medida.
- **Profundidad de flujo:** Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre.
- **Profundidad de flujo de la sección:** Es la profundidad de flujo perpendicular a la dirección de éste, o la altura de la sección del canal que contiene el agua.
- **Profundidad hidráulica:** Relación entre el área mojada de un conducto que transporta algún fluido y su perímetro mojado.
- **Radio hidráulico:** Relación entre el área mojada y el perímetro mojado de una sección transversal de un ducto.
- **Relación de llenado:** Relación existente entre la profundidad del flujo de la tubería y el diámetro real interno de la misma.
- Resalto hidráulico: Fenómeno hidráulico en el cual se presenta un cambio abrupto de régimen de flujo, se pasa de una corriente rápida y con profundidad baja (flujo supercrítico) a una corriente lenta y profunda (flujo subcrítico).
- Sistemas de Alcantarillado: Conjunto de elementos y estructuras cuya función es la recolección, transporte y evacuación hacia las plantas de tratamiento y/o cuerpos receptores de agua, de las aguas residuales y/o lluvias producidas en una ciudad o municipio.
- **Tramo:** Conjunto de tuberías de alcantarillado comprendida entre dos cámaras de inspección o entre una cámara y un emisario final.
- Tubería o tubos: Conducto prefabricado, o construido en sitio, de concreto, concreto reforzado, plástico, poliuretano de alta densidad, asbesto-cemento, hierro fundido, gres vitrificado, PVC, plástico con refuerzo de fibra de vidrio, u otro material cuya tecnología y proceso de fabricación cumplan con las normas técnicas correspondientes. Por lo general su sección es circular.





## LISTA DE VARIABLES

- *θ* = Ángulo theta.
- **a** = Constante de calibración del vertedero.
- **A** = Área mojada.
- **b** = Exponente de calibración del vertedero.
- **D** = Profundidad hidráulica.
- $D_c$  = Diámetro de la cámara.
- **D**<sub>o</sub> = Diámetro interno de la tubería.
- **F** = No. de Froude.
- $F_o$  = Fin de la onda.
- **g** = Aceleración gravitacional.
- H = Altura de la lámina de agua sobre el vertedero.
- $H_B$  = Altura del banco de la cañuela.
- **h**<sub>max</sub> = Altura máxima de la onda.
- $I_o$  = Inicio de la onda.
- **L**<sub>max</sub> = Longitud máxima de la onda.
- **Q** = Caudal de descarga.
- **So**<sub>1</sub> = Pendiente de la tubería principal.
- **So<sub>2</sub>** = Pendiente de la tubería lateral.
- $s_1$  = Caída de la tubería principal.
- $s_2$  = Caída de la tubería lateral.
- **Y** = Relación de llenado.
- $Y_n$  = Profundidad del flujo.





# 1. INTRODUCCIÓN

La conducción del agua ha sido un tema de importante interés para la sociedad a través del tiempo. Tanto es así, que el estudio de la misma ha llevado a desarrollar sistemas de acueductos y alcantarillados cuyo diseño ha cambiado a través del tiempo a medida que la ciencia proporciona más información.

En la actualidad, y dado el gran crecimiento de la población en las ciudades, estos sistemas han adquirido aun más importancia dada la necesidad de conducir de maneras tanto eficientes como seguras las aguas residuales de diferentes orígenes: doméstico, industrial, comercial, entre otros. Es importarte resaltar, que dependiendo del origen el agua residual, esta es portadora de diferentes materiales y compuestos que pueden llegar a ser perjudiciales si no se hace un control adecuado.

Las cámaras de inspección, son estructuras hidráulicas que hacen parte de los sistemas de alcantarillado. Se ubican en las intersecciones y/o nodos del sistema y cumplen distintas funciones: (1) airear el flujo con fines de oxidación, (2) proporcionar un espacio con el fin de realizar distintas actividades operativas y de mantenimiento, (3) punto de transición de las características geométricas de las tuberías de la red: dirección, pendiente, diámetro y descarga (Hager y Gissoni, 2005).

A través de los años, el diseño de cámaras de inspección se desarrollo con base en flujos subcríticos pues se disponía de materiales con una rugosidad alta. Sin embargo, el desarrollo tecnológico en las últimas décadas, permitió la fabricación de materiales con rugosidades muy bajas en comparación con los usados antiguamente, lo que implicó el desarrollo de flujos supercríticos. Así pues, al usar estos nuevos materiales con metodologías propuestas para flujos subcríticos, se incurre en un error de diseño importante, cuyas consecuencias se pueden incrementar si las pendientes de diseño son altas o si el mantenimiento de los sistemas es deficiente. Estas consecuencias son: formación y propagación de ondas dada la generación de singularidades en estado supercrítico (Sturm 2010), presurización del flujo, deficiencia en la oxigenación del flujo, y hasta el colapso del sistema y posterior reboso de las cámaras de inspección (Hager, 1994). El desarrollo de estos fenómenos puede llegar a tener una repercusión negativa importante en la sociedad dado el impacto en la salud pública y las condiciones de





higiene (Hager, 2005). Por esta razón, es necesario el estudio del comportamiento hidráulico de cámaras de inspección con flujo supercrítico, con el fin de definir metodologías de diseño que se ajusten a las características de los materiales actuales, a distintas condiciones topográficas y a la alta demanda actual de los sistemas.

El presente estudio pretende estudiar experimentalmente el comportamiento hidráulico de cámaras de inspección con flujo supercrítico, con unión de flujo a 90 grados y cañuela completa; con el fin de definir patrones de comportamiento que permitan encontrar ecuaciones de diseño para este tipo de configuración. La metodología consistió en la modelación física de distintas condiciones de caída, caudal, patrones de flujo y pendiente; además de la medición y registro de las alturas de flujo y fenómenos de ondulación y resalto hidráulico.

## **1.1 OBJETIVOS**

## **Objetivo General**

Explicar el comportamiento hidráulico de las cámaras de inspección de cañuela completa con flujo supercrítico a partir de la construcción, medición y análisis de un modelo físico.

## **Objetivos Específicos**

Teniendo en cuenta el objetivo general y el alcance de la presente investigación, es preciso llevar a cabo las siguientes actividades:

- Desarrollar un modelo físico que permita simular las condiciones reales de funcionamiento de una cámara de inspección con entrada a 90° sometida a flujo supercrítico.
- Identificar y describir los fenómenos hidráulicos que se presentan en los sistemas de alcantarillado dado el funcionamiento de las cámaras de inspección.
- Analizar la influencia de los parámetros geométricos e hidráulicos de las tuberías y la cámara de inspección en el desempeño de la misma.





## **2. ANTECEDENTES**

Los estudios acerca de cámaras de inspección y de flujo supercrítico a través de ellas datan de hace más de medio siglo y hasta la actualidad. A modo de línea de tiempo, se presentan a continuación las principales investigaciones y sus conclusiones acerca del tema teniendo en cuenta los estados del arte revisados en las siguientes investigaciones: "Modelación física de cámaras de unión bajo flujo supercrítico" (Trujillo,2013) ; "Comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico" (CIACUA,2011); además de una revisión bibliográfica propia.

Año	Investigador(es)	Тета
1950	Bower	Análisis del flujo supercrítico en cámaras de inspección y de las condiciones para la formación de resaltos hidráulicos en tuberías aguas arriba.
1966	Behlke y Pritchett	Condiciones de flujo para uniones de canales tanto rectangulares como trapezoidales, para distintos ángulos.
1968	Greated	Teniendo en cuenta la suposición de que la unión en una cámara es solo una desviación del flujo que genera una onda expansiva por requerimientos de igual profundidad, propuso una expresión en términos del ángulo para dicha onda.
1989	Hager	Ampliando el acercamiento de Greated (1968), relacionó el ángulo de unión con la altura máxima de la onda por medio de una ecuación de carácter empírico.
1990	Johnston y Volker	En su investigación encontraron que es posible mejorar la eficiencia hidráulica de las cámaras de unión instalando bafles en las caídas de las mismas.
1993	Christodoulou	Investigación sobre resaltos hidráulicos incipientes en canales con uniones a 90 grados.
1994	Hager y Schwalt	Discusión acerca de los resaltos hidráulicos incipientes estudiados por Christodoulou.





1995	Hager y Schwalt	Descripción detallada de los patrones de flujo supercrítico en canales rectangulares con unión.
1996	Schwalt	Planteamiento de un procedimiento de diseño y del número de choque (usado para determinar ciertos patrones de flujo).
1997	Reinauer y Hager	Investigación sobre las estructuras de conexión entre canales de sección transversal rectangular. Se comprobó que el patrón de flujo de estos canales es similar al de un canal con sección transversal en forma de U. La diferencia encontrada entre este dos consiste en que en los canales rectangulares no se experimentó fenómeno de ahogamiento (característico de cámaras de inspección).
1998	Vischer y Hager	Resumen de investigaciones sobre el flujo supercríticos en estructuras de conexión.
1999	Hager	Los principales resultados de sus investigaciones fueron sintetizados en su libro "Wastewater Hydraulics, Theory and Practice". Una de las conclusiones más importantes afirma que los coeficientes de pérdidas menores en cámaras son insignificantes.
2000	Kruger y Rutschmann	Explicación de la distribución de la presión (no hidrostática) del flujo supercrítico en cámaras de inspección por medio de modelación numérica.
2000	Gisonni y Hager	En su investigación, evaluaron el comportamiento del flujo supercrítico en una unión de 45° en curva. Se concluyó acerca de distintos aspectos: (1) un canal en U se caracteriza por el entrapamiento de aire y el desarrollo de ondas aguas abajo ,(2) las cámaras con un ángulo de deflexión de 90° tienden a colapsar si su relación de llenado excede el 50% ,(3) deben evitarse número de Froude en el rango de 0.75-1.5 para evitar la disminución de la eficiencia hidráulica de la estructura y (4) se planteó la posibilidad de utilizar una cobertura con el fin de disminuir el impacto de las ondas.
2001	Del Giudice y Hager	Investigación sobre cámaras con uniones laterales de 45°. Se identificaron los diferentes tipos de flujo presentes en una cámara y su capacidad de descarga. Así pues, se





concluyó que existe una transición de flujo supercrítico a subcrítico cuando la descarga es menor a la descarga mínima. Cuando la descarga es mayor a la máxima se presuriza el flujo.

2002 Gisonni y Hager Determinaron que para cámaras con uniones laterales a 90° no se presentan comportamientos diferentes al cambiar el tipo de unión en la estructura de conexión. Además se demostró que a pesar que las caídas en cámaras evitan la submergencia, este tipo de estructuras no mejoran el desempeño en flujo supercrítico dado que se generan ondas y por ende propende la formación de resaltos hidráulicos. Finalmente, concluyen que el entrapamiento del aire es un factor importante en el comportamiento de las cámaras de inspección, que disminuye la aplicabilidad de ecuaciones convencionales de diseño.

> Gargano y Hager En su estudio determinaron que en las cámaras de unión de alcantarillado se presentan fenómenos de presurización y submergencia dada la creación de ondas superficiales en el flujo. Se recomienda usar una máxima relación de llenado de 75%-85% en estas estructuras para evitar estos fenómenos.

2005 Hager y Gissoni Presentan un estado del arte sobre cámaras de inspección en flujos supercríticos. Se reconoce que en las cámaras se presenta flujos espacialmente variados y que la perturbación de flujo supercrítico puede llevar a ondas superficiales y resaltos hidráulicos. Adicionalmente, proponen una fórmula de cálculo para en número de Froude en secciones circulares y para cañuelas en cámaras de inspección.

2005	Centro de investigaciones en acueductos y	tudia las metodologías para el cálculo de pérdidas enores en cámaras de inspección.
	alcantarillados-CIACUA	

2007	Centro de	-Estado del arte y tendencia mundial en la construcción de
	investigaciones en	manholes.
	acueductos y	-Determinación del comportamiento hidráulico de cámaras
	alcantarillados -CIACUA	de inspección plásticas de 600 mm.

- Determinación del comportamiento hidráulico de cámaras de inspección plásticas de 1000 mm.





2008 Zhao,Xhu y Rajaratman Se estudiaron las cámaras de inspección con uniones de flujo a 90° concluyendo que en ellas se presentan patrones de olas, mezcla, separación, turbulencia y transición o coexistencia de flujo libre y a presión.

- 2010 Hager Segunda edición de su libro "Wastewater Hydraulics, Theory and Practice".
- 2011 Centro de Comportamiento hidráulico en cámaras de inspección bajo investigaciones en condiciones de flujo supercrítico, evaluando distintos tipos acueductos y de flujo en cámaras de unión a 90°. En este estudio se alcantarillados -CIACUA desarrolló un modelo a escala real de una cámara con tres entradas (90°-180°-270°) y una salida. Luego de las pruebas realizadas la investigación arrojó ecuaciones v recomendaciones de diseño para este tipo de cámaras teniendo en cuenta el análisis estadístico de los datos recolectados.
- 2013 Centro de Modelación física de cámaras de unión bajo flujo investigaciones en supercrítico. Esta investigación uso cámaras de inspección acueductos y de dos materiales diferentes (acrílico y polietileno) para alcantarillados -CIACUA determinar su comportamiento hidráulico bajo flujo supercrítico. Se realiza un análisis de ondas completo de la experimental fase se mencionan algunas V recomendaciones de diseño teniendo en cuenta ecuaciones que resultan del análisis estadístico.

Teniendo en cuenta los objetivos del presente estudio, se hará énfasis en capítulos posteriores en el análisis y los resultados de algunas de las investigaciones descritas anteriormente.

De forma muy general, se puede concluir que las distintas investigaciones acerca del flujo supercrítico en cámaras de inspección tienen en común que se caracteriza por la formación de ondas que pueden llegar a formar resaltos hidráulicos. La formación de estos puede llevar a causar presurización de las tuberías aguas arriba. Así pues, se recomienda la limitación de las relaciones de llenado para flujos que se acerquen a la región crítica. Finalmente, los parámetros hidráulicos que tienen mayor repercusión en el desempeño de la cámara son el Número de Froude y la relación de llenado de la(s) tubería(s) aguas arriba.





## **3. MARCO CONCEPTUAL**

#### 3.1 Generalidades

Según el literal D.7.3 del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico –(RAS) ,las cámaras de inspección, conexión o unión son "elementos integrales de todo sistema de recolección y evacuación de aguas residuales y de aguas lluvias". Se ubican en las intersecciones y/o nodos del sistema y cumplen distintas funciones:

- Punto de transición de una, varias o todas las propiedades geométricas y topográficas de sus ductos de entrada. Entre estas propiedades se encuentran: cambio de dirección, pendiente, diámetro y cambio de rugosidad (material).
- Unión de distintos tramos.
- Conexión con la superficie con fines de mantenimiento y limpieza.
- Como puntos de inspección y monitoreo.
- Gracias a nuevas tecnologías, se pueden usar como punto de renovación de tuberías.

Las cámaras de inspección deben ser usadas solamente en los casos en los cuales la distancia vertical entre la línea de flujo del conducto de entrada y la cota de batea del conducto de salida sea inferior a 0.75 m. En caso de que esta condición no se cumpla, se debe adecuar una estructura de caída. Según la reglamentación vigente de cada país, pueden ser colocadas a distancias desde 80m hasta 200m.

### 3.2 Caracterización del flujo

Teniendo en cuenta el título D del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento (RAS 2011), los tramos que hacen parte del sistema de alcantarillado deben diseñarse de acuerdo con la suposición de flujo a superficie libre, esto quiere decir, para conductos circulares parcialmente llenos. Por ende, el flujo puede ser caracterizado por medio del número de Froude:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad \text{o} \quad F = \left(\frac{T}{gA^3}\right)^{1/2} Q$$





en donde:

*F* = Número de Froude.

- v = Velocidad del flujo de aproximación.
- g = Aceleración debida a la gravedad.
- D = Profundidad hidráulica.
- *T* = Ancho superficial.
- A = Área de flujo.
- Q = Caudal.

Dado que algunas características geométricas del flujo dependen del diámetro y la profundidad de flujo, esta ecuación puede llegar a ser compleja. Hager (1999) propuso una simplificación aplicable a relaciones de llenado de 20%-95%, la cual se muestra a continuación:

$$F = \frac{Q}{(gDh^4)^{1/2}}$$

Ecuación 2. Simplificación de la ecuación de número de Froude (Hager, 1999).

en donde:

D = Diámetro de la tubería de entrada. h = Profundidad de flujo en la tubería.

Hager adoptó también una caracterización del régimen de flujo, donde se distinguen cuatro tipos de flujo de acuerdo con su número de Froude. En la Tabla 1 se puede apreciar esta clasificación y algunas de las características principales.

No. de Froude	Tipo de Flujo	Características
0.0 < F < 0.7	Flujo débilmente subcrítico.	Superficie libre casi plana. Se comportan como flujo a presión cuando el número de Froude tiende a cero.
0.7 < F < 1.5	Flujo transicional.	Se presentan fenómenos de ondas superficiales y resaltos hidráulicos típicamente.
1.5 < F < 3	Flujo supercrítico.	El flujo se caracteriza por ser dinámico.
F > 3	Flujo Hipercrítico.	Presenta dinámicas de flujo fuertes,

Tabla 1.Caracterización del flujo según número de Froude . Hager (2002).





	que puede ser dañinas en el caso de
	que el flujo sea perturbado.

# 3.3 Propiedades geométricas de tubería circular fluyendo parcialmente llena

La Figura 1 describe las principales propiedades geométricas de una tubería de sección transversal fluyendo parcialmente llena. Estas propiedades son fundamentales para describir el comportamiento hidráulico de una tubería dado que el Número de Froude es calculado con base en ellos.



Figura 1. Propiedades geométricas de una sección circular fluyendo parcialmente llena. FUENTE: Notas de clase de sistemas integrados de drenaje urbano, Juan Saldarriaga.





A continuación se listan las principales propiedades y las ecuaciones con las cuales pueden hallarse:

(1) 
$$\theta = \pi + 2\sin^{-1}\left(\frac{Yn - \frac{Do}{2}}{\frac{Do}{2}}\right) [\text{Radianes}]$$

Ecuación 3.Ángulo que describe la sección transversal mojada.

(2) 
$$A = \frac{1}{8}(\Theta - \sin\Theta)Do^2 \quad [L^2]$$

Ecuación 4. Área Mojada

(3) 
$$T = d\cos\left(\operatorname{sen}^{-1}\left(\frac{y_n - \frac{d}{2}}{\frac{d}{2}}\right)\right) [L]$$

Ecuación 5. Ancho Superficial

(4)  
$$D = \frac{A}{T} = \frac{(\theta - \sin \theta) Do}{8 \cos \left( \sin^{-1} \left( \frac{Yn - \frac{Do}{2}}{\frac{Do}{2}} \right) \right)} \quad [L]$$

Ecuación 6.Profundidad Hidráulica

$$P = \frac{1}{2} \Theta d [L]$$

Ecuación 7. Perímetro Mojado

(6) 
$$R = \frac{Do}{4} \left( 1 - \frac{sen(\Theta)}{\Theta} \right) [L]$$

Ecuación 8. Radio Hidráulico





# 3.4 Flujo supercrítico en cámaras de unión de 90° (Gissoni y Hager, 2002)

#### 3.4.1 Descripción del experimento

En general, las cámaras de unión se caracterizan porque durante su funcionamiento se originan ondas de choque provocadas por distintas expansiones, contracciones, curvas o conexiones (Hager, 1999). Según Hager y Gissoni (2002), estas ondas pueden generar la presurización de las cámaras en 3 lugares distintos: la tubería principal de entrada, la tubería lateral y la tubería de salida (puede ocasionarse en las tres, eventualmente). Por ende, las principales características que deben medirse en una onda son su altura y su ubicación (ATV, 2006).

Con el fin de complementar sus estudios sobre cámaras de inspección con curvas de 45°, Hager Y Gissoni (2002) diseñaron un experimento para evaluar cámaras de unión de 90°. Este experimento contó con las siguientes características: dos tuberías de entrada (una principal y una lateral) de diámetro D= 0.24 m, un canal de conducción en forma de U con paredes e 1.5D de altura y una tubería de salida también de diámetro 0.24 m. En la Figura 2, se puede apreciar la configuración de la unión realizada en el experimento.



Figura 2. Configuración del experimento de Hager y Gissoni (2002). FUENTE: "Supercritical flow in the 90 junction manhole".





Se realizaron más de 200 pruebas teniendo en cuenta como parámetros principales las relaciones de llenado y los números de Froude en cada tubería de entrada.

Durante el experimento se diferenciaron 3 tipos de ondas: la onda B (de altura  $h_B y$  ubicada en la curva de la entrada lateral), la onda J (de altura máxima  $h_J y$  longitud  $x_J$ , ubicada en la pared opuesta a la entrada lateral) y la onda S (de altura  $h_S y$  causada por la presencia de la tubería de salida). En la Figura 2, se pueden apreciar los tipos de ondas y sus características.

#### 3.4.2 Resultados

Para el análisis de resultados se usaron las aproximaciones de Hager (1999) para el número de Froude, tal como se describió en el Numeral 3.2 del presente documento. Los resultados para cada tipo de onda son:

#### 3.4.2.1 Onda A

Para la Onda tipo A (onda formada en flujo directo dominante en la tubería principal), la relación  $Y_A = \left(\frac{h_A}{h_0}\right) - 1$  varía con F<sub>0</sub>. Se observa que para un rango de 0.5<F<sub>0</sub><2 existe una relación lineal entre estos dos parámetros. Sin embargo, según Hager y Gissoni este tipo de onda es insignificante con respecto a otro tipo de ondas, por lo tanto no se hizo un análisis exhaustivo de la misma.

#### 3.4.2.2 Onda B

Con respecto a la onda B, se determinó que su altura relativa, definida como  $Z_B = h_B/D$ , estaba directamente relacionada con el parámetro de momento dinámico. Así pues:

$$Z_B = y_L F_L$$

Ecuación 9. Altura Relativa Onda B. Fuente: (Gissoni y Hager ,2002).

Siendo,





y= relación de llenado F= número de Froude

donde los subíndices L, indican el flujo LATERAL.

#### 3.4.2.3 Onda J

La onda J fue evaluada para dos casos: primero, se evaluó para flujo supercrítico lateral y luego se evaluó flujo supercrítico en ambos conductos de entrada. Para ambos casos, la altura relativa de la onda  $Y_J = h_J/h_L$ - 1, presenta una relación con el parámetro  $F_L$ . Esta relación es:

$$Y_J = \left(\frac{8}{7}\right)(F_L - 1)$$

Ecuación 10. Altura Relativa Onda J. Fuente: (Gissoni y Hager ,2002).

Así mismo la localización  $X_{J}$ , normalizada con el diámetro de entrada como  $X_{J} = x_{J}/D$ , presenta una relación con el mismo parámetro. Así pues, se determinó que:

$$X_J = 1.8 \left( F_L - 1 \right)^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación 11.Localización en x de la Onda J. Fuente: (Gissoni y Hager, 2002).

#### 3.4.2.4 Onda S (Swell)

La altura relativa de esta onda, definida en general como  $Y_s = (h_s/h_{conducto i})-1$ , fue evaluada para tres casos diferentes:

• Flujo solo en el conducto principal:

En este caso, se definió la altura relativa de la onda como  $Y_{So} = (h_S/h_o)-1$ , y se determinó que variaba con respecto a  $F_0$  (el subíndice cero hace referencia a la tubería principal). Así pues, se establece que:

$$Y_{So} = \left(\frac{1}{2}\right)(F_0 - 1)$$

Ecuación 12. Altura Relativa Onda S para flujo directo. Fuente: (Gissoni y Hager ,2002).





Esta ecuación solo aplica para los casos en los cuales  $0.45 < Y_L < 0.7$ , dado que para relaciones de llenado menores a 45% en el conducto lateral, no se tiene una afectación importante sobre la tubería de salida.

• Flujo solo en el conducto lateral:

Con respecto a esta condición, se definió la altura relativa de la onda como  $Y_{SL} = (h_S/h_L)-1$ , y se determinó que variaba con respecto a  $F_L$ . La ecuación que describe la relación es:

$$Y_{SL} = \left(\frac{7}{8}\right)(F_L - 1)$$

Ecuación 13. Altura Relativa Onda S para flujo lateral. Fuente: (Gissoni y Hager, 2002).

Al igual que para el anterior caso, esta ecuación tiene se limita a un rango en la relación de llenado dado que valores más bajos no logran afectar a la tubería de salida , mientras que valores más altos llegan a presurizar la misma. Es rango comprende  $0.45 < Y_{L} < 0.50$ .

• Unión de flujos:

Para el caso de la unión de flujos, la altura relativa de la onda es  $Y_s = (h_s/h_L)-1$ , y se determinó que variaba con respecto a  $F_L$ . La expresión encontrada es:

$$Y_S = \left(\frac{2}{3}\right) F_L$$

Ecuación 14. Altura Relativa Onda S para unión de flujos. Fuente: (Gissoni y Hager, 2002).

Esta ecuación aplica para números de Froude en el conducto lateral mayores a 1.

Finalmente, se concluye que el caso uno (solo en el conducto principal) es el caso menos crítico dado que la altura de la onda es mucho menor comparado con los otros casos.





#### 3.4.2.5 Capacidad de descarga de la cámara

Según Hager y Gissoni, este parámetro es fundamental para el diseño de la cámara con el fin de evitar fenómenos de sobrecarga en el sistema. Para su estudio se evaluaron, una vez más, los tres casos:

• Flujo solo en el conducto principal o solo en el conducto lateral:

En este caso se determinó un Número de Froude de descarga descrito como:

$$F_C = \frac{Q_c}{(gD^5)^{0.5}}$$

Ecuación 15. Capacidad de descarga de la cámara para flujo solo directo o lateral. Fuente: (Gissoni y Hager, 2002).

Teniendo en cuenta esta definición, se determinó el número de Froude de descarga máximo para cada caso. En general, se encontró que:

$$F_{C} = 2.2 Y_{M}$$

Ecuación 16. Número de Froude de descarga máximo de la cámara para flujo solo directo o lateral. Fuente: (Gissoni y Hager, 2002).

donde,

$$Y_M = y_0$$
 , para solo flujo directo  
 $Y_M = y_L \cos(45)$  , para solo flujo lateral

• Unión de flujos:

Para la unión de flujos, los datos demostraron que la capacidad hidráulica de la estructura cuando están en funcionamiento los dos ductos (principal y lateral), varía de acuerdo con la siguiente ecuación:





 $F_C = 0.6F_0 y_0 \eta^{0.2}$ 

Ecuación 17. Número de Froude de descarga máximo de la cámara para unión de flujos. Fuente: (Gissoni y Hager, 2002).

En donde ,  $\eta = \frac{y_0}{y_L}$  que es la relación de llenado relativa.

# 3.5 Comportamiento Hidráulico de Cámaras de Inspección Bajo Condiciones de Flujo Supercrítico (CIACUA,2011).

#### 3.5.1 Descripción del experimento

El Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA, de la Universidad de los Andes, desarrolló una investigación encaminada a caracterizar el comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico mediante la modelación de una estructura de unión a 90 grados a escala muy cercana a la real. El modelo usó una media cañuela, es decir, el canal de conducción dentro del canal solo tenía la altura de medio diámetro de tubería de entrada:

$$H_B = \frac{D_0}{2}$$

Ecuación 18. Altura de la cañuela usada por CIACUA, 2011.

Las pruebas en el modelo permitieron simular distintas condiciones de flujo en una cámara de conexión, así:

- Flujo directo: permitiendo el flujo de entrada solamente por la tubería principal. Para esta condición se realizaron 23 pruebas con caudales desde 3.99 L/s hasta 74.84 L/s.
- Flujo lateral: permitiendo el flujo de entrada solamente por la tubería lateral (90°). Al igual que para el flujo directo, se realizaron 23 pruebas con caudales entre 1.63 L/s y 50,50 L/s.





 Unión de flujos: para esta condición el flujo entra tanto por la tubería principal como por la lateral a la cámara. Para dicha configuración se realizaron 142 pruebas variando tanto los caudales de cada una de las entradas como las caídas.

Las caídas probadas en cada uno de los experimentos fueron de 0%Do ,25%Do, 50%Do y 75%Do.

#### 3.5.2 Resultados

El estudio clasifica de acuerdo con Hager (1994) los patrones de ondas formadas en cámaras de inspección con uniones de flujos de acuerdo a la localización y la dirección del(los) flujo(s) de entrada. Teniendo en cuenta los patrones de onda, el CIACUA determinó ecuaciones que relacionan su altura máxima con diferentes variables como la relación de llenado, el número de Froude y la caída en la entrada.

#### 3.5.2.1 Patrones de ondas en flujo directo

En las cámaras de unión con flujo directo se presentan ondas TIPO A. Estas ondas son provocadas por el choque del flujo contra las paredes curvas de los conductos laterales. En la Figura 3 se puede apreciar este tipo de onda y su ubicación.



Figura 3.Onda tipo A (Flujo directo). Fuente: Comportamiento hidráulico de Cámaras de inspección bajo Condiciones de flujo supercrítico. CIACUA, 2011.





En los experimentos realizados se evidenció la formación de una onda simultánea a la onda A, llamada Onda B. Sin embargo el análisis de la misma no se desarrolla ya que nunca tuvo un efecto significativo en el experimento, es decir, nunca llegó a tener una altura máxima mayor a la de la Onda A.

De acuerdo con el análisis estadístico realizado con los datos recaudados en las mediciones del modelo, se determinó que la altura máxima de la Onda tipo A, representativa y dominante para el flujo directo y que se presentó solo para caudales mayores a 10 L/s, es:

$$h_{maxA} = 2.92Y_1^{1.02}F_1^{-0.025}S_1^{\prime 0.07}$$

Ecuación 19. Regresión para altura máxima Onda tipo A, incluidas todas las variables. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$h_{maxA} = 2.46Y_1^{1.049}F_1^{0.14}$$

Ecuación 20.Regresión para altura máxima Onda tipo A, sin incluir todas las variables. Fuente: (CIACUA, 2011).

en donde,

$$h_{maxA} = \frac{h_A}{h_B} = \frac{2h_A}{D_0}$$

Ecuación 21. Altura máxima Onda tipo A. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$Y_1 = \frac{Y_{n1}}{D_0}$$

Ecuación 22. Relación de llenado de la tubería de entrada principal. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$F_1 = \frac{Q_1}{A_1 \sqrt{g D_1}}$$

Ecuación 23.Número de Froude de la tubería de entrada principal. Fuente: (CIACUA, 2011).





$$S'_{1} = \frac{(D_{0} - h)}{D_{0}}$$

Ecuación 24. Caída de la tubería de entrada principal. Fuente: (CIACUA, 2011).

Estadísticamente hablando, se puede concluir que la Ecuación 19 explica en menor medida la variabilidad de los datos encontrados en comparación con la Ecuación 20. Esto se debe a que para la primera se obtuvo un valor de R<sup>2</sup> ajustado de 80.505% mientras que para la segunda este valor fue de 81.487%. Teniendo en cuenta este análisis, se determinó que la altura de caída de la tubería es una variable estadísticamente no significativa al explicar la altura de la Onda tipo A.

#### 3.5.2.2 Patrones de ondas en flujo lateral

En el flujo lateral se presentan ondas tipo C y D. Con respecto a las ondas tipo C, estas son formadas por el choque del flujo lateral contra la pared opuesta (pared del conducto del flujo directo). La onda D se forma en la pared curva interior del conducto lateral. Es importante resaltar que el desarrollo de la onda tipo D se da siempre después de la formación de la onda tipo C, nunca de forma individual. En la Figura 4 se puede apreciar la ubicación de estos tipos de onda.



Figura 4.Ondas tipo C y D (Flujo lateral). Fuente: Comportamiento hidráulico de Cámaras de inspección bajo Condiciones de flujo supercrítico. CIACUA, 2011.

De acuerdo con las pruebas realizadas en el estudio, las Ondas C y D tuvieron una altura casi igual para una configuración de caudal alto y caída de 75% Do. Así mismo, entre mayor fuera el caudal la onda D se desplazaba hacia la entrada de la tubería de salida, lo que denotaba una condición




crítica ya que esta condición podría desencadenar una obstrucción del conducto de salida y posible sobrecarga de la cámara.

Por otro lado, para la condición de flujo a 90° se presentó un fenómeno de recirculación del flujo (movimiento en vórtice) cuando el nivel del mismo sobrepasaba la altura máxima de la cañuela, es decir, la mitad del diámetro de la tubería de entrada.

Finalmente, de determinó que la Onda C era hidráulicamente dominante dado que se presentaba con regularidad para caudales medios-altos y que generalmente tenía alturas máximas mayores a los de la Onda D. De acuerdo con el análisis estadístico realizado con los datos recaudados en las mediciones del modelo, se determinó que la altura máxima de la Onda tipo C, representativa y dominante para el flujo lateral, se puede determinar con las siguientes ecuaciones:

$$h_{maxC} = 3.411Y_2^{0.841}F_2^{0.406}S_2^{\prime \, 0.128}$$

Ecuación 25. Regresión para altura máxima Onda tipo C en flujo lateral, incluidas todas las variables. Fuente: (CIACUA,2011).

$$h_{maxC} = 3.1Y_2^{0.856}F_2^{0.446}$$

Ecuación 26. Regresión para altura máxima Onda tipo C en flujo lateral, sin incluir todas las variables. Fuente: (CIACUA, 2011).

en donde,

$$h_{maxC} = \frac{h_C}{h_B} = \frac{2h_C}{D_{0L}}$$

Ecuación 27. Altura máxima Onda tipo C. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$Y_2 = \frac{Y_{n2}}{D_0}$$

Ecuación 28. Relación de llenado de la tubería de entrada lateral. Fuente: (CIACUA, 2011).





$$F_2 = \frac{Q_2}{A_2 \sqrt{g D_2}}$$

Ecuación 29. Número de Froude de la tubería de entrada lateral. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$S'_{2} = \frac{(D_{0L} - h)}{D_{0L}}$$

Ecuación 30. Caída de la tubería de entrada lateral. Fuente: (CIACUA, 2011).

El análisis estadístico arrojó un R<sup>2</sup> ajustado de 74.192% para la Ecuación 25 y de 73.495% para la Ecuación 26. Es este caso, a diferencia del flujo directo y su correspondiente onda tipo A, la altura de la caída tiene una mayor repercusión en el valor de altura máxima de la onda C dado que la ecuación con todas las variables explica de mejor forma la variabilidad de este valor. Sin embargo, es posible asegurar que las dos ecuaciones convergen a valores muy parecidos dado que la diferencia de sus R<sup>2</sup> ajustados no es muy significativa.

#### 3.5.2.3 Patrones de ondas en unión de flujos

La unión de flujos se caracteriza por presentar tres tipos de ondas: A, C y E (Figura 5).



Figura 5.Ondas tipo E (Unión de flujos). Fuente: Comportamiento hidráulico de Cámaras de inspección bajo Condiciones de flujo supercrítico. CIACUA, 2011.





La onda tipo A, como se mencionó anteriormente, es característica del flujo directo. Y se genera por el choque del flujo proveniente de la tubería principal con la pared interna del canal lateral de la cañuela.

La onda tipo C, es característica del flujo a 90 grados y es provocada por el choque del agua proveniente de conducto lateral de la cañuela con la pared del conducto principal (directo).

Finalmente, la onda tipo E, es provocada por la unión de los flujos en la intersección entre los conductos lateral y principal dentro de la cañuela.

Respecto a la formación de estos tres tipos de ondas en una cámara con media cañuela sometida a la condición de unión de flujos se puede concluir que:

 La Onda tipo A se forma cuando el conducto principal es hidráulicamente dominante, no hay presencia de caída y el caudal lateral es menor a 10% del caudal de la tubería principal. Se determinó que es una onda estática por lo cual solo se analiza su máxima altura, cuyo valor nunca superó 1.08 H<sub>B</sub>.

Dado que esta altura máxima no es significativa respecto a la altura de los otros dos tipos de onda, no se consideró necesario hacer un análisis del mismo.

La Onda tipo C se forma cuando el conducto lateral es hidráulicamente dominante. Se determinó que es una onda estática por lo cual solo se analiza su máxima altura, cuyo valor nunca superó 2.33 H<sub>B</sub>. Así mismo, se observó que en presencia de caudales grandes en la tubería lateral y cuando la tubería de entrada principal no presenta caída, se genera un resalto hidráulico en la salida de la tubería principal que llega a presurizar esta tubería cuando el caudal es suficiente para incrementar el nivel de la lámina de agua hasta la altura de su diámetro.

De acuerdo con el análisis estadístico realizado con los datos, se determinó que la altura máxima de la Onda tipo C para la configuración de unión de flujos, puede ser determinada con las siguientes ecuaciones:





$$h_{maxC-UF} = 2.658 * Y_1^{0.1626} * Y_2^{0.570} * F_1^{0.0554} * F_2^{0.4160} * S_1'^{0.0078} * S_2'^{-0.0978}$$

Ecuación 31. Regresión para altura máxima Onda tipo C en unión de flujos, incluidas todas las variables. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$h_{maxC-UF} = 3.1289 * Y_1^{0.1663} * Y_2^{0.4821} * F_1^{0.0426} * F_2^{0.2130}$$

Ecuación 32. Regresión para altura máxima Onda tipo C en unión de flujos, sin incluir todas las variables. Fuente: (CIACUA, 2011).

en donde,

$$h_{maxC-UF} = \frac{h_{C-UF}}{h_B} = \frac{2h_{C-UF}}{D_0}$$

Ecuación 33. Altura máxima Onda tipo C para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$Y_1 = \frac{Y_{n1}}{D_0}$$

Ecuación 34. Relación de llenado de la tubería de entrada principal para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$Y_2 = \frac{Y_{n2}}{D_{0L}}$$

Ecuación 35. Relación de llenado de la tubería de entrada lateral para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$F_1 = \frac{Q_1}{A_1 \sqrt{g D_1}}$$

Ecuación 36. Número de Froude de la tubería de entrada principal para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011).





$$F_2 = \frac{Q_2}{A_2 \sqrt{gD_2}}$$

Ecuación 37. Número de Froude de la tubería de entrada lateral para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$S'_1 = \frac{(D_0 - h)}{D_0}$$

Ecuación 38. Caída de la tubería de entrada principal para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$S'_2 = \frac{(D_{0L} - h)}{D_{0L}}$$

Ecuación 39. Caída de la tubería de entrada lateral para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011).

Los valores de R<sup>2</sup> ajustado son de 84.892% y 83.476% para la Ecuación 31 y Ecuación 32, respectivamente. Si bien la primera explica de mejor forma la variabilidad de los datos encontrados (teniendo en cuenta la altura de caída de cada entrada), la diferencia entre las dos no es significativa.

La onda tipo E se presenta cuando el flujo es hidráulicamente dominante en la tubería principal y además el caudal de la tubería lateral es mayor al 10% del caudal de dicha tubería. Se determinó que es una onda estática por lo cual solo se analiza su máxima altura, cuyo valor nunca superó 1.34 H<sub>B</sub>. De la misma manera, se observó la formación de un resalto hidráulico en la tubería lateral cuando esta no presentaba caída y cuando el caudal de la tubería principal es igual o superior, situación que puede generar presurización de la tubería lateral.

El análisis estadístico realizado con los datos arrojó que la altura máxima de la Onda tipo E, característica de unión de flujos, puede ser determinada con las siguientes ecuaciones:





$$h_{maxE} = 3.9019 * Y_1^{0.2143} * Y_2^{0.5576} * F_1^{0.1111} * F_2^{0.0779} * S_1^{\prime 0.0326} * S_2^{\prime 0.1297}$$

Ecuación 40. Regresión para altura máxima Onda tipo E en unión de flujos, incluidas todas las variables. Fuente: (CIACUA, 2011).

$$h_{maxE} = 3.3177 * Y_1^{0.1929} * Y_2^{0.6114} * F_1^{0.0345} * F_2^{0.2959}$$

Ecuación 41. Regresión para altura máxima Onda tipo E en unión de flujos, sin incluir todas las variables. Fuente: (CIACUA, 2011).

en donde,

$$h_{maxE} = \frac{h_E}{h_B} = \frac{2h_E}{D_0}$$

Ecuación 42. Altura máxima Onda tipo C para unión de flujos. Fuente: (CIACUA, 2011).

 $Y_1$ : Relación de llenado de la tubería de entrada principal para unión de flujos,

Y<sub>2</sub>: Relación de llenado de la tubería de entrada lateral para unión de flujos,

F<sub>1</sub>: Número de Froude de la tubería de entrada principal para unión de flujos,

F<sub>2</sub>: . Número de Froude de la tubería de entrada lateral para unión de flujos,

 $S'_1$ : Caída de la tubería de entrada principal para unión de flujos,

S'<sub>2</sub>: Caída de la tubería de entrada lateral para unión de flujos,

De acuerdo con las definiciones anteriores.

La Ecuación 40 tiene un R<sup>2</sup> ajustado de 89.178% mientras que para la Ecuación 41 este valor es de 83.840%. En este caso, la variabilidad de los datos es explicada mucho mejor por la primera ecuación, es decir que el efecto de la caída en las entradas principal y lateral tienen una repercusión importante en el valor máximo de altura de la onda E.





# 4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO

A continuación, se hace una descripción del diseño y proceso constructivo tanto del modelo general como de la cañuela usada para la presente investigación.

# **5.1.DESCRIPCIÓN DEL MODELO**

El modelo diseñado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA en la Universidad de los Andes, ha sido utilizado en variadas investigaciones sobre cámaras de inspección. Sus componentes principales son:

• Cámara de unión: fabricada en acrílico, permite ver de manera clara los patrones y fenómenos que ocurren en la cámara durante su funcionamiento. Tiene un diámetro interno de 0,84 metros y una altura de 0,71 metros. En la Figura 6 se puede observar el detalle de la cámara de inspección usada en el montaje.



Figura 6. Detalle de la cámara de inspección.

De igual forma, en la Fotografía 1 se puede observar la cámara usada en este montaje.







Fotografía 1. Cámara de inspección utilizada.

• Estructuras de conexión: corresponden a láminas de acrílico especialmente moldeadas para empalmar con la estructura curva de la cámara (Fotografía 2). La configuración de estas láminas permite conectar las tuberías de entrada a diferentes alturas de caída: ODo, 0.25Do, 0.5Do Y 0.75Do (siendo Do el diámetro de la tubería de entrada).



Fotografía 2. Estructura de conexión.





- Tanques de alimentación: se utilizan dos tanques metálicos de alimentación para las tuberías de entrada. Las estructuras de rebose de estos tanques permiten controlar el caudal de entrada de cada tubería además de la altura inicial de los tubos de entrada. Se conectan a los tubos de manera hermética gracias a empalmes de neumático y silicona fría.
- Tanque para desagüe: este tanque posee una estructura de disipación de energía en la cual desemboca la tubería de salida de la cámara.
- Tuberías de entrada: las tuberías de entrada tienen un diámetro de 0.223 m. La longitud de la tubería de entrada a flujo directo y de la tubería con flujo a 90° es de 0.94 m y 1.28 m, respectivamente (longitudes establecidas de acuerdo al espacio disponible en laboratorio). Adicionalmente, la tubería de entrada principal se compone de dos tuberías: como primera medida un tubo Novafort y luego una tubería de acrílico.
- Tubería de salida: la tubería de salida tiene un diámetro de 0.26 m y una longitud de 82 cm.

En la Figura 7 se puede apreciar el montaje con todas las partes anteriormente mencionadas.



Figura 7. Detalle del montaje experimental realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes.





Así mismo, en la Fotografía 3 se puede observar el montaje ya construido en el laboratorio.



Fotografía 3. Modelo construido en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes.

• Canal de conducción (Cañuela): la cañuela está fabricada en fibra de vidrio. Tiene un diámetro externo de 81,7 cm y una altura de 34 cm .Permite el flujo del agua para una cámara de unión de 90°. Más adelante se explicará en detalle el diseño y proceso constructivo de la cañuela dado que es la pieza fundamental de esta investigación.

### **5.2.CANAL DE CONDUCCIÓN O CAÑUELA**

#### 5.2.1. Diseño

Esta pieza es fundamental para el desarrollo de la investigación dado que se pretende estudiar comportamiento hidráulico para una configuración de cañuela completa, es decir, de una cañuela cuya altura sea al menos igual a la cota de corona de las tuberías de entrada y que permita una conducción total del agua para todas las relaciones de llenado.

Teniendo en cuenta la configuración de la cámara de unión, se diseñó una cañuela de 34 cm de altura y 81,7 cm de diámetro. Cada una de sus entradas y salidas se diseñaron teniendo en cuenta una circunferencia con el diámetro de la tubería correspondiente, y una extensión vertical a partir del diámetro máximo para constituir su característica forma de U. El material escogido fue fibra de vidrio dada su resistencia mecánica, su baja rugosidad y su costo.





En la Figura 8 se pueden observar todas dimensiones usadas para la construcción del canal de conducción.



Figura 8. Diseño del canal de conducción (Cañuela).

Adicionalmente, en la Figura 9, se puede detallar el modelo 3D realizado para el diseño del mismo.







Figura 9. Modelo tridimensional para el diseño del canal de conducción.

#### 5.2.2. Proceso Constructivo

Se realizó un exhaustivo y detallado proceso constructivo con el fin de asegurar el cumplimiento de las características geométricas fijadas en el diseño y para obtener una superficie con la menor rugosidad posible. Adicionalmente, el modelo construido está compuesto por una sola pieza.

A continuación, se detalla el proceso constructivo de la cañuela a través de fotografías en todas las etapas de construcción y de una descripción del proceso y de los materiales empleados en el mismo.





#### Primer molde-Negativo del canal

En primer lugar, se realizó un molde en espuma de poliuretano del negativo de las tuberías. Como se puede apreciar en la Fotografía 4, se hizo un corte grueso a la espuma para después ser lijado de tal forma que cumpliera aproximadamente con las dimensiones requeridas (Fotografía 5).



Fotografía 4. Molde de espuma.

Fotografía 5. Proceso de lijado del primer molde.

#### Pulimiento del molde

El primer molde fue recubierto con masilla poliéster de contextura gruesa (color blanco en la Fotografía 6 ) con el fin de corregir errores relativamente grandes en las medidas. Luego de esto, se usó masilla poliéster de contextura fina (color verde en la Fotografía 7) para cubrir detalles más pequeños y para obtener una rugosidad baja.



Fotografía 6. Pulimiento con masilla gruesa.



Fotografía 7. Pulimiento con masilla fina.





#### Segundo molde – Estructura de la cañuela

Después de haber rectificado que las características geométricas del canal se cumplían y de lijar el prototipo para ofrecer una textura lisa, se procedió a armar la estructura de la cañuela. Para este fin, se elaboraron anillos metálicos con diámetro un interno igual al diámetro externo de la cañuela (Fotografía 8). Luego se ajustó una lámina de poliestireno a los anillos de forma que el prototipo del canal fabricado se ajustara dentro de ellos (Fotografía 9). Finalmente, para la construcción del molde se utilizó una tabla de madera lisa que sirviera como base del molde (tapa de la cañuela).



Fotografía 8. Anillos de acero para segundo molde.



Fotografía 9. Lamina de poliestireno para segundo molde.

#### Fundición de la fibra de vidrio

El molde de la cañuela fue recubierto con un lubricante con el fin de evitar adherencia completa con la fibra de vidrio (Fotografía 10). El proceso de fundición de la fibra de vidrio consiste en la colocación de telas de fibra de vidrio de forma que se recubriera en su totalidad el molde y que se calcaran todos los detalles (Fotografía 11). Este proceso se repite hasta lograr un espesor adecuado, que para el caso de este modelo fue de 3-4 capas de tela. Conceptualmente el proceso de fundición es similar al de fundido de yeso.

#### Definición de aristas y detalles

El prototipo en fibra de vidrio fue sometido a un proceso de definición de aristas, que consistió en la aplicación de masilla poliéster o en el lijado en ciertas aristas y puntas que lo requirieran (Fotografía 12). Así mismo se recubrió todo el modelo con una pintura opaca (Fotografía 13) para que se resaltaran posibles defectos, hundimientos o abultamientos, en caso de que los hubiese







Fotografía 10. Lubricación del molde terminado.



Fotografía 11. Fundición de la fibra de vidrio.



Fotografía 12. Definición de aristas del modelo.



Fotografía 13. Pulimiento final de detalles.

#### Pintura y brillo final

Finalmente, la cañuela fue pintada y brillada (Fotografía 14 y Fotografía 15).







Fotografía 14. Cañuela terminada (A)



Fotografía 15. Cañuela terminada (B)





## 5.3.INSTRUMENTACIÓN DEL MODELO

#### 5.3.1. Estructura de medición de niveles

Al interior de la cámara de inspección fue adaptado un riel de medición cuya función es permitir la medición de los niveles a través de los ductos de la cañuela en diferentes puntos de la misma. En la Figura 10 se puede apreciar en detalle este sistema de medición.



Figura 10. Detalle de la estructura de medición de niveles en la cámara.

Así mismo, para la medición de nivel en las tuberías se realizaron perforaciones a través de toda su longitud de aproximación a la cámara para permitir el ingreso de los instrumentos necesarios. Esta estructura se puede observar en la Fotografía 16.



Fotografía 16.Estructura de medición de nivel en tuberías.





#### 5.3.2. Instrumentos de medición

Teniendo en cuenta que el objetivo de este estudio es la determinación de comportamientos y patrones hidráulicos que permitan describir el funcionamiento de una cámara con cañuela completa, es necesario usar instrumentos de medición aptos, que tengan una alta precisión y que se ajusten a los requerimientos del experimento. Por ende, se usaron sensores de medición de caudal y de nivel, cuyas características se describen a continuación.

#### 5.3.2.1. Instrumentos para medición de caudal

Para las mediciones de caudal se dispone de dos sensores. Uno de ellos, correspondiente a la tubería principal, es un sensor electromagnético de alta precisión (Fotografía 17 y Fotografía 18) ubicado en la red elevada del laboratorio de hidráulica. El caudalímetro usado para la tubería lateral posee las mismas características. A continuación se muestran las principales características de los sensores:

	Tubería principal y lateral	
Referencia Waster Master		
Tipo Electromagnético de alta precisi		
Temperatura [-20°C , 60°C]		
Frecuencia	50Hz-60Hz	
Resolución temporal	-	
Precisión	Precisión ±5%	

#### Tabla 2. Tabla técnica de sensores de caudal.



Fotografía 17. Caudalímetro tuberías.



Fotografía 18. Pantalla del caudalímetro.





### 5.3.2.2. Instrumentos para medición de nivel

Se utilizaron sensores ultrasónicos U-GAGE T30 (Fotografía 19), propiedad del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes. Sus características son:

Rango	150mm-1000mm
Frecuencia	228kHz
Tiempo de Respuesta	48 Milisegundos
Resolución	±0.25% de la distancia medida
Temperatura	[-20°C <i>,</i> 70°C]
Zona Muerta	20 Centímetros

#### Tabla 3. Tabla técnica de sensores de nivel.







Fotografía 19. Sensor de medición de nivel de flujo.





# 6. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

El procedimiento de medición realizado en el laboratorio se puede explicar por medio del siguiente diagrama de flujo:



-El proceso de medición comienza definiendo un escenario de modelación. Este escenario está definido principalmente por las caídas de cada una de las entradas ya que de acuerdo con estas se obtendrán diferentes pendientes.

-Luego de esto, se define un caudal específico a medir. La definición de los caudales se hará teniendo en cuenta que se debe abarcar todo el rango de flujo supercrítico.

-Después, se realiza la medición de los niveles de lámina de agua. Dado que se poseen 3 sensores de nivel, las mediciones de las tuberías de entrada y salida se realizan simultáneamente. Al terminar la medición de niveles en tuberías se medirán los puntos dentro de la cámara.

-Este proceso se repetirá hasta que se complete el número de caudales necesarios para lograr una caracterización completa.

-Así mismo, se cambiará la configuración inicial luego de terminar todos sus caudales hasta medir todas las configuraciones posibles.





Teniendo en cuenta que cada cambio de configuración (cambio en las estructuras de conexión para establecer diferentes alturas de caída) implica un desmonte completo de las uniones de la tubería y la cámara, y por tanto un proceso de adhesión y secado; se planteó un cronograma de configuraciones que optimiza el número de cambios en la estructura de las conexiones. Se estableció un número de 16 cambios para medir todas las configuraciones posibles. En la Tabla 4 se puede observar cada configuración y su orden respectivo.

# Combios	Configuración	Caídas(%Do)		
# Campios	Configuration	directo	lateral	
1	А	0.00	0.00	
2	В	0.00	0.25	
3	С	0.00	0.50	
4	D	0.00	0.75	
5	E	0.25	0.75	
6	F	0.50	0.75	
7	G	0.75	0.75	
8	Н	0.75	0.50	
9	Ι	0.75	0.25	
10	J	0.75	0.00	
11	К	0.50	0.00	
12	L	0.25	0.00	
13	М	0.25	0.25	
14	N	0.25	0.50	
15	0	0.50	0.50	
16	Р	0.50	0.25	

Tabla 4.Optimizacíon del orden de medición de las configuraciones.

Así mismo, en la Tabla 5, se muestra el orden de medición de cada una de las configuraciones posibles dadas las caídas en cada una de las tuberías de entrada. El número en la última columna corresponde al orden de medición y la letra corresponde a la configuración descrita en la Tabla 4. El número de caudales a medir se determinó con base en estudios realizados anteriormente con el fin de obtener resultados estadísticamente significativos.





	Ca	ída	Pendiente	Número de Caudales	Orden-Config.
FLUJO DIRECTO	0,00Do		0.0245	5	1-A
	0.2	5Do	Dada por la caída	5	10-E
	0.50	0Do	Dada por la caída	5	12-F
	0.75Do		Dada por la caída	5	14-G
	0,0	0Do	0.1721	5	2-A
FLUJO	0.2	5Do	Dada por la caída	5	4-B
LATERAL	0.50	0Do	Dada por la caída	5	6-C
	0.75Do		0.0398	5	8-D
	DIRECTO	LATERAL			
	0,00Do	0,00Do	Dada por la caída	8	3-A
	0,00Do	0.25Do	Dada por la caída	8	5-B
	0,00Do	0.50Do	Dada por la caída	8	7-C
	0,00Do	0.75Do	Dada por la caída	8	9-D
	0.25Do	0,00Do	Dada por la caída	8	20-L
	0.25Do	0.25Do	Dada por la caída	8	21-M
	0.25Do	0.50Do	Dada por la caída	8	22-N
FLUJOS	0.25Do	0.75Do	Dada por la caída	8	11-E
	0.50Do	0,00Do	Dada por la caída	8	19-К
	0.50Do	0.25Do	Dada por la caída	8	24-P
	0.50Do	0.50Do	Dada por la caída	8	23-0
	0.50Do	0.75Do	Dada por la caída	8	13-F
	0.75Do	0,00Do	Dada por la caída	8	18-J
	0.75Do	0.25Do	Dada por la caída	8	17-I
	0.75Do	0.50Do	Dada por la caída	8	16-H
	0.75Do	0.75Do	Dada por la caída	8	15-G
		TOTAL PRUEBAS		168	

Tabla 5. Orden de medición de las distintas configuraciones en el montaje.

Las pendientes determinadas hacen parte de las pruebas preliminares hechas en este estudio. Las otras pendientes deben ser halladas de acuerdo a cada configuración establecida a medida que avanzan las mediciones en estudios posteriores de acuerdo al proceso constructivo de cada uno.





# 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante la presente investigación se realizaron pruebas sobre 5 condiciones posibles en 2 de las configuraciones que permite realizar el montaje. Así entonces, se recopilaron datos de:

- Flujo directo para una caída de cero veces el diámetro de entrada.
- Flujo lateral para una caída de cero veces el diámetro de entrada.
- Unión de flujos para una altura de cero veces el diámetro de cada entrada.
- Flujo lateral para una caída de 0.75 veces el diámetro de entrada.
- Unión de flujos para una altura de cero veces el diámetro en la entrada principal y de 0.75 veces el diámetro en la entrada lateral.

Para cada una de estas condiciones se realizaron diversos caudales. Las características geométricas e hidráulicas, así como los perfiles de los niveles de agua en las tuberías y en la cámara, se encuentran en los anexos del presente documento (Tabla 38 a Tabla 69 y Figura 12 a Figura 59).

Teniendo en cuenta los datos recopilados, además de las gráficas y tablas usadas para su tratamiento, se hará un análisis de los resultados encontrados. El análisis será de carácter cualitativo dado que la cantidad de datos recopilados no son representativos para realizar un análisis estadístico con el fin de encontrar ecuaciones de diseño.

### 7.1.Análisis de ondas

### 7.1.1. Flujo directo

Tal como se mencionó en el marco teórico, las ondas tipo A son características del flujo directo en cámaras de inspección y se forman por el choque del agua con la pared lateral del canal de entrada a 90°.

Para las pruebas realizadas sin caída, la altura máxima de la onda nunca superó el 53% de la altura de la cañuela dentro de la cámara, correspondiente a una altura de 16.56 cm para el caudal máximo probado (Figura 18, anexos).





Sin embargo, se evidenció que la longitud de la onda se extendió hacia la tubería de salida para caudales mayores a 50.53 L/s, llegando a tomar alturas de hasta 22.06 cm (70% de la altura máxima de la cañuela ó 86% del diámetro de dicha tubería).

En la Fotografía 20 y la Fotografía 21 se puede evidenciar como se forma la onda en principio para caudales medios y como se extiende hacia la tubería de salida a medida que los caudales aumentan. En estas se puede apreciar como la altura máxima de están ondas se aproxima a la unión del canal lateral de la tubería a 90° con la entrada de la tubería de salida.



Fotografía 20. Formación de Onda tipo A en flujo directo.







Fotografía 21. Extensión de la Onda tipo A hacia la tubería de salida.

### 7.1.2. Flujo lateral

El flujo lateral corresponde a la condición en la cual solo fluye agua por la entrada de 90°. Los resultados encontrados se ajustan a los esperados de acuerdo con las fuentes teóricas estudiadas.

En este caso, se estudiaron ondas tipo C y tipo D. Las ondas tipo C son aquellas resultantes del choque del flujo contra la pared del canal principal que queda perpendicular a la entrada lateral. Por otro lado, las ondas tipo D resultan del choque del flujo contra la pared lateral exterior de su mismo canal (lateral).

Para el caso de flujo lateral evaluado sin caída, se encontró una altura máxima de onda de 20.35 cm o 65.6% de la altura total de cañuela. Esta altura máxima, correspondiente a una relación de llenado de 90% en la tubería, siempre se ubicó dentro de la cámara, aunque para los caudales máximos la lámina de agua formada por la transición desde este punto máximo hasta el flujo





normal de la tubería de salida pasó cerca al diámetro total de esta última, evidenciando así un riesgo de obstrucción y posible sobrecarga.



Fotografía 22. Formación de onda tipo C en flujo lateral (Vista hacia adentro).



Fotografía 23. Formación de onda tipo C en flujo lateral (Vista desde adentro).





En la Fotografía 22 y la Fotografía 23 se puede evidenciar la formación de este tipo de onda para caudales medio-altos con relaciones de llenado de 18% y Número de Froude de 1.86 en la tuberia de salida y de 16% y 3.63 para la tubería lateral, respectivamente. Así mismo, en la Fotografía 24 se puede evidenciar que la tubería de salida corre el riesgo de sobrecargarse en su entrada cuando el caudal lateral es alto; además, en la Fotografía 25 se ve como una masa de agua se represa en la tubería principal dado que por ella no esta fluyendo ningún caudal. Asi pues, a pesar de que la relacion de llenado de la tubería de salida es de 44.78%, en su entrada la altura de onda contra la pared es de 100% el diámetro de la misma.



Fotografía 24. Riesgo de obstrucción de tubería de salida por onda C.



Fotografía 25. Represamiento de agua en tubería principal por flujo lateral.





Este efecto podría analizarse desde diferentes puntos de vista: para pendientes bajas la masa de agua se extendería aguas arriba de la tubería principal tanto como la topografía del sistema lo permitiese hasta llegar un punto de sobrecarga de dicha tubería (este proceso sería mas lento). Para sistemas con tuberías principales de pendiente alta, la tubería se sobrecargaría rápidamente dada la diferencia entre su pendiente y la lámina de agua de la cámara.

No hay una diferencia significativa en los resultados para las pruebas de flujo lateral para caída de 75% del diámetro de entrada con respecto a la condición sin caída. Para esta caída máxima se obtuvo un 1% de aumento en el nivel máximo de la onda con respecto a la cañuela para un caudal máximo 1.7 litros por segundo mayor al probrado en la prueba sin caída (Figura 43).

Finalmente, se considera que la onda D es irrelevante en el estudio dado que presentó alturas máximas mucho menores a las reportadas para la onda tipo C en todo el rango de caudales estudiados.

### 7.1.3. Unión de flujos

Para la unión de flujos se combinaron caudales entre 10 L/s - 40 L/s para la tubería principal con caudales entre 6.5 L/s - 18.5 L/s para la tubería lateral (configuración sin caída); y con caudales entre 10.75 L/s - 55 L/s para la tubería directa con caudales entre 5 L/s hasta 17 L/s para la tubería lateral (configuración con 75% Do de caída en la tubería lateral).

Se evaluó la presencia de ondas tipo A ( causadas por el choque del flujo directo con la pared del canal lateral), ondas C ( causadas por el choque del flujo lateral con la pared del canal principal) y ondas tipo E, propias de la unión de flujo y causada por el choque de los dos flujos convergentes.

De acuerdo con los datos recolectados y las gráficas realizadas, las ondas A y las ondas C tuvieron una repercusión menor en cuanto a la capacidad de la cámara dado que sus alturas máximas fueron de fueron, en la mayoría de los casos, más bajas que las alturas de la onda tipo E. Sin embargo la diferencia entre las máximas alturas no es significativa: los máximos niveles de las ondas A, C y E fueron de 20.57 cm, 20.59 cm y 20.61 cm para todas las condiciones probadas ( con caída y sin caída), lo que equivale al 66.4% de la altura máxima de la cañuela.

En la Fotografía 26 se puede observar el proceso de formación de cada una de los tres tipos de onda característicos de esta configuración para un caudal medio. Las ondas A y C se hacen menos visibles a medida que cada caudal (directo y lateral) aumentan, pues forman un perfil contínuo ondulado en conjunto con la onda E, dando origen a una curva de remanso.







Fotografía 26. Tipos de ondas característicos de unión de flujos.

Así pues, la capacidad de la cámara en cuanto a unión de flujos no depende de los niveles de las ondas dentro de la cámara sino de la posible sobrecarga de las tuberías de menor pendiente dada la formación de resaltos hidráulicos que se transladan aguas arriba de estas (Fotografía 27).



Fotografía 27. Formación de resalto hidráulico en la entrada de la tubería principal del sistema.





Para el presente estudio, no se permitió la sobrecarga de las tuberías. Por este motivo todos los resaltos formados se ubicaron en puntos adyacentes a las entradas de las tuberías en la cámara. En la Figura 11, se puede apreciar la formación de resaltos hidráulicos para combinaciones de  $Q_{Directo}=20.8$  L/s con  $Q_{Lateral}=15.4$  L/s (color naranja) y  $Q_{Directo}=10.75$  L/s con  $Q_{Lateral}=10.24$  L/s (púrpura claro). Según esto, se comienzan a formar resaltos hidráulicos cuando el caudal principal (dominante) es apenas un 25% mayor o cuando la multiplicación de caudal y velocidad para la tubería principal es el 57% con respecto a la de la tubería lateral.







Fotografía 28. Riesgo de sobrecarga en unión de flujos por formación de resaltos hidráulicos.





Además, en la Fotografía 28 se puede evidenciar el principal problema de la formación de resaltos hidráulicos en el sistema, que consiste en la obstrucción de la tubería de salida y posible sobrecarga de la cámara de inspección, fenómeno que resulta en la presurización de las tuberías y en la expulsión, en muchas ocasiones, de las aguas que se estancan en la cámara hacia las calles.

Finalmente, se puede observar en las tablas anexadas para unión de flujos (Tabla 49 a Tabla 56 y Tabla 62 a Tabla 69) que para muchas de las pruebas se tiene flujo transicional en la tubería de salida. Este flujo se caracteriza por ser inestable dado que se encuentra en un rango de número de Froude de 0.7 a 1.5. Sin embargo, no es posible determinar el comportamiento completo de dicha tubería dado que su longitud, determinada por el espacio constructivo disponible, no es suficiente para que se desarrolle todo el perfil.





## 8. CONCLUSIONES

- ✓ Teniendo en cuenta las mediciones y observaciones realizadas en este estudio, es posible concluir que las cámaras de inspección con flujo supercrítico se caracterizan por la formación de diferentes tipos de ondas superficiales que dependen de la dirección del flujo y del canal de conducción utilizado. El caso más crítico de estas ondas es la tipo E, por medio de la cual se forman resaltos hidráulicos que pueden traer problemas de presurización y sobrecarga de tuberías y de la cámara.
- El uso de cañuela completa, cuya altura es igual al diámetro mayor de las tuberías del  $\checkmark$ sistema, evita en la mayoría de los casos el choque de las ondas formadas con las paredes de la cámara de inspección, y por lo tanto la formación de ondas mayores. Sin embargo, la utilización de cañuela completa puede tener fallas de funcionamiento para grandes caudales si no es diseñada adecuadamente dado que sus paredes altas hacen que las ondas que chocan contra ellas tomen una dirección vertical. Estas ondas que se van hacia arriba pueden chocar contra las paredes de la cámara ubicadas en la parte superior de las salidas y provocar posibles obstrucciones. El correcto diseño de la cámara evitará que se superen relaciones de llenado lo suficientemente altas como para que el choque de las ondas formadas contra la pared de la cámara, ubicada en la parte superior de los diámetros de salida, afecte significativamente el desempeño de la misma. Así pues, teniendo en cuenta las pruebas realizadas hasta el momento, se recomienda en ningún caso permitir relaciones de llenado de más del 70-75% con el fin de evitar sobrecargas en la tubería. La altura de las ondas provocadas por cambios en los caudales del sistema pueden llegar a superar el diámetro de la tubería en caso de que se permitan relaciones de llenado mayores a las anteriormente mencionadas.
- Dado que la altura del canal de conducción es mayor al diámetro total de cada una de las tuberías presentes en la cámara de unión, la totalidad del flujo se canaliza a través de este.
  Teniendo en cuenta este factor, se puede concluir que a diferencia de estudios realizados





con cañuelas a media altura, no existen zonas de recirculación y/o vórtices representativos. Este hecho aumenta la capacidad hidráulica de la estructura dado que se evita la acumulación de agua dentro de la cámara.

✓ A pesar de que la presente investigación se centró en el diseño y fabricación de la cañuela completa, en la construcción del montaje en el laboratorio y en la realización de algunas pruebas previas para el análisis cualitativo, es necesario realizar la medición de la totalidad de condiciones con el fin de realizar un análisis estadístico que permita dar recomendaciones de diseño en cámaras de inspección de cañuela completa con flujo supercrítico.





# 9. RECOMENDACIONES

- Se puede decir que el montaje realizado es representativo en contraste con la realidad, dado que es construido a una escala muy cercana a la real. Sin embargo, se recomienda extender la longitud de las tuberías lateral y de salida para próximos estudios, con el fin de permitir completamente el desarrollo de los perfiles y/o fenómenos tales como formación de resaltos en dichas tuberías. Este cambio acercaría radicalmente el modelo a la realidad.
- Se recomienda realizar un estudio comparativo entre los resultados de investigaciones encaminadas a determinar el desempeño hidráulico de cámaras de inspección con media cañuela o cañuela completa. Este, podría permitir diferenciar rangos de caudales o condiciones para los cuales puede o debe usarse cada tipo de canal de conducción, optimizando el sistema hidráulica y económicamente.
- Se recomienda realizar pruebas en cada una de las configuraciones posibles de la cámara, teniendo en cuenta las alturas de caída en cada entrada, las pendientes de cada tubería, y en general, cada una de las variables que pueda ser estudiada. Así mismo, teniendo en cuenta lo observado en el laboratorio, podría ser de gran interés estudiar el comportamiento de la cámara ante condiciones no estables, es decir, sometida a cambios de caudal en lapsos de tiempo relativamente cortos.





# 10. BIBLIOGRAFÍA

- Del Giudice, G., Gisonni, C., and Hager, W. H. 2000. "Supercritical flow in bend manhole." *Journal* of *Irrigation and Drainage Engineering*, 1, 48–56.
- Del Giudice, G., and Hager, W.H. 2001. "Supercritical flow in 45° junction manhole." J. Irrig. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 127, 100–108.
- Gisonni, C., and Hager, W. H. 2002. "Supercritical flow in manholes with a bend extension." *Experiments in Fluids*, 32, 357–365.
- Gisonni, C., and Hager, W.H. 2002. "Supercritical flow in the 90° junction." Urban Water, 4, 363–372.
- Gargano, R., and Hager, W. H. 2002. "Supercritical flow across sewer manholes." *Journal of Hydraulic engineering*, 128, 1014–1017.
- Trujillo M.,(2013). "*Modelación física de cámaras de unión bajo flujo supercrítico*". Tesis de maestría. Universidad de los Andes. Impresa.
- Saldarriaga J., Bermudez N., Rubio D. (2011) "Hydraulic behavior of junction manholes under supercritical flow conditions". J.*Hydraulic Research* 50(6) 631-636
- Saldarriaga J., (2012) Notas de clase de Sistemas integrados de Drenaje Urbano.
- Zhao, C., Zhu, D., and Rajaratnam, N. 2004 "Supercritical sewer flows at a combining junction: A model study of the Edworthy trunk junction, Calgary, Alberta" *J. Environ. Eng*, 3, 343–353.





# **11. ANEXOS**

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	6.48	3.31	4.27
Punto 2	5.53	3.06	4.01
Punto 3	5.18	2.69	4.89
Punto 4	4.50	2.70	4.75
Punto 5	3.84	2.80	4.05
Punto 6	3.05	2.81	
Punto 7	2.17	2.22	
Punto 8	2.62	2.67	
Punto 9	3.99	2.80	
Punto 10	5.44	2.67	
Punto 11	4.70	2.90	
Punto 12	4.71	2.56	
Punto 13	5.15	4.66	
Punto 14	5.56	4.80	
Punto 15	5.39	4.61	
Punto 16	4.70	4.63	
Punto 17	3.97	4.72	
Punto 18	3.13	4.55	

Tabla 6. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 1.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	9.25	6.50	8.47
Punto 2	9.04	6.45	7.04
Punto 3	8.58	6.49	6.76
Punto 4	8.07	5.57	7.79
Punto 5	7.36	6.86	8.16
Punto 6	6.16	5.62	
Punto 7	4.39	5.16	
Punto 8	3.39	5.84	
Punto 9	5.55	6.23	
Punto 10	8.40	5.88	
Punto 11	7.68	5.54	
Punto 12	7.45	5.44	
Punto 13	7.56	7.92	
Punto 14	8.17	7.64	
Punto 15	8.29	7.57	
Punto 16	8.07	7.71	
Punto 17	7.36	7.80	
Punto 18	6.70	7.76	

Tabla 7. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 2.




Tabla 8. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 3.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	11.62	9.61	10.58
Punto 2	11.34	8.55	8.40
Punto 3	11.31	7.86	9.30
Punto 4	10.61	8.90	10.82
Punto 5	9.62	8.78	10.48
Punto 6	8.41	7.44	
Punto 7	7.14	7.31	
Punto 8	4.73	7.87	
Punto 9	7.85	8.09	
Punto 10	10.59	8.20	
Punto 11	10.03	7.97	
Punto 12	9.58	7.56	
Punto 13	9.38	10.57	
Punto 14	9.38	10.51	
Punto 15	9.76	10.02	
Punto 16	9.52	9.41	
Punto 17	9.14	9.94	
Punto 18	8.71	10.14	

Tabla 9. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 4.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	13.19	10.07	12.26
Punto 2	13.30	10.88	10.53
Punto 3	13.10	10.34	11.06
Punto 4	12.54	9.80	12.56
Punto 5	11.59	10.02	12.62
Punto 6	10.21	9.78	
Punto 7	8.78	9.67	
Punto 8	7.81	9.63	
Punto 9	10.28	9.52	
Punto 10	12.70	9.38	
Punto 11	12.02	10.04	
Punto 12	11.54	9.82	
Punto 13	11.20	11.90	
Punto 14	11.04	12.26	
Punto 15	11.31	12.24	
Punto 16	11.11	11.78	
Punto 17	10.58	11.81	
Punto 18	10.23	11.92	





CÁMARA **ENTRADA** SALIDA Punto 1 13.91 12.22 17.66 11.44 Punto 2 13.67 14.54 Punto 3 13.68 10.90 11.47 13.56 10.81 12.80 Punto 4 12.92 13.70 Punto 5 10.97 Punto 6 12.05 11.65 10.62 11.35 Punto 7 9.93 11.36 Punto 8 Punto 9 14.15 10.97 Punto 10 14.36 10.95 Punto 11 13.95 11.33 Punto 12 13.33 11.02 Punto 13 12.71 13.53 Punto 14 12.37 13.73 Punto 15 12.11 13.46 11.93 13.30 Punto 16 Punto 17 11.62 13.28 13.53 Punto 18 11.31

Tabla 10. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 5.

 Tabla 11. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 6.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	14.97	14.25	19.73
Punto 2	14.64	13.18	16.13
Punto 3	14.52	12.54	12.70
Punto 4	14.16	12.18	13.94
Punto 5	13.50	12.14	14.20
Punto 6	12.48	11.89	
Punto 7	10.95	11.54	
Punto 8	10.86	11.74	
Punto 9	16.48	11.92	
Punto 10	15.16	11.98	
Punto 11	14.94	12.29	
Punto 12	14.67	11.76	
Punto 13	14.11	14.25	
Punto 14	13.31	15.14	
Punto 15	13.43	15.24	
Punto 16	13.33	14.13	
Punto 17	12.75	13.64	
Punto 18	12.57	13.99	





	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	16.56	12.95	22.06
Punto 2	16.14	12.51	18.87
Punto 3	15.78	12.78	14.14
Punto 4	15.07	12.67	14.42
Punto 5	14.23	12.55	14.76
Punto 6	13.16	12.73	
Punto 7	11.87	12.81	
Punto 8	11.45	12.63	
Punto 9	15.17	12.98	
Punto 10	15.59	13.45	
Punto 11	15.33	13.70	
Punto 12	15.45	13.54	
Punto 13	15.49	14.81	
Punto 14	15.02	15.89	
Punto 15	14.41	16.58	
Punto 16	14.56	15.86	
Punto 17	14.49	15.15	
Punto 18	13.15	14.75	

Tabla 12. Datos de nivel de agua para flujo directo con caída 0Do - Prueba No 7.

Tabla 13. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0Do - Prueba No 1.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	3.83	6.12	5.63
Punto 2	2.62	5.59	4.63
Punto 3	3.45	4.98	4.22
Punto 4	3.95	4.26	4.78
Punto 5	3.43	4.03	5.19
Punto 6	5.29	3.72	
Punto 7	6.13	3.71	
Punto 8	7.30		
Punto 9	6.97		
Punto 10	4.24		
Punto 11	5.56		
Punto 12	13.22		
Punto 13	12.48		
Punto 14	9.78		





Tabla 14. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0Do - Prueba No 2.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	7.55	8.71	10.01
Punto 2	6.39	9.70	10.17
Punto 3	6.55	8.85	10.23
Punto 4	6.51	7.55	9.07
Punto 5	6.52	6.74	8.04
Punto 6	8.50	6.43	
Punto 7	8.35	6.66	
Punto 8	10.03		
Punto 9	8.02		
Punto 10	9.41		
Punto 11	11.70		
Punto 12	19.18		
Punto 13	19.81		
Punto 14	18.89		

Tabla 15. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0Do - Prueba No 3.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	8.22	9.26	11.81
Punto 2	7.51	10.07	11.49
Punto 3	7.09	9.83	10.86
Punto 4	8.38	8.60	10.94
Punto 5	7.76	7.73	9.21
Punto 6	9.68	7.06	
Punto 7	9.71	7.73	
Punto 8	10.95		
Punto 9	9.45		
Punto 10	10.47		
Punto 11	12.83		
Punto 12	19.35		
Punto 13	19.99		
Punto 14	20.27		





Tabla 17.	Datos de n	ivel de agua p	oara unión de	flujos con caíd	a ODo - Pru	eba No 1.
			CÁMADA			

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	13.40	6.29	12.34
	Punto 2	14.89	6.26	11.19
	Punto 3	16.20	6.31	11.57
	Punto 4	16.91	5.50	11.46
	Punto 5	18.19	6.46	10.86
	Punto 6	18.68	5.29	
	Punto 7	16.39	5.54	
2	Punto 8	14.01	5.40	
RA	Punto 9	14.35	5.94	
En.	Punto 10	20.52	5.91	
0	Punto 11	13.59	5.33	
	Punto 12	14.56	5.50	
	Punto 13	15.97	5.38	
	Punto 14	16.91	7.52	
	Punto 15	18.57	7.45	
	Punto 16	18.19	8.01	
	Punto 17	17.56	7.76	
	Punto 18	15.54	7.54	
	Punto 19	20.55	6.24	
	Punto 20	11.75	6.04	
	Punto 21	12.39	5.16	
	Punto 22	13.31	4.34	
	Punto 23	13.66	4.17	
	Punto 24	14.72	4.51	
PAL	Punto 25	12.20	4.17	
ALL	Punto 26	14.28		
$\mathbf{\nabla}$	Punto 27	15.03		
	Punto 28	15.19		
	Punto 29	17.46		
	Punto 30	18.29	Para cá	mara
	Punto 31	17.29		Derecha
	Punto 32	15.30		Izquierda

Tabla 16. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0Do - Prueba No 4.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	9.79	9.93	14.46
Punto 2	9.60	11.26	11.30
Punto 3	9.79	10.98	12.79
Punto 4	9.84	10.02	12.54
Punto 5	10.59	9.00	11.20
Punto 6	11.77	8.02	
Punto 7	10.06	8.40	
Punto 8	11.55		
Punto 9	12.17		
Punto 10	13.09		
Punto 11	17.00		
Punto 12	20.35		
Punto 13	20.08		
Punto 14	20.23		





#### Tabla 18. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 2.

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	11.38	9.75	13.70
	Punto 2	11.06	8.13	12.85
	Punto 3	11.50	7.66	12.73
	Punto 4	14.89	8.68	12.86
	Punto 5	17.74	8.03	12.35
	Punto 6	19.73	7.33	
	Punto 7	18.44	7.60	
2	Punto 8	16.35	7.76	
RA	Punto 9	14.77	7.31	
EN.	Punto 10	10.02	7.23	
0	Punto 11	9.33	7.31	
	Punto 12	10.24	7.14	
	Punto 13	14.00	9.26	
	Punto 14	16.63	9.71	
	Punto 15	18.00	9.60	
	Punto 16	18.11	9.36	
	Punto 17	17.22	9.65	
	Punto 18	16.05	9.41	
	Punto 19	12.26	6.19	
	Punto 20	10.42	6.15	
	Punto 21	10.66	5.37	
	Punto 22	11.02	4.87	
	Punto 23	15.33	4.56	
ν.	Punto 24	14.16	4.01	
RAL	Punto 25	9.95	4.04	
, AV	Punto 26	12.71		
$\mathbf{v}$	Punto 27	12.46		
	Punto 28	13.60		
	Punto 29	17.69		
	Punto 30	18.11	Para c	ámara:
	Punto 31	17.74		Derecha
	Punto 32	16.13		Izquierda

Tabla 19. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 3.

		- (		
		CAMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	18.88	9.96	16.51
	Punto 2	19.93	7.76	14.53
	Punto 3	20.31	7.51	15.03
	Punto 4	20.56	8.80	15.25
	Punto 5	20.58	7.89	14.09
	Punto 6	20.51	7.31	
	Punto 7	20.32	7.42	
2	Punto 8	19.37	7.99	
1 R Put	Punto 9	18.18	7.87	
EN.	Punto 10	17.34	7.20	
0	Punto 11	18.90	7.32	
	Punto 12	20.15	7.53	
	Punto 13	20.44	10.03	
	Punto 14	20.52	9.92	
	Punto 15	20.53	9.34	
	Punto 16	20.55	9.66	
	Punto 17	20.38	9.71	
	Punto 18	19.71	11.57	
	Punto 19	15.63	7.60	
	Punto 20	16.75	8.06	
	Punto 21	17.80	7.58	
	Punto 22	18.27	6.56	
	Punto 23	20.05	5.97	
	Punto 24	18.75	5.69	
RAL	Punto 25	17.42	6.78	
ATK.	Punto 26	19.00		
$\sim$	Punto 27	19.63		
	Punto 28	20.47		
	Punto 29	20.50		
	Punto 30	20.53	Para c	ámara:
	Punto 31	20.50		Derecha
	Punto 32	19.97		Izquierda





#### Tabla 20. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 4.

		CÁMARA ENTRADA		SALIDA
	Punto 1	14.43	9.96	18.31
	Punto 2	17.37	10.53	16.40
	Punto 3	19.79	10.37	15.97
	Punto 4	20.51	9.64	16.33
	Punto 5	20.58	9.85	15.73
	Punto 6	20.54	9.71	
	Punto 7	20.57	9.63	
Ň	Punto 8	20.32	9.46	
RA	Punto 9	20.19	9.19	
EN.	Punto 10	15.15	9.15	
0	Punto 11	16.02	9.22	
	Punto 12	18.99	9.60	
	Punto 13	20.27	9.84	
	Punto 14	20.59	11.54	
	Punto 15	20.59	12.45	
	Punto 16	20.59	12.49	
	Punto 17	20.59	11.67	
	Punto 18	20.52	11.84	
	Punto 19	16.90	7.30	
	Punto 20	17.85	8.19	
	Punto 21	18.40	7.14	
	Punto 22	19.09	6.26	
	Punto 23	20.34	5.78	
×.	Punto 24	20.04	5.62	
RAL	Punto 25	18.79	6.63	
A	Punto 26	19.18		
~	Punto 27	19.75		
	Punto 28	20.30		
	Punto 29	20.53		
	Punto 30	20.51	Para c	ámara:
	Punto 31	20.53		Derecha
	Punto 32	20.47		Izquierda

Tabla 21. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 5.

		CAMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	20.58	10.03	20.06
	Punto 2	20.60	10.80	17.64
	Punto 3	20.60	10.40	17.09
	Punto 4	20.60	9.77	17.58
	Punto 5	20.54	9.73	16.48
	Punto 6	20.15	9.71	
	Punto 7	20.54	9.38	
Ň	Punto 8	20.42	9.32	
12m	Punto 9	20.55	9.17	
En.	Punto 10	20.54	9.18	
0	Punto 11	20.56	9.59	
	Punto 12	20.56	9.82	
	Punto 13	20.56	11.48	
	Punto 14	20.52	12.28	
	Punto 15	20.50	12.25	
	Punto 16	20.54	11.64	
	Punto 17	20.55	11.53	
	Punto 18	20.48	15.27	
	Punto 19	19.58	8.18	
	Punto 20	19.94	9.14	
	Punto 21	19.65	8.38	
	Punto 22	20.22	7.41	
	Punto 23	20.55	6.42	
<b>.</b> .	Punto 24	20.43	6.59	
RAL	Punto 25	20.02	11.89	
ATE	Punto 26	20.42		
	Punto 27	20.37		
	Punto 28	20.43		
	Punto 29	20.56		
	Punto 30	20.56	Para c	ámara:
	Punto 31	20.57		Derecha
	Punto 32	20.57		Izquierda





#### Tabla 22.Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 6.

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	20.57	6.54	14.07
	Punto 2	20.58	6.39	12.79
	Punto 3	20.58	6.90	13.87
	Punto 4	20.49	5.48	13.38
	Punto 5	20.58	6.54	12.31
	Punto 6	20.53	5.85	
	Punto 7	19.42	5.11	
ν.	Punto 8	17.28	5.75	
RAN	Punto 9	16.60	6.44	
EN	Punto 10	20.55	6.35	
0.	Punto 11	20.55	5.55	
	Punto 12	20.55	5.47	
	Punto 13	20.56	9.24	
	Punto 14	20.48	12.74	
	Punto 15	20.57	15.50	
	Punto 16	20.33	17.84	
	Punto 17	19.25	19.67	
	Punto 18	17.45	20.22	
	Punto 19	15.66	7.31	
	Punto 20	16.53	7.76	
	Punto 21	17.20	7.40	
	Punto 22	17.04	6.26	
	Punto 23	16.55	5.68	
<b>.</b>	Punto 24	17.79	5.53	
RAY	Punto 25	16.34	6.07	
AL	Punto 26	18.85		
$\mathbf{v}$	Punto 27	19.84		
	Punto 28	20.24		
	Punto 29	20.42		
	Punto 30	20.48	Para cá	mara:
	Punto 31	19.46		Derecha
	Punto 32	17.10		Izquierda

Tabla 23.Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 7.

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	17.16	4.03	9.90
	Punto 2	17.21	3.39	9.07
	Punto 3	17.23	4.13	9.44
	Punto 4	17.29	3.45	9.50
	Punto 5	17.19	3.75	9.12
	Punto 6	17.07	3.65	
	Punto 7	12.99	3.25	
	Punto 8	11.47	3.18	
1 RAV	Punto 9	12.59	3.51	
EN.	Punto 10	16.89	3.83	
0	Punto 11	17.10	6.42	
	Punto 12	17.10	7.04	
	Punto 13	17.17	14.20	
	Punto 14	17.06	14.58	
	Punto 15	17.15	15.18	
	Punto 16	15.58	15.35	
	Punto 17	12.76	15.32	
	Punto 18	11.92	15.58	
	Punto 19	8.94	6.16	
	Punto 20	9.48	6.28	
	Punto 21	10.51	5.45	
	Punto 22	11.53	4.72	
	Punto 23	11.98	4.44	
<b>x</b> .	Punto 24	12.82	4.35	
RAN	Punto 25	8.65	4.31	
AL	Punto 26	11.89		
$\mathbf{\vee}$	Punto 27	13.79		
	Punto 28	12.93		
	Punto 29	13.03		
	Punto 30	15.87	Para cá	mara:
	Punto 31	12.63		Derecha
	Punto 32	11.76		Izquierda





#### Tabla 24. Datos de nivel de agua para unión de flujos con caída 0Do - Prueba No 8.

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	9.31	5.89	10.84
	Punto 2	8.87	6.28	9.95
	Punto 3	10.15	6.28	9.78
	Punto 4	12.35	4.93	10.09
	Punto 5	15.52	6.68	9.66
	Punto 6	16.10	5.09	
	Punto 7	13.88	5.32	
2	Punto 8	11.69	5.98	
1 R Put	Punto 9	12.59	5.78	
EN.	Punto 10	8.11	5.57	
0	Punto 11	7.77	5.20	
	Punto 12	8.81	5.63	
	Punto 13	13.04	8.09	
	Punto 14	14.93	7.72	
	Punto 15	16.14	7.88	
	Punto 16	15.95	7.90	
	Punto 17	14.45	8.02	
	Punto 18	12.79	7.51	
	Punto 19	8.82	5.36	
	Punto 20	9.16	4.97	
	Punto 21	9.56	4.49	
	Punto 22	10.22	3.92	
	Punto 23	11.69	3.60	
×.	Punto 24	12.64	3.47	
RAL	Punto 25	9.37	3.21	
A	Punto 26	10.62		
~	Punto 27	11.87		
	Punto 28	11.63		
	Punto 29	14.75		
	Punto 30	15.81	Para c	ámara:
	Punto 31	14.40		Derecha
	Punto 32	12.64		Izquierda

Tabla 25. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 1.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	20.56	5.70	4.10
Punto 2	5.48	5.55	4.18
Punto 3	5.49	5.22	4.08
Punto 4	6.45	4.46	4.02
Punto 5	7.17	4.20	4.23
Punto 6	7.34	4.01	
Punto 7	20.19	3.77	
Punto 8	-0.25		
Punto 9	2.13		
Punto 10	5.07		
Punto 11	6.16		
Punto 12	8.56		
Punto 13	7.15		
Punto 14	6.57		





Tabla 26. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 2.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	20.58	9.15	9.44
Punto 2	8.66	8.63	8.90
Punto 3	7.38	8.19	7.35
Punto 4	9.13	7.97	6.69
Punto 5	10.11	7.15	6.43
Punto 6	10.76	6.77	
Punto 7	20.54	6.88	
Punto 8	5.98		
Punto 9	2.93		
Punto 10	7.99		
Punto 11	7.95		
Punto 12	18.20		
Punto 13	16.20		
Punto 14	17.60		

Tabla 27. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 3.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	20.59	11.48	13.21
Punto 2	15.51	11.05	11.10
Punto 3	13.35	10.24	11.39
Punto 4	12.16	9.99	10.39
Punto 5	12.20	9.94	8.72
Punto 6	14.19	9.33	
Punto 7	19.71	8.73	
Punto 8	19.67		
Punto 9	9.52		
Punto 10	10.64		
Punto 11	10.54		
Punto 12	20.28		
Punto 13	19.64		
Punto 14	20.26		





Tabla 28. Datos de nivel de agua para flujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 4.

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	18.89	11.92	15.37
Punto 2	19.51	12.43	12.64
Punto 3	12.00	11.32	13.09
Punto 4	14.09	11.04	12.97
Punto 5	11.50	10.75	11.21
Punto 6	14.44	10.82	
Punto 7	17.94	10.09	
Punto 8	20.53		
Punto 9	18.86		
Punto 10	8.99		
Punto 11	11.60		
Punto 12	20.26		
Punto 13	20.04		
Punto 14	20.11		

Tabla 29. Datos de nivel de agua para fl	ujo lateral con caída 0.75Do - Prueba No 5
--	--

	CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
Punto 1	19.84	12.91	15.67
Punto 2	20.48	13.56	13.47
Punto 3	10.53	13.22	14.07
Punto 4	13.84	11.99	14.12
Punto 5	11.76	12.06	12.72
Punto 6	15.18	11.96	
Punto 7	18.25	11.53	
Punto 8	15.62		
Punto 9	10.66		
Punto 10	10.91		
Punto 11	10.45		
Punto 12	20.42		
Punto 13	20.00		
Punto 14	20.05		



Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA "Comportamiento hidráulico en cámaras de inspección de 90 grados con flujo supercrítico: modelación física."



#### Tabla 30. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do -Prueba No 1.

		CÁMARA ENTRADA		SALIDA
	Punto 1	7.12	3.86	8.83
	Punto 2	6.68	3.41	8.02
	Punto 3	7.62	3.91	8.45
	Punto 4	9.97	3.24	7.98
	Punto 5	11.67	3.46	8.02
	Punto 6	12.89	3.51	
	Punto 7	11.46	3.11	
	Punto 8	10.54	3.10	
12 Pr	Punto 9	10.80	3.48	
AN.	Punto 10	6.45	3.72	
0	Punto 11	5.94	3.33	
	Punto 12	7.79	3.28	
	Punto 13	9.96	5.42	
	Punto 14	11.02	5.36	
	Punto 15	12.60	5.34	
	Punto 16	13.12	5.42	
	Punto 17	12.44	5.56	
	Punto 18	10.89	5.36	
	Punto 19	20.29	5.59	
	Punto 20	9.69	5.63	
	Punto 21	9.95	5.33	
	Punto 22	10.96	4.56	
	Punto 23	10.67	4.36	
	Punto 24	11.30	4.00	
RAT	Punto 25	20.39	3.82	
, AIV	Punto 26	4.34		
~	Punto 27	8.11		
	Punto 28	9.77		
	Punto 29	12.64		
	Punto 30	13.24	Para c	ámara:
	Punto 31	12.44		Derecha
	Punto 32	10.89		Izquierda

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	17.40	4.12	12.00
	Punto 2	17.56	3.41	13.28
	Punto 3	17.63	3.85	12.44
	Punto 4	17.64	3.37	10.94
	Punto 5	17.63	3.63	10.01
	Punto 6	16.15	3.78	
	Punto 7	14.07	4.69	
	Punto 8	15.45	6.03	
1 RAY	Punto 9	15.17	10.01	
EN.	Punto 10	17.29	10.85	
0	Punto 11	17.37	11.87	
	Punto 12	17.55	13.50	
	Punto 13	17.52	15.64	
	Punto 14	17.86	15.62	
	Punto 15	18.85	15.95	
	Punto 16	19.74	15.89	
	Punto 17	19.64	16.07	
	Punto 18	18.99	16.07	
	Punto 19	20.55	9.79	
	Punto 20	13.41	8.77	
	Punto 21	14.20	8.37	
	Punto 22	15.27	8.25	
	Punto 23	15.46	7.56	
	Punto 24	15.12	7.12	
RAL	Punto 25	20.46	7.40	
AT	Punto 26	8.07		
$\sim$	-			

9.60

13.56

14.52

19.50

19.71

18.01

Para cámara:

Derecha

Izquierda

Punto 27

Punto 28

Punto 29

Punto 30

Punto 31 Punto 32

#### Tabla 31. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do -Prueba No 2.



Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA "Comportamiento hidráulico en cámaras de inspección de 90 grados con flujo supercrítico: modelación física."



#### Tabla 32. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do -Prueba No 3.

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA	
	Punto 1	17.54	20.64	15.61	
	Punto 2	19.08	20.80	14.68	
	Punto 3	19.45	20.81	15.57	
	Punto 4	19.97	19.32	14.16	
	Punto 5	20.22	20.78	13.21	
	Punto 6	20.19	19.93		
	Punto 7	19.42	20.67		
	Punto 8	18.43	19.60		
12 AV	Punto 9	18.09	20.79		
EN.	Punto 10	17.23	19.59		
0	Punto 11	17.85	20.89		
	Punto 12	19.07	20.90		
	Punto 13	19.96	13.34		
	Punto 14	20.44	13.28		
	Punto 15	20.54	13.31		
	Punto 16	20.50	13.30		
	Punto 17	19.78	13.32		
	Punto 18	18.95	13.34		
	Punto 19	20.58	9.79		
	Punto 20	15.62	8.77		
	Punto 21	16.83	8.37		
	Punto 22	17.56	8.25		
	Punto 23	17.95	7.56		
	Punto 24	18.52	7.12		
RAL	Punto 25	20.58	7.40		
AV	Punto 26	16.88			
$\sim$	Punto 27	14.73			
	Punto 28	17.68			
	Punto 29	19.80			
	Punto 30	20.32	Para cá	ámara:	
	Punto 31	19.80		Derecha	
	Punto 32	18.94		Izquierda	

# Prueba No 4. ENTRADA SALIDA Punto 1 20.62 20.94 16.39 Punto 2 20.62 20.84 15.77 Punto 3 20.61 17.97 16.11 Punto 4 20.60 15.87 15.17 Punto 5 20.59 10.33 14.24

	Punto 1	20.62	20.94	16.39
	Punto 2	20.62	20.84	15.77
	Punto 3	20.61	17.97	16.11
	Punto 4	20.60	15.87	15.17
	Punto 5	20.59	10.33	14.24
	Punto 6	20.55	7.42	
	Punto 7	20.39	7.43	
	Punto 8	19.00	7.47	
1 R. Mar	Punto 9	19.34	7.81	
En.	Punto 10	20.55	11.12	
0	Punto 11	20.56	9.97	
	Punto 12	20.55	7.51	
	Punto 13	20.56	9.23	
	Punto 14	20.56	9.84	
	Punto 15	20.56	10.09	
	Punto 16	20.57	16.11	
	Punto 17	20.41	19.24	
	Punto 18	20.28	20.72	
	Punto 19	20.56	10.36	
	Punto 20	19.03	10.01	
	Punto 21	19.35	9.40	
	Punto 22	19.34	9.21	
	Punto 23	18.87	8.46	
	Punto 24	19.38	7.99	
PAL	Punto 25	20.46	7.94	
A.V.	Punto 26	19.15		
$\sim$	Punto 27	17.49		
	Punto 28	19.55		
	Punto 29	20.51		
	Punto 30	20.53	Para cár	nara:
	Punto 31	20.16		Derecha
	Punto 32	19.85		Izquierda



Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA "Comportamiento hidráulico en cámaras de inspección de 90 grados con flujo supercrítico: modelación física."



#### Tabla 34. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do -Prueba No 5.

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA	
	Punto 1	13.77	14.68	17.24	
	Punto 2	13.61	11.06	14.01	
	Punto 3	13.57	20.87	12.66	
	Punto 4	13.32	20.78	13.93	
	Punto 5	12.83	20.83	14.73	
	Punto 6	12.76	20.79		
	Punto 7	12.98	20.87		
~	Punto 8	13.20	20.86		
12m	Punto 9	14.07	20.82		
ET.	Punto 10	13.34	20.81		
Ŭ	Punto 11	12.97	20.69		
	Punto 12	12.19	12.90		
	Punto 13	11.76	13.00		
	Punto 14	11.92	13.05		
	Punto 15	13.03	13.13		
	Punto 16	13.51	13.20		
	Punto 17	14.42	13.80		
	Punto 18	14.97	13.29		
	Punto 19	20.58	5.59		
	Punto 20	9.68	5.63		
	Punto 21	11.16	5.33		
	Punto 22	12.29	4.56		
	Punto 23	13.02	4.36		
<b>.</b>	Punto 24	13.98	4.00		
RAN	Punto 25	20.52	3.82		
, A <sup>TV</sup>	Punto 26	2.99			
$\sim$	Punto 27	7.77			
	Punto 28	11.87			
	Punto 29	12.73			
-	Punto 30	13.53	Para cár	mara:	
	Punto 31	14.20		Derecha	
	Punto 32	14.89		Izquierda	

#### Tabla 35. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do -Prueba No 6.

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	15.05	20.94	20.34
	Punto 2	17.32	20.96	17.91
	Punto 3	20.32	20.66	17.34
	Punto 4	20.61	18.35	17.85
	Punto 5	20.60	11.01	16.74
	Punto 6	20.56	10.25	
	Punto 7	20.56	9.97	
	Punto 8	20.54	10.14	
1 PAU	Punto 9	20.56	10.08	
EN.	Punto 10	16.67	10.23	
0	Punto 11	17.60	12.04	
	Punto 12	20.30	11.04	
	Punto 13	20.56	16.08	
	Punto 14	20.50	16.25	
	Punto 15	20.57	16.11	
	Punto 16	20.56	16.40	
	Punto 17	20.50	16.30	
	Punto 18	20.57	16.04	
	Punto 19	20.57	10.47	
	Punto 20	18.88	9.50	
	Punto 21	19.56	9.06	
	Punto 22	20.40	9.16	
	Punto 23	20.46	8.45	
	Punto 24	20.57	7.95	
RAL	Punto 25	20.57	7.63	
ALL	Punto 26	16.10		
$\sim$	Punto 27	19.20		
	Punto 28	20.54		
	Punto 29	20.46		
	Punto 30	20.50	Para c	ámara:
	Punto 31	20.58		Derecha
	Punto 32	20.48		Izguierda



Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA "Comportamiento hidráulico en cámaras de inspección de 90 grados con flujo supercrítico: modelación física."



#### Tabla 36. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do -Prueba No 7.

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	14.84	16.68	21.59
	Punto 2	14.54	18.36	18.91
	Punto 3	16.06	19.75	18.46
	Punto 4	20.12	15.49	18.56
	Punto 5	20.60	12.78	17.63
	Punto 6	20.50	11.21	
	Punto 7	20.45	11.91	
	Punto 8	20.41	15.86	
12 PM	Punto 9	19.98	13.11	
EN.	Punto 10	15.34	14.41	
0	Punto 11	15.26	12.91	
	Punto 12	15.10	11.71	
	Punto 13	19.71	16.22	
	Punto 14	20.34	15.31	
	Punto 15	20.37	16.06	
	Punto 16	20.34	13.58	
	Punto 17	19.66	13.43	
	Punto 18	19.02	14.27	
	Punto 19	20.56	10.47	
	Punto 20	19.04	9.50	
	Punto 21	19.63	9.06	
	Punto 22	20.35	9.16	
	Punto 23	20.42	8.45	
	Punto 24	20.52	7.95	
RAV	Punto 25	20.32	7.63	
AT	Punto 26	16.22		
$\sim$	Punto 27	19.47		
	Punto 28	20.41		
	Punto 29	20.43		
	Punto 30	20.44	Para cár	mara:
	Punto 31	20.42		Derecha
	Punto 32	20.44		Izquierda

abla 37. Datos de Nivel de agua en unión de flujos para caída lateral 0.75Do -
Prueba No 8.

		CÁMARA	ENTRADA	SALIDA
	Punto 1	11.23	9.61	13.33
l	Punto 2	11.05	9.35	11.72
l	Punto 3	10.79	8.97	12.61
l	Punto 4	10.38	8.55	13.04
l	Punto 5	10.85	9.95	11.91
l	Punto 6	12.99	7.22	
l	Punto 7	14.70	7.02	
	Punto 8	14.66	7.05	
x P AV	Punto 9	13.69	7.20	
EN	Punto 10	10.16	7.25	
0	Punto 11	9.42	7.36	
	Punto 12	8.98	7.48	
	Punto 13	9.19	8.61	
	Punto 14	10.23	8.74	
	Punto 15	12.61	8.88	
	Punto 16	17.07	9.03	
	Punto 17	18.88	9.18	
	Punto 18	19.53	9.33	
	Punto 19	20.59	7.14	
	Punto 20	8.99	7.09	
	Punto 21	10.45	6.58	
	Punto 22	11.99	6.44	
	Punto 23	14.64	6.30	
	Punto 24	13.51	6.17	
RA	Punto 25	20.45	4.79	
ATH.	Punto 26	3.49		
$\sim$	Punto 27	7.17		
	Punto 28	13.28		
	Punto 29	15.06		
	Punto 30	15.90	Para cár	nara:
	Punto 31	18.97		Derecha
	Punto 32	19.45		Izquierda





Tabla 38. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas ODo - Prueba No 1.

	PRUEBA No.1 (FLUJO DIRECTO D0, Q=7.47L/s)													
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo	
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	7.47	46.61	1.90	5922.11	32.66	1.26	2.23	20.9%	Supercrítico	
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	7.47	43.96	1.68	6000.48	30,44	1.24	2.28	16.6%	Supercrítico	



Figura 12.Perfil del Flujo directo para caída 0Do - Prueba No 1.





Tabla 39. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas 0Do - Prueba No 2.

	PRUEBA No.2 (FLUJO DIRECTO D0, Q=19.58 L/s)													
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	? [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de llenado	Tipo de Flujo	
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	19.58	76.96	2.51	11950.76	56.36	1.64	2.20	34.51%	Supercrítico	
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	19.58	79.74	2.32	13975.30	57.49	1.40	1.87	30.09%	Supercrítico	



Figura 13.Perfil del Flujo directo para caída 0Do - Prueba No 2.





Tabla 40. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas 0Do - Prueba No 3.

	PRUEBA No.3 (FLUJO DIRECTO D0, Q=30.55 L/s)													
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de llenado	Tipo de Flujo	
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	30.55	100.05	2.94	16979.32	76.55	1.80	2.08	44.86%	Supercrítico	
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	30.55	106.48	2.75	20726.57	79.77	1.47	1.67	40.18%	Supercrítico	



Figura 14.Perfil del Flujo directo para caída 0Do - Prueba No 3.





. / \

Tabla 41.Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas 0Do - Prueba No 4.

	PRUEBA NO.4 (FLUJU DIRECTO DU, $Q = 40.65 L/S$ )													
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo	
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	40.65	120.05	3.30	21432.71	96.39	1.90	1.95	53.83%	Supercrítico	
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	40.65	125.91	3.04	25832.13	97.60	1.57	1.61	47.51%	Supercrítico	



Figura 15.Perfil del Flujo directo para caída 0Do - Prueba No 4.





Tabla 42. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas 0Do - Prueba No 5

	PRUEBA No.5 (FLUJO DIRECTO D0, Q=50.53 L/s)														
Tubería	Diámetro [mm]     Longitud [m]     Pendiente [-]     Caída [mm]     Caudal [L/s]     Y Normal [mm]     O     Área Mojada [Rad]     Prof. [mm]     Velocidad [mm]     No. de     Relación de     Tipo de Flujo														
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	50.53	134.61	3.56	24644.78	112.97	2.05	1.95	60.36%	Supercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	50.53	132.50	3.14	27578.18	104.07	1.83	1.81	50.00%	Supercrítico		

#### Flujo directo, caída 0Do, Q = 50.53 L/s 90.00 80.00 70.00 60.00 30.00 20.00 10.00 0.00 0 50 100 150 200 250 300 x (cm) ----- Perfil derecha ----- Perfil izquierda

Figura 16.Perfil del Flujo directo para caída 0Do - Prueba No 5.





Tabla 43. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas 0Do - Prueba No 6.

	PRUEBA No.6 (FLUJO DIRECTO D0, Q=57.45 L/s)														
Tubería	Diámetro [mm]     Longitud [m]     Pendiente [-]     Caída [mm]     Caudal [L/s]     Y Normal [mm]     Omega     Área Mojada [Rad]     Prof. [mm]     Velocidad     No. de [m/s]     Relación de Ilenado     Tipo de Flujo														
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	57.45	144.27	3.74	26728.82	125.40	2.15	1.94	64.69%	Supercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	57.45	140.71	3.27	29750.79	112.48	1.93	1.84	53.10%	Supercrítico		



#### Figura 17.Perfil del Flujo directo para caída 0Do - Prueba No 6.





Tabla 44. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo directo para caídas 0Do - Prueba No 7.

	PRUEBA No.7 (FLUJO DIRECTO D0, Q= 70.8 L/s)														
Tubería	Tubería     Diámetro [mm]     Longitud [m]     Pendiente [-]     Caída [mm]     Caudal [L/s]     Y Normal [mm]     O     Área Mojada [Rad]     Prof. [mm]     Velocidad [m/s]     No. de Froude     Relación de Ilenado     Tipo de Flujo														
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	70.80	155.85	3.96	29151.75	142.48	2.43	2.05	69.89%	Supercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	70.80	145.92	3.34	31127.88	118.07	2.27	2.11	55.06%	Supercrítico		



Figura 18.Perfil del Flujo directo para caída 0Do - Prueba No 7.





Tabla 45. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caídas 0Do - Prueba No 1.

	PRUEBA No.1 (FLUJO LATERAL D0, Q= 7.8 L/s)														
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Ca ída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de llenado	Tipo de Flujo		
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	7.80	37.14	1.68	4274.41	25.72	1.82	3.63	16.65%	Hipercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	7.80	49.83	1.79	7188.78	34.71	1.09	1.86	18.80%	Supercrítico		



Figura 19.Perfil del Flujo lateral para caída 0Do - Prueba No 1.





Tabla 46. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caídas 0Do - Prueba No 2.

	PRUEBA No.2 (FLUJO LATERAL DO, Q= 19.77 L/s)													
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo	
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	19.77	65.47	2.29	9562.38	47.08	2.07	3.04	29.36%	Hipercrítico	
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	19.77	85.52	2.42	15393.09	62.12	1.28	1.65	32.27%	Supercrítico	



Figura 20.Perfil del Flujo lateral para caída ODo - Prueba No 2.





Tabla 47. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caídas ODo - Prueba No 3.

	PRUEBA No.3 (FLUJO LATERAL D0, Q= 24.20 L/s)														
Tubería	ubería Diámetro [mm] Longitud [m] Pendiente [-] Caída [mm] Caudal [L/s] Y Normal [mm] Porde [mm] Prof. [mm] Area Mojada [mm] Prof. [														
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	24.20	73.95	2.45	11316.02	53.89	2.14	2.94	33.16%	Supercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	24.20	100.71	2.66	19234.05	74.77	1.26	1.47	38.00%	Transicional		



Figura 21.Perfil del Flujo lateral para caída ODo - Prueba No 3.





Tabla 48. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caídas 0Do - Prueba No 4.

	PRUEBA No.4 (FLUJO LATERAL D0, Q= 30 L/s)														
Tubería	Tubería Diámetro [mm] Longitud [m] Pendiente [-] Caída [mm] Caudal [L/s] Y Normal [mm] OB [Rad] OB [Rad] Prof. Hidráulica D [mm] Velocidad [m														
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	30.00	82.10	2.61	13050.08	60.67	2.30	2.98	36.82%	Supercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	30.00	118.68	2.93	23920.33	90.76	1.25	1.33	44.78%	Transicional		



Figura 22.Perfil del Flujo lateral para caída ODo - Prueba No 4.





Tabla 49. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 1.

PRUEBA No.1 (UNIÓN DE FLUJOS EN D0, QD= 19.53 L/s, QL= 10 L	/s)
---	-----

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	19.53	76.52	2.50	11856.99	56.00	1.65	2.22	34.31%	Supercrítico
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	10.00	41.69	1.79	5048.53	29.03	1.98	3.71	18.70%	Hipercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	29.53	108.65	2.78	21290.34	81.68	1.39	1.55	41.00%	Supercrítico



Figura 23.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 1.



Figura 24.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 1.





Tabla 50. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 2.

PRUE	BA No	.2 (UN	IÓN DE	E FLUJO	DS EN E	00, QD=	29.2 L/	/s, QL= 1	0 L/s)		
							Prof			Relación	ſ

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	de llenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	29.20	95.27	2.85	15923.05	72.17	1.83	2.18	42.72%	Supercrítico
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	10.00	40.42	1.76	4827.92	28.10	2.07	3.94	18.12%	Hipercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	39.20	123.55	3.01	25206.33	95.34	1.56	1.61	46.62%	Supercrítico



Figura 25.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 2.



Figura 26.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 2.





Tabla 51. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 3.

# PRUEBA No.3 (UNIÓN DE FLUJOS EN DO, QD= 29.2 L/s, QL= 15.55 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	de llenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	29.20	100.68	2.95	17120.45	77.14	1.71	1.96	45.15%	Supercrítico
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	15.55	67.76	2.34	10031.12	48.90	1.55	2.24	30.39%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	44.75	146.72	3.36	31339.09	118.95	1.43	1.32	55.37%	Transicional



Figura 27.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 3.



Figura 28.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 3.





Tabla 52. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 4.

	PRUEBA No.4 (UNIÓN DE FLUJOS EN D0, QD= 39.9 L/s, QL= 15.55 L/s)														
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de llenado	Tipo de Flujo		
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	39.90	121.16	3.31	21678.98	97.58	1.84	1.88	54.33%	Supercrítico		
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	15.55	66.33	2.31	9738.52	47.77	1.60	2.33	29.74%	Supercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	55.45	160.28	3.56	34884.90	134.63	1.59	1.38	60.48%	Transicional		



Figura 29.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 4.



Figura 30.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 4.





Tabla 53. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 5.

### PRUEBA No.5 (UNIÓN DE FLUJOS EN D0, QD= 39.9 L/s, QL= 18.50 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de llenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	39.90	133.97	3.55	24505.61	112.19	1.63	1.55	60.08%	Supercrítico
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	18.50	65.93	2.30	9657.03	47.45	1.92	2.81	29.57%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	58.40	164.82	3.63	36055.20	140.29	1.62	1.38	62.19%	Transicional



Figura 31.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 5.

Figura 32.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 5.





Tabla 54. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 6.

## PRUEBA No.6 (UNIÓN DE FLUJOS EN DO, QD= 20.8 L/s, QL= 15.40 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	20.80	199.44	4.96	36854.32	268.84	0.56	0.35	89.44%	Subcrítico Débil
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	15.40	60.71	2.20	8606.79	43.36	1.79	2.74	27.22%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	36.20	123.09	3.00	25086.18	94.90	1.44	1.50	46.45%	Transicional



Figura 33.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 6.



Figura 34.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 6.





Tabla 55. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 7.

	PRUEBA No.7 (UNIÓN DE FLUJOS EN D0, QD= 10.75 L/s, QL= 10.24 L/s)														
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo		
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	10.75	154.50	3.93	28874.58	140.34	0.37	0.32	69.28%	Subcrítico Débil		
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	10.24	43.06	1.82	5288.22	30.04	1.94	3.57	19.31%	Hipercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	20.99	91.22	2.51	16816.56	66.78	1.25	1.54	34.42%	Supercrítico		



Figura 35.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 7.



Figura 36.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 7.





Tabla 56. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caídas 0Do - Prueba No 8.

### PRUEBA No.8 (UNIÓN DE FLUJOS EN D0, QD= 19.40 L/s, QL= 6.52 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	19.40	77.63	2.52	12093.92	56.92	1.60	2.15	34.81%	Supercrítico
LATERAL	223	1.28	0.1720	0	6.52	32.13	1.56	3465.35	22.13	1.88	4.04	14.41%	Hipercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	25.92	96.63	2.59	18189.36	71.30	1.43	1.70	36.46%	Supercrítico



Figura 37.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída 0Do - Prueba No 8.









Tabla 57. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75Do - Prueba No 1.

	PRUEBA No.1 (FLUJO LATERAL 75%D, Q= 5.3 L/s)														
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de llenado	Tipo de Flujo		
LATERAL	223	1.28	0.0398	167.25	5.30	38.88	1.72	4566.89	26.99	1.16	2.26	17.44%	Supercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	5.30	41.25	1.62	5473.91	28.49	0.97	1.83	15.57%	Supercrítico		



Figura 39.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 1.





Tabla 58. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75Do - Prueba No 2.

	PRUEBA No.2 (FLUJO LATERAL 75%D, Q= 12.85 L/s)														
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo		
LATERAL	223	1.28	0.0398	167.25	12.85	68.24	2.34	10129.27	49.28	1.27	1.82	30.60%	Supercrítico		
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	12.85	65.59	2.08	10631.22	46.48	1.21	1.79	24.75%	Supercrítico		



Figura 40.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 2.




Tabla 59. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75Do - Prueba No 3.

			PRUEE	BA No.3	3 (FLUJ	O LATE	ERAL 7	5%D, C	Q= 20.9	5 L/s)			
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de llenado	Tipo de Flujo
LATERAL	223	1.28	0.0398	167.25	20.95	90.27	2.76	14822.84	67.71	1.41	1.73	40.48%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	20.95	87.20	2.44	15810.94	63.49	1.33	1.68	32.91%	Supercrítico



Figura 41.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 3.





Tabla 60. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75Do - Prueba No 4.

			PRUE	BA No	.4 (FLU	IJO LAI	<b>FERAL</b>	75%D, C	Q= 26.7	5 L/s)			
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de llenado	Tipo de Flujo
LATERAL	223	1.28	0.0398	167.25	26.75	104.51	3.02	17970.27	80.74	1.49	1.67	46.86%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	26.75	112.05	2.83	22179.64	84.71	1.21	1.32	42.28%	Transicional



Figura 42.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 4.





Tabla 61. Propiedades geométricas e hidráulicas-Flujo Lateral para caída lateral 0.75Do - Prueba No 5.

			PRU	EBA No	o.5 (FLl	JJO LA	TERAL	75%D, (	Q= 31.7	70 L/s)			
Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de llenado	Tipo de Flujo
LATERAL	223	1.28	0.0398	167.25	31.70	117.45	3.25	20854.18	93.65	1.52	1.59	52.67%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	31.70	134.20	3.17	28028.80	105.78	1.13	1.11	50.64%	Transicional



Figura 43.Perfil del Flujo lateral para caída 0.75Do - Prueba No 5.





Tabla 62. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 1.

# PRUEBA No.1 (UNIÓN DE FLUJOS EN CAÍDA LATERAL 75%D0, QD= 10.75 L/s, QL= 5.08 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	10.75	54.59	2.07	7411.80	38.65	1.45	2.36	24.48%	Supercrítico
LATERAL	223	1.28	0.1720	167.25	5.08	38.18	1.71	4447.57	26.47	1.14	2.24	17.12%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	15.83	80.15	2.33	14075.36	57.82	1.12	1.49	30.25%	Transicional



Figura 44.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 1.









Tabla 63. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 2.

# PRUEBA No.2 (UNIÓN DE FLUJOS EN CAÍDA LATERAL 75%D0, QD= 10.75 L/s, QL= 13.20 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	10.75	160.69	4.06	30130.54	150.56	0.36	0.29	72.06%	Subcrítico Débil
LATERAL	223	1.28	0.1720	167.25	13.20	74.01	2.46	11328.09	53.94	1.17	1.60	33.19%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	23.95	100.11	2.65	19079.78	74.25	1.26	1.47	37.78%	Transicional













Tabla 64. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 3.

# PRUEBA No.3 (UNIÓN DE FLUJOS EN CAÍDA LATERAL 75%D0, QD= 26.55 L/s, QL= 13.20 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	26.55	133.45	3.54	24390.74	111.56	1.09	1.04	59.84%	Transicional
LATERAL	223	1.28	0.1720	167.25	13.20	74.01	2.46	11328.09	53.94	1.17	1.60	33.19%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	39.75	132.13	3.14	27479.45	103.70	1.45	1.43	49.86%	Transicional













Tabla 65. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 4.

### PRUEBA No.4 (UNIÓN DE FLUJOS EN CAÍDA LATERAL 75%D0, QD= 26.55 L/s, QL= 16.90 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	26.55	199.79	4.97	36901.84	270.96	0.72	0.44	89.59%	Subcrítico Débil
LATERAL	223	1.28	0.1720	167.25	16.90	79.41	2.56	12472.03	58.40	1.36	1.79	35.61%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	43.45	142.42	3.29	30204.45	114.30	1.44	1.36	53.74%	Transicional













Tabla 66. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 5.

## PRUEBA No.5 (UNIÓN DE FLUJOS EN CAÍDA LATERAL 75%D0, QD= 45.00 L/s, QL= 6.30 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	45.00	135.45	3.57	24828.02	114.00	1.81	1.71	60.74%	Supercrítico
LATERAL	223	1.28	0.1720	167.25	6.30	38.18	1.71	4447.57	26.47	1.42	2.78	17.12%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	51.30	147.33	3.37	31499.22	119.62	1.63	1.50	55.60%	Supercrítico







Figura 53.Perfil del Flujo lateral en unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 5.





#### Tabla 67. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 6.

#### PRUEBA No.6 (UNIÓN DE FLUJOS EN CAÍDA LATERAL 75%D0, QD= 45.00 L/s, QL= 16.00 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	45.00	161.69	4.08	30330.98	152.32	1.48	1.21	72.51%	Transicional
LATERAL	223	1.28	0.1720	167.25	16.00	76.30	2.50	11811.34	55.82	1.35	1.83	34.22%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	61.00	167.35	3.67	36705.91	143.57	1.66	1.40	63.15%	Transicional













Tabla 68. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 7.

# PRUEBA No.7 (UNIÓN DE FLUJOS EN CAÍDA LATERAL 75%D0, QD= 55.00 L/s, QL= 16.00 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	55.00	138.45	3.63	25479.34	117.75	2.16	2.01	62.09%	Supercrítico
LATERAL	223	1.28	0.1720	167.25	16.00	76.30	2.50	11811.34	55.82	1.35	1.83	34.22%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	71.00	176.26	3.81	38959.67	155.76	1.82	1.47	66.51%	Transicional













Tabla 69. Propiedades geométricas e hidráulicas-Unión de flujos para caída lateral 0.75Do - Prueba No 8.

## PRUEBA No.8 (UNIÓN DE FLUJOS EN CAÍDA LATERAL 75%D0, QD= 28.80 L/s, QL= 8.10 L/s)

Tubería	Diámetro [mm]	Longitud [m]	Pendiente [-]	Caída [mm]	Caudal [L/s]	Y Normal [mm]	Θ [Rad]	Área Mojada [mm]	Prof. Hidráulica D [mm]	Velocidad [m/s]	No. de Froude	Relación de Ilenado	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	223	0.94	0.0245	0	28.80	92.57	2.80	15327.04	69.74	1.88	2.27	41.51%	Supercrítico
LATERAL	223	1.28	0.1720	167.25	8.10	47.91	1.93	6158.98	33.62	1.32	2.29	21.48%	Supercrítico
SALIDA	265	0.82	0.0212	0	36.90	119.12	2.94	24038.00	91.18	1.54	1.62	44.95%	Supercrítico



Figura 58.Perfil del Flujo directo en unión de flujos para caída lateral ODo - Prueba No 8.



