



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE INCUMPLIMIENTOS A LA NORMA EN UN
AFORADOR PARSHALL**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

P R E S E N T A:

ARTURO LÓPEZ ZÚÑIGA

TUTOR:

M. I. EDMUNDO PEDROZA GONZÁLEZ

2012





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. I. Carlos Gutiérrez Ojeda

Secretario: Dr. Carlos Escalante Sandoval

Vocal: M. I. Edmundo Pedroza González

1^{er.} Suplente: Dr. Víctor Arroyo Correa

2^{do.} Suplente: M. I. José A. González Verdugo

Jiutepec, Morelos.

Universidad Nacional Autónoma de México-Campus Morelos.

TUTOR DE TESIS:

M. I. EDMUNDO PEDROZA GONZÁLEZ

FIRMA

DEDICATORIAS

A mis padres:

José López Díaz y Leonor Zúñiga López, por su cariño, comprensión y por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi vida personal y académica. Pero sobre todo por creer en mí y motivarme a seguir adelante.

A mis hermanos:

Con todo mi afecto para cada uno de ustedes, pero especialmente a Agustín López Zúñiga quien desde algún lugar del cielo nos cuida y nos llena de bendiciones. Gracias a todos por estar siempre conmigo y ser parte esencial en mi vida.

A mi novia:

Areli Gómez Rojas, por tu cariño, apoyo y por siempre creer en mí. Sin duda conocerte fue uno de los días más maravillosos de mi vida, llenaste mi alma de luz y esperanza.

A mis amigos:

Por su amistad, confianza y por permitirme ser parte de su vida.

A Dios:

Por darme salud, colmar mi vida de bendiciones e iluminar mi corazón y pensamientos para tomar buenas decisiones en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme ser orgullosamente alumno de la máxima casa de estudios y por darme el honor de estudiar el Posgrado en Ingeniería Hidráulica.

AI CONACYT:

Por el apoyo económico brindado a lo largo de la maestría y por ser un gran estímulo para el desarrollo científico y tecnológico del país.

AI IMTA:

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por facilitar las instalaciones para la realización del trabajo experimental en el laboratorio de hidráulica: "Enzo Levi".

A mi asesor de tesis:

Al M. I. Edmundo Pedroza González, por su apoyo, paciencia y respaldo para la realización de este trabajo.

A mis sinodales:

Por el tiempo dedicado a la revisión de mi tesis y por sus buenos comentarios y sugerencias para la mejora de la misma.

Al Doctor:

Víctor Hugo Alcocer Yamanaka, por todo su apoyo en el ámbito académico y profesional, sobre todo por creer y depositar su confianza en mí. Gracias por ser un formador de las nuevas generaciones de la Hidráulica.

1. ANTECEDENTES	1
1.1 AFORADOR PARSHALL	1
2. INSPECCIONES DE VERIFICACIÓN EN AFORADORES PARSHALL	5
2.1 REQUISITOS DE LA NORMA INTERNACIONAL ISO 9826 “MEASUREMENT OF LIQUID FLOW IN OPEN CHANNELS –PARSHALL AND SANIIRI FLUMES”	5
2.1.1 <i>Sitio de ubicación del aforador y las condiciones del canal de llegada</i>	5
2.1.2 <i>Conformación y material de construcción del aforador</i>	6
2.1.3 <i>Dimensiones del aforador</i>	6
2.1.4 <i>Estimación de la incertidumbre en la medición</i>	7
2.2 RECOMENDACIONES DE LA NORMA DE LA ASTM “STANDARD TEST METHOD FOR OPEN CHANNEL FLOW MEASUREMENT OF WATER WITH THE PARSHALL FLUME”	8
2.3 COMENTARIOS A LAS NORMAS ISO Y ASTM	9
2.4 PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN DE AFORADORES PARSHALL	10
2.5 EJEMPLOS DE EMPRESAS INSPECCIONADAS	14
2.5.1 <i>Planta de tratamiento del Grupo Modelo</i>	14
2.5.2 <i>Planta Colgate</i>	16
2.5.3 <i>Industrias Proquina</i>	18
2.5.4 <i>Comentarios a la inspección de industrias</i>	19
2.6 EXPERIMENTOS EN UN AFORADOR PARSHALL REALIZADOS EN LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO	20
2.6.1 <i>Instalaciones experimentales para las pruebas</i>	20
2.6.2 <i>Aforador Parshall utilizado en las pruebas</i>	23
2.6.3 <i>Prueba número 1. Calibración para valores altos del número de Froude</i>	24
2.6.4 <i>Prueba número 2. Calibración para diferentes rugosidades en el interior del aforador</i> ..	27
2.6.5 <i>Prueba número 3. Calibración con obstáculos aguas arriba del aforador</i>	30
2.6.6 <i>Conclusiones de los experimentos realizados en la Universidad Michoacana</i>	34
3. OBJETIVO Y ACLARACIONES	36
3.1 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN ACTUAL	37
4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	38
4.1 CUARTO DE MÁQUINAS	38
4.2 TANQUE ELEVADO	38
4.3 LÍNEAS DE CONDUCCIÓN	39
4.4 CANAL DE PENDIENTE CONSTANTE	40
4.5 CANAL DE PENDIENTE VARIABLE	41
4.6 MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO	41
5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE PRUEBA	43
5.1 INTRODUCCIÓN	43
5.2 DISEÑO DEL AFORADOR PARSHALL	43
5.3 CONSTRUCCIÓN DEL AFORADOR PARSHALL	45
6. DISEÑO EXPERIMENTAL	52
6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS	52
6.1.1 <i>Condiciones normales de acuerdo a la normatividad</i>	52
6.1.2 <i>Diferentes rugosidades</i>	52
6.1.3 <i>Colocando una pantalla u obstáculo aguas arriba del aforador</i>	52
6.1.4 <i>Colocando un desviador aguas arriba del Parshall</i>	53
6.1.5 <i>Diferentes pendientes en el Parshall</i>	53
6.2 PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE CADA PRUEBA	53

6.3 RECOPIACIÓN DE DATOS EN EL LABORATORIO	56
6.4 HOJAS DE CÁLCULO UTILIZADAS PARA PROCESAR LOS DATOS.....	59
7. ADECUACIÓN DEL MODELO PARA CADA UNA DE LAS PRUEBAS.....	62
7.1 PRUEBA EN CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN.....	62
7.2 PRUEBAS CON DIFERENTES RUGOSIDADES.....	62
7.3 PRUEBAS CON UNA PANTALLA AGUAS ARRIBA DEL DISPOSITIVO	65
7.4 PRUEBAS CON UN DESVIADOR DE FLUJO AGUAS ARRIBA DEL AFORADOR	66
7.5 PRUEBAS CON DIFERENTES PENDIENTES EN EL PARSHALL.....	67
8. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	69
8.1 MEDICIÓN DE TIRANTES	69
8.2 PRUEBA EN EL FLOW TRACKER	71
8.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBA EN CONDICIONES NORMALES DE ACUERDO A LA NORMATIVIDAD	76
8.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA DIFERENTES RUGOSIDADES	78
8.4.1 Arena de 2 mm de diámetro.....	78
8.4.2 Silicón de 4 mm de diámetro.....	82
8.4.3 Silicón de 6 mm de diámetro.....	86
8.5 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON UNA PANTALLA AGUAS ARRIBA DEL PARSHALL.....	91
8.5.1 Pantalla a 0.75 m.....	91
8.5.2 Pantalla a 1.53 m.....	95
8.5.3 Pantalla a 2.28 m.....	98
8.5.4 Pantalla a 3.00 m.....	102
8.6 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON UN DESVIADOR AGUAS ARRIBA DEL PARSHALL.....	107
8.6.1 Desviador a 0.75 m.....	107
8.6.2 Desviador a 1.53 m.....	111
8.6.3 Desviador a 2.28 m.....	115
8.6.4 Desviador a 3.00 m.....	119
8.7 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON PENDIENTES DIFERENTES	124
8.7.1 Pendiente $S = - 0.0060$	124
8.7.2 Pendiente $S = 0$	127
8.7.3 Pendiente $S = 0.0003$	130
8.7.4 Pendiente $S = 0.0102$	133
8.7.5 Pendiente $S = 0.0192$	136
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	141
REFERENCIAS	142
ANEXOS	143

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nomenclatura de las partes del aforador Parshall.....	3
Tabla 2. Medidas estándar de los aforadores Parshall.....	4
Tabla 3. Errores de medición y construcción, Grupo Modelo	14
Tabla 4. Inspecciones al aforador y al canal de llegada, Grupo Modelo	16
Tabla 5. Medidas del aforador de la Planta Colgate	17
Tabla 6. Construcción y material del aforador	17
Tabla 7. Medidas del ancho de garganta.....	18
Tabla 8. Inspecciones al aforador y al canal de llegada, Industrias Proquina.....	19
Tabla 9. Dimensiones de diseño del aforador Parshall	43
Tabla 10. Recopilación de datos en el laboratorio	56
Tabla 11. Resumen de resultados	60
Tabla 12. Resultados de la prueba para el primer gasto medido en el Flow Tracker	73
Tabla 13. Gastos observados en el medidor electromagnético.....	74
Tabla 14. Resumen de resultados de la prueba con el Flow Tracker.....	74
Tabla 15. Resultados de la prueba en condiciones normales de operación	76
Tabla 16. Resultados de la prueba para una rugosidad de 2 mm.....	79
Tabla 17. Resultados de la prueba para una rugosidad de 4 mm.....	83
Tabla 18. Resultados de la prueba para una rugosidad de 6 mm.....	87
Tabla 19. Resultados de la prueba colocando la pantalla a 0.75 m	92
Tabla 20. Resultados de la prueba colocando la pantalla a 1.53 m	95
Tabla 21. Resultados de la prueba colocando la pantalla a 2.28 m	99
Tabla 22. Resultados de la prueba colocando la pantalla a 3.00 m	103
Tabla 23. Resultados de la prueba colocando un desviador a 0.75 m.....	108
Tabla 24. Resultados de la prueba colocando un desviador a 1.53 m.....	112
Tabla 25. Resultados de la prueba colocando un desviador a 2.28 m.....	116
Tabla 26. Resultados de la prueba colocando un desviador a 3.00 m.....	120
Tabla 27. Resultados de la prueba con una pendiente $S=-0.0060$	125
Tabla 28. Resultados de la prueba con una pendiente $S=0$	128
Tabla 29. Resultados de la prueba con una pendiente $S=0.0003$	131
Tabla 30. Resultados de la prueba con una pendiente $S=0.0102$	134
Tabla 31. Resultados de la prueba con una pendiente $S=0.0192$	137

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes principales de un aforador Parshall.	1
Figura 2. Nomenclatura de las partes de un aforador Parshall.	2
Figura 3. Dimensiones que se revisan en un aforador Parshall.	11
Figura 4. Esquema para la revisión de la alineación entre el canal de llegada y el aforador.	11
Figura 5. Verificación del escurrimiento paralelo antes del aforador.	13
Figura 6. Errores por ecuación errónea en el aforador Parshall, Grupo Modelo.	15
Figura 7. Porcentaje de error total en el aforador de la cervecera Modelo.	15
Figura 8. Canal de pendiente variable.	20
Figura 9. Vertedor Rehbock.	21
Figura 10. Limnómetro para leer la carga sobre el vertedor Rehbock.	22
Figura 11. Parte final del canal de flujo permanente.	22
Figura 12. Vertedor triangular.	23
Figura 13. Dimensiones del aforador y sitio de medición del nivel del agua, unidades en centímetros.	24
Figura 14. Vista del aforador en la etapa de construcción.	24
Figura 15. Valores del número de Froude para diferentes pendientes y gastos.	25
Figura 16. Resultados de la calibración del aforador para diferentes pendientes.	26
Figura 17. Diferencia entre la ecuación de calibración y la ecuación de la ASTM para diferentes pendientes.	27
Figura 18. Aforador recubierto con arena de 2 mm.	28
Figura 19. Aforador recubierto con arena de 5 mm.	28
Figura 20. Resultados de la calibración del aforador para diferentes rugosidades.	29
Figura 21. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes rugosidades.	30
Figura 22. Pantalla y desviador utilizados en las pruebas.	31
Figura 23. Vista en planta de la perturbación en el flujo por efecto de la pantalla y el desviador. ...	31
Figura 24. Resultados de la calibración del aforador para diferentes ubicaciones de la pantalla. ...	32
Figura 25. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes ubicaciones de la pantalla.	32
Figura 26. Resultados de la calibración del aforador para diferentes ubicaciones del desviador. ...	33
Figura 27. Diferencia respecto a la ecuación ASTM cuando se tienen obstáculos aguas arriba del aforador.	34
Figura 28. Cuarto de máquinas.	38
Figura 29. Tanque elevado.	39
Figura 30. Línea de alimentación al sistema.	40
Figura 31. Canal de pendiente constante.	40
Figura 32. Canal de pendiente variable.	41
Figura 33. Principio básico del motor eléctrico.	42
Figura 34. Medidor electromagnético.	42
Figura 35. Diseño del aforador Parshall, vista en planta.	44
Figura 36. Diseño del aforador Parshall, vista de perfil.	44
Figura 37. Hoja de triplay empleada para la construcción del dispositivo.	47
Figura 38. Trazo de piezas del aforador.	48
Figura 39. Corte de piezas del modelo.	48
Figura 40. Ajuste de acabado con cepillo de madera.	49
Figura 41. Ensamble de piezas del modelo de pruebas.	49
Figura 42. Colocación de un limnómetro a la entrada del Parshall.	50
Figura 43. Colocación de un pozo de lectura en la pared lateral del dispositivo.	50
Figura 44. Montaje del aforador Parshall al canal de pendiente constante.	51
Figura 45. Caseta de control de bombas.	54
Figura 46. Abertura de válvulas para alimentar al sistema.	54
Figura 47. Lectura de los tirantes en el aforador.	55
Figura 48. Registro de gastos del medidor electromagnético.	55
Figura 49. Esquema para la ubicación en planta y perfil de los tirantes en el aforador Parshall.	57
Figura 50. Limnómetro ubicado a la entrada al aforador.	58

Figura 51. Limnómetro ubicado en la garganta del Parshall.	58
Figura 52. Pozo de lectura ubicado en la garganta del aforador.	59
Figura 53. Ejemplo para representar gráficamente la variación de los gastos.	61
Figura 54. Ejemplo para representar las diferencias respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes pruebas.	61
Figura 55. Rugosidad con arena de 2 mm de diámetro.	63
Figura 56. Rugosidad hecha con silicón de 4 mm de diámetro.	64
Figura 57. Rugosidad hecha con silicón de 6 mm de diámetro.	64
Figura 58. Pantalla utilizada durante las pruebas experimentales.	65
Figura 59. Desviador de flujo utilizado durante las pruebas experimentales.	66
Figura 60. Mecanismos para ajustar la pendiente del canal.	67
Figura 61. Canal de pendiente variable utilizado para las pruebas.	68
Figura 62. Diferencia entre los tirantes H1 y H2.	69
Figura 63. Aumento y disminución del tirante medido.	70
Figura 64. Flow Tracker.	72
Figura 65. Colocación del Flow Tracker dentro del canal.	72
Figura 66. División del área hidráulica en celdas.	73
Figura 67. Comparación del caudal en el medidor electromagnético con el calculado en el Flow Tracker.	75
Figura 68. Variación del caudal en el Parshall respecto al gasto de referencia en condiciones normales de operación.	77
Figura 69. Aforador trabajando de acuerdo a las normas.	78
Figura 70. Variación de los caudales para una rugosidad de arena de 2 mm de diámetro.	80
Figura 71. Rugosidad hecha con arena de 2 mm de diámetro.	81
Figura 72. Comportamiento del flujo para una rugosidad con arena de 2 mm.	82
Figura 73. Variación de los caudales para una rugosidad de silicón de 4 mm de diámetro.	84
Figura 74. Rugosidad hecha con silicón de 4 mm de diámetro.	85
Figura 75. Comportamiento del flujo para gastos altos para una rugosidad de 4 mm.	85
Figura 76. Comportamiento del flujo para gastos bajos para una rugosidad de 4 mm.	86
Figura 77. Variación de los caudales para una rugosidad de silicón de 6 mm de diámetro.	88
Figura 78. Rugosidad hecha con silicón de 6 mm de diámetro.	89
Figura 79. Comportamiento del flujo para gastos altos para una rugosidad de 6 mm.	89
Figura 80. Comportamiento del flujo para gastos bajos para una rugosidad de 6 mm.	90
Figura 81. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes rugosidades.	90
Figura 82. Variación de los caudales colocando la pantalla a 0.75 m.	93
Figura 83. Colocación de la pantalla a 0.75 m antes del aforador, vista en planta.	93
Figura 84. Colocación de la pantalla a 0.75 m antes del aforador, vista de perfil.	94
Figura 85. Formación de vórtices al interceptar el flujo en la pantalla ubicada a 0.75 m.	94
Figura 86. Variación de los caudales colocando la pantalla a 1.53 m.	96
Figura 87. Colocación de la pantalla a 1.53 m antes del modelo, vista en planta.	97
Figura 88. Colocación de la pantalla a 1.53 m antes del modelo, vista de perfil.	97
Figura 89. Formación de vórtices al interceptar el flujo en la pantalla ubicada a 1.53 m.	98
Figura 90. Variación de los caudales colocando la pantalla a 2.28 m.	100
Figura 91. Colocación de la pantalla a 2.28 m antes del dispositivo, vista en planta.	101
Figura 92. Colocación de la pantalla a 2.28 m antes del dispositivo, vista de perfil.	101
Figura 93. Formación de vórtices al interceptar el flujo en la pantalla ubicada a 2.28 m.	102
Figura 94. Variación de los caudales colocando la pantalla a 3.00 m.	104
Figura 95. Colocación de la pantalla a 3.00 m antes del Parshall, vista en planta.	105
Figura 96. Colocación de la pantalla a 3.00 m antes del Parshall, vista de perfil.	105
Figura 97. Formación de vórtices al interceptar el flujo en la pantalla ubicada a 3.00 m.	106
Figura 98. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes ubicaciones de la pantalla.	106
Figura 99. Variación de los caudales colocando un desviador a 0.75 m antes del aforador.	109
Figura 100. Colocación del desviador a 0.75 m antes del Parshall, vista en planta.	110
Figura 101. Colocación del desviador a 0.75 m antes del Parshall, vista de perfil.	110

Figura 102. Generación de vórtices al interceptar el flujo en el desviador ubicado a 0.75 m antes de la entrada al modelo.	111
Figura 103. Variación de los caudales colocando un desviador a 1.53 m antes del aforador.	113
Figura 104. Colocación del desviador a 1.53 m antes del dispositivo, vista en planta.	114
Figura 105. Colocación del desviador a 1.53 m antes del dispositivo, vista de perfil.	114
Figura 106. Generación de vórtices al interceptar el flujo en el desviador ubicado a 1.53 m antes de la entrada al modelo.	115
Figura 107. Variación de los caudales colocando un desviador a 2.28 m antes del aforador.	117
Figura 108. Colocación del desviador a 2.28 m antes del modelo, vista en planta.	118
Figura 109. Colocación del desviador a 2.28 m antes del modelo, vista de perfil.	118
Figura 110. Generación de vórtices al interceptar el flujo en el desviador ubicado a 2.28 m antes de la entrada al modelo.	119
Figura 111. Variación de los caudales colocando un desviador a 3.00 m antes del aforador.	121
Figura 112. Colocación del desviador a 3.00 m antes del aforador, vista en planta.	122
Figura 113. Colocación del desviador a 2.28 m antes del aforador, vista de perfil.	122
Figura 114. Disipación de vórtices en el desviador ubicado a 3.00 m antes de la entrada al modelo.	123
Figura 115. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes posiciones del desviador.	123
Figura 116. Mecanismos para ajustar la pendiente del canal.	124
Figura 117. Canal de pendiente variable con $S = - 0.0060$	125
Figura 118. Variación de los caudales con una pendiente $S=-0.0060$	126
Figura 119. Condiciones hidráulicas presentadas con $S = - 0.0060$	127
Figura 120. Canal de pendiente variable con $S = 0$	127
Figura 121. Variación de los caudales con una pendiente $S=0$	129
Figura 122. Generación de una pequeña turbulencia a la entrada al Parshall para $S=0$	130
Figura 123. Canal de pendiente variable con $S = 0.0003$	131
Figura 124. Variación de los caudales con una pendiente $S=0.0003$	132
Figura 125. Condiciones hidráulicas presentadas con $S = 0.0003$	133
Figura 126. Canal de pendiente variable con $S = 0.0102$	133
Figura 127. Variación de los caudales con una pendiente $S=0.0102$	135
Figura 128. Condiciones hidráulicas presentadas con $S = 0.0102$	136
Figura 129. Canal de pendiente variable con $S = 0.0192$	136
Figura 130. Variación de los caudales con una pendiente $S=0.0192$	138
Figura 131. Condiciones hidráulicas presentadas con $S = 0.0192$	139
Figura 132. Formación de un salto hidráulico estacionario aguas arriba del aforador.	139
Figura 133. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes pendientes.	140

1. ANTECEDENTES

1.1 Aforador Parshall

El aforador Parshall es una estructura hidráulica que permite medir la cantidad de agua que pasa por una sección de un canal. Es adecuado para medir el gasto en los canales de riego o en las corrientes naturales con una pendiente suave. Este dispositivo fue desarrollado por R. Parshall en 1922. El aforador se puede construir en una amplia gama de tamaños para medir las descargas que van desde un litro por segundo hasta cien metros cúbicos por segundo. La selección del tamaño del aforador depende del rango de la descarga que se va a medir.

El aforador consta de tres partes principales: sección convergente, garganta y sección divergente (ver figura 1). En cualquier parte del aforador se presenta una sección rectangular.

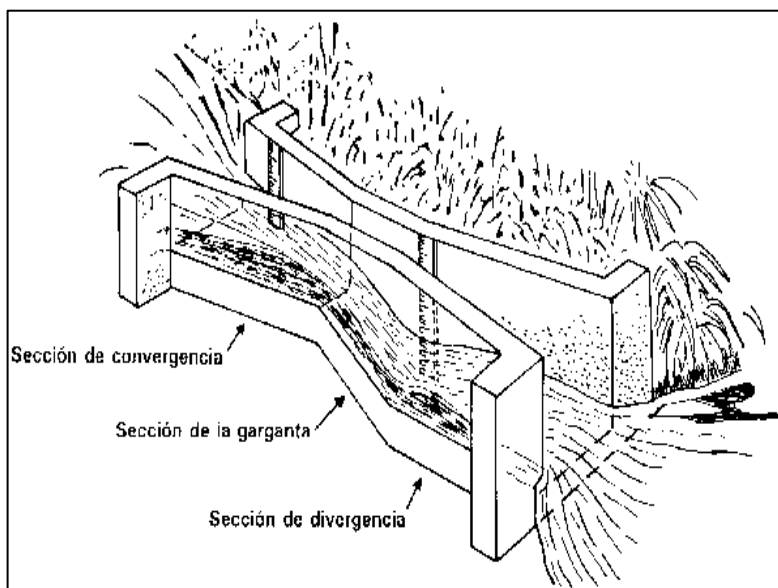


Figura 1. Partes principales de un aforador Parshall.

En la sección convergente, el fondo es horizontal y el ancho va disminuyendo. En la garganta, la pendiente es descendente y el ancho permanece constante. Por último, en la sección divergente, la pendiente es ascendente y el ancho va aumentando.

Junto a la estructura del aforador se pueden tener dos pozos laterales o tanques con la misma profundidad, o mayor, que la parte más baja del aforador. El agua que escurre por el aforador pasa a estos tanques por medio de unas perforaciones colocadas en la pared de la sección convergente y en la garganta.

Fundamentalmente, el aforador es una reducción de la sección que obliga al agua a elevarse o a "remansarse", y volver a caer hasta la elevación que se tenía sin la presencia del aforador. En este proceso se presenta una aceleración del flujo que

permite establecer una relación matemática unívoca entre la elevación del agua y el gasto.

A través de varios experimentos en los que se colocaron diferentes tamaños de aforadores, se midió el gasto y la profundidad (a la que también puede llamarse elevación, nivel, tirante o carga) y se observó que todos los aforadores tienen un comportamiento similar en relación al tirante contra el gasto, para condiciones de descarga, es decir, todos se pueden representar matemáticamente con la ecuación 1 vista en el capítulo uno.

Los aforadores que se probaron tienen medidas establecidas (Manual de diseño de estructuras de aforo, Leslie Skertchly y Molina, 1988) y cualquier aforador que se construya debe apegarse a dichas medidas, ya que los errores de construcción generan mediciones erróneas. En la figura 2 se aprecian las dimensiones del dispositivo representadas por variables y en la tabla 1 la descripción de cada una de estas.

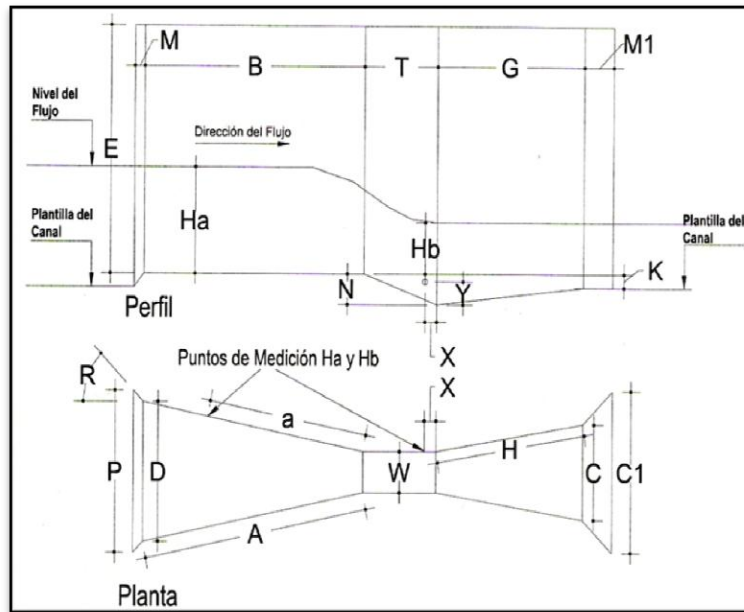


Figura 2. Nomenclatura de las partes de un aforador Parshall.

En la tabla 1 que se muestra a continuación se aprecia la descripción de las variables de la figura anterior.

Tabla 1. Nomenclatura de las partes del aforador Parshall

Variable	Descripción
W	Ancho de la garganta
A	Longitud de las paredes de la sección convergente
a	Ubicación del punto de medición Ha
B	Longitud de la sección convergente
C	Ancho de la salida
D	Ancho de la entrada de la sección convergente
E	Profundidad total
T	Longitud de la garganta
G	Longitud de la sección divergente
H	Longitud de las paredes de la sección divergente
K	Diferente de elevación entre la salida y la cresta
M	Longitud de la transición de entrada
N	Profundidad de la cubeta
P	Ancho de la entrada de la transición
R	Radio de curvatura
X	Abscisa del punto de medición Hb
Y	Ordenada del punto de medición

Con base en la tabla 2 se puede realizar el diseño de los aforadores Parshall para el tamaño deseado según la descarga que se presente y el espacio disponible para instalar el aforador. Para acceder a dicha tabla, basta con seleccionar previamente el ancho de garganta, para con ello realizar el dimensionamiento del aforador.

En general, entre el diseño y la construcción de una estructura se constatan diferencias, por otro lado el diseño se basa en fórmulas empíricas deducidas en condiciones ideales de funcionamiento, las cuales sufren modificaciones cuando la estructura trabaja en condiciones reales. Por las razones expuestas, una vez construida o instalada una estructura de medición es necesario calibrarla para disponer de una relación confiable.

Tabla 2. Medidas estándar de los aforadores Parshall

W	A	a	B	C	D	E	T	G	K	M	N	P	R	X	Y
Dimensiones en mm															
25.4	363	242	356	93	164	229	78	203	19	-	29	-	-	8	13
50.8	4114	276	406	135	214	254	114	254	22	-	43	-	-	16	25
76.2	467	311	457	178	259	457	152	305	25	-	57	-	-	25	38
152.4	621	414	610	394	397	610	305	610	76	305	114	902	406	51	76
228.6	879	587	864	381	575	762	305	457	76	305	114	1080	406	51	76
Dimensiones en m															
0.3048	1.3720	0.914	1.343	0.610	0.845	0.914	0.610	0.914	0.076	0.381	0.229	1.492	0.508	0.051	0.076
0.4572	1.4480	0.965	1.419	0.762	1.026	0.914	0.610	0.914	0.076	0.381	0.229	1.676	0.508	0.051	0.076
0.6096	1.5240	1.016	1.495	0.914	1.206	0.914	0.610	0.914	0.076	0.381	0.229	1.854	0.508	0.051	0.076
0.9144	1.6760	1.118	1.645	1.219	1.572	0.914	0.610	0.914	0.076	0.381	0.229	2.222	0.508	0.051	0.076
1.2192	1.8290	1.219	1.794	1.524	1.937	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	2.711	0.610	0.051	0.076
1.5240	1.9810	1.321	1.943	1.829	2.302	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	3.080	0.610	0.051	0.076
1.8288	2.1340	1.422	2.092	2.134	2.667	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	3.442	0.610	0.051	0.076
2.1336	2.2860	1.524	2.242	2.438	3.032	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	3.810	0.610	0.051	0.076
2.4384	2.4380	1.626	2.391	2.743	3.397	0.914	0.610	0.914	0.076	0.457	0.229	4.172	0.610	0.051	0.076
3.0480	2.7432	1.829	4.267	3.658	4.756	1.219	0.914	1.829	0.152	-	0.343	-	-	0.305	0.229
3.6580	3.0480	2.032	4.877	4.470	5.807	1.524	0.914	2.438	0.152	-	0.343	-	-	0.305	0.229
4.5720	3.5052	2.337	7.620	5.588	7.620	1.829	1.219	3.048	0.229	-	0.457	-	-	0.305	0.229
6.0960	4.2672	2.845	7.620	7.315	9.144	2.134	1.829	3.658	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229
7.6200	5.0292	3.353	7.620	8.941	10.668	2.134	1.829	3.962	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229
9.1440	5.7912	3.861	7.925	10.566	12.313	2.134	1.829	4.267	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229
12.1920	7.3152	4.877	8.230	13.818	15.481	2.134	1.829	4.877	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229
15.5400	8.8392	5.893	8.230	17.272	18.529	2.134	1.829	6.096	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229

* Manual de diseño de estructuras de aforo, Leslie Skertchky y Molina, IMTA, 1988.

2. INSPECCIONES DE VERIFICACIÓN EN AFORADORES PARSHALL

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua realiza inspecciones en industrias que vierten y miden aguas residuales por medio de aforadores Parshall. Generalmente se realizan trabajos de inspección atendiendo dos aspectos: (a) el cumplimiento de la norma y (b) el error de medición y la incertidumbre. El primer caso, es común cuando la inspección se realiza con fines de cumplimiento de sistemas internos de calidad; en el segundo caso, se trata de cumplir con la petición de las autoridades quienes dudan que las descargas de aguas residuales se viertan de acuerdo a una cierta cantidad preestablecida (normalmente las industrias vierten más de lo que reportan).

Dado que en México no se dispone de normas mexicanas aplicadas a los aforadores Parshall, se atiende a la Ley Federal sobre Normalización y Metrología en la que se menciona que ante la falta de normas nacionales se pueden utilizar normas internacionales, se considera válida la inspección de aforadores Parshall basada en las normas ISO y ASTM sobre aforadores de este tipo.

2.1 Requisitos de la norma internacional ISO 9826 “Measurement of liquid flow in open channels –Parshall and Saniiri Flumes”

En cuanto a lo que a este trabajo concierne, según la norma ISO se tienen tres aspectos que se deben cuidar en aras de lograr las mejores mediciones: (a) el sitio de ubicación del aforador y las condiciones del canal de llegada; (b) la conformación y el material de construcción del aforador y (c) las dimensiones del mismo. En la norma también se dan algunas recomendaciones para estimar la incertidumbre de la medición.

2.1.1 Sitio de ubicación del aforador y las condiciones del canal de llegada

En cuanto al canal de llegada, se recomienda que el aforador se ubique en una sección recta del canal, evitando obstrucciones locales y asperezas u ondulaciones en el fondo del canal. Al seleccionar el sitio, se debe prestar particular atención a los siguientes requisitos:

- a) La suficiencia en la longitud del canal sin irregularidades en la sección transversal de dicha longitud y con pendiente aceptable.
- b) La uniformidad de la distribución de la velocidad de la corriente.
- c) Las condiciones aguas abajo (incluyendo influencias tales como mareas, estructuras del control, etc.).
- d) La infiltración de agua en el suelo, en donde la estructura debe colocarse, y la necesidad de utilizar viruta, mampostería u otro material para controlar dicha infiltración.

- e) La estabilidad de bordos o de los taludes del canal y la necesidad de ajustar el cauce o su revestimiento.
- f) La necesidad de bordos libres para confinar el gasto máximo al canal y el remanso causados por la instalación del aforador.
- g) El efecto del viento en el flujo que pasa por el aforador, especialmente cuando el aforador es ancho y la profundidad del agua en la cresta es baja y cuando el viento predominante es perpendicular a la dirección del flujo.
- h) Crecimiento de maleza acuática nociva.
- i) Transporte de sedimentos por el flujo.

El canal de llegada al aforador se conformará con los requisitos siguientes:

- a) Debe ser recto y uniforme y tener una longitud recta constante igual a cinco y hasta diez veces la anchura de la superficie del agua a gasto máximo.
- b) La pendiente en la plantilla deberá asegurar un flujo subcrítico con un número de Froude (F_r) menor a 0.5 (ó 0.7).

2.1.2 Conformación y material de construcción del aforador

En la norma ISO también se menciona que: “La estructura será rígida, hermética y capaz de soportar las condiciones de inundación sin peligro de desbordamientos o erosión aguas abajo. El eje estará en línea con la dirección del flujo del canal aguas arriba, y la geometría se conformará con las dimensiones dadas en esta norma. Las superficies del aforador, particularmente las de la sección de entrada y la garganta, serán lisas. El aforador se puede construir de concreto con un acabado liso o con un material no-corrosible liso. En instalaciones de laboratorio, el acabado será equivalente al de una hoja de metal o de madera cepillada, lijada y pintada. El acabado de las superficies es de importancia particular dentro de la sección de la garganta.”

2.1.3 Dimensiones del aforador

Para reducir al mínimo la incertidumbre en la medición del gasto, deberán cumplirse las siguientes tolerancias en las dimensiones del aforador:

- a) En el ancho inferior de la garganta: 0.2 % del ancho recomendado con un máximo absoluto de 0.01 m.
- b) En ondulaciones, respecto de la superficie plana de la garganta: 0.1 % de la longitud axial de la garganta.
- c) En el ancho entre las paredes de la garganta: 0.2 % de esta anchura con un máximo de 0.01 m.

- d) En el piso de la garganta no se deben tener inclinaciones longitudinales o transversales mayores a 0.1 %.
- e) En la pendiente de superficies inclinadas en la garganta: 0.1 %.
- f) En la longitud de la garganta: el 1 % de dicha longitud.
- g) En ondulaciones en las paredes de la transición de entrada de la garganta: 0.1 % de la longitud de la garganta.
- h) En ondulaciones de la superficie plana en la transición de salida de la garganta: 0.3 % de la longitud de la garganta.
- i) En ondulaciones respecto de un plano o de una curva en otras superficies verticales o inclinadas: el 1 %.
- j) En ondulaciones respecto de un plano en el fondo en el revestimiento del canal de llegada: 0.1 % de la longitud de la garganta.

La estructura debe medirse una vez terminada la construcción, y los valores medios de dimensiones relevantes y de sus desviaciones estándar deberán calcularse con un intervalo de confianza del 95 %. Los valores promedio de las dimensiones serán utilizados para el cómputo de la descarga y sus desviaciones estándar serán utilizadas para obtener la incertidumbre total en la determinación del gasto.

2.1.4 Estimación de la incertidumbre en la medición

En general, los componentes de las incertidumbres dependen de varias fuentes del error y se pueden determinar para obtener un valor de la incertidumbre total en la medida del gasto. La incertidumbre total se puede definir como la diferencia entre la descarga real y la calculada de acuerdo con las ecuaciones usadas para operar el aforador, que se asume fue construido e instalado de acuerdo con la norma". En la norma se plantean tres fuentes de error que deben considerarse: (a) el coeficiente de la descarga; (b) las dimensiones del aforador, por ejemplo el ancho de la garganta del aforador y (c) la medida de la profundidad o carga.

Incertidumbre en el valor del coeficiente de descarga

También se propone la consideración de dos tipos de error: el sistemático y el aleatorio; así, se considera que con base en experimentos realizados cuidadosamente y con la suficiente repetición de las lecturas para asegurar la precisión adecuada, la incertidumbre sistemática del porcentaje del coeficiente de descarga se ubica entre el 2 % y el 4 %.

Incertidumbre en las dimensiones del aforador

En cuanto a las incertidumbres en las mediciones hechas por el usuario, se propone que el usuario realice sus propios cálculos, puesto que no están especificados ni los métodos de medida ni la manera en la cual deben realizarse; por ejemplo, el método para medir del ancho del aforador, debe permitir que el usuario determine la incertidumbre en esta cantidad.

Incertidumbre en la medida de la profundidad o carga

La incertidumbre en el valor de la carga medida con una escala será determinada en función de las fuentes del error individuales, por ejemplo, la incertidumbre en la determinación del cero en la escala, el sesgo y la repetibilidad del aparato de medición, además de las fluctuaciones del nivel, etc. La incertidumbre en la medición de la carga puede ser pequeña si se utiliza un vernier y la colocación del *cero* del aparato se realiza aceptablemente. La incertidumbre en las dimensiones del aforador (esencialmente el ancho de la garganta) dependerá de la exactitud del dispositivo usado para medir durante la construcción. En la práctica, esta incertidumbre a menudo es insignificante en comparación con otras incertidumbres.

2.2 Recomendaciones de la norma de la ASTM “Standard Test Method for Open Channel Flow Measurement of Water with the Parshall Flume”

Esta norma es más sencilla y clara que la norma de la ISO. En ella se pueden encontrar varias recomendaciones; en este documento solamente se transcriben aquellas que se consideran importantes para la intención del trabajo. La norma consultada tiene una “designación” D1941-91 (re-aceptación 2001).

En esta norma se recomienda que las dimensiones reales del aforador se mantengan en un límite de diferencia de 2 %, respecto de las dimensiones obligatorias y que el acabado de las partes interiores del aforador, sean al menos tan lisas como el acabado de cemento pulido. Se recomienda también el uso de un tanque de lectura para mejorar las mediciones de nivel. En la norma se enfatizan varias recomendaciones sobre el pozo de lectura, entre ellas se menciona el diámetro del tubo de conexión, mismo que debería ser de al menos una milésima del área del tanque.

Se recomienda ampliamente que la descarga en el aforador sea libre, dado que se tiene mejor medición. Así mismo se menciona que el flujo de entrada al aforador debe ser tranquilo y estar uniformemente distribuido en la sección del canal; en general, se indica que esta situación se logra si se tiene una longitud de canal recta de 10 a 20 veces el ancho de la garganta. Dicha situación se debería revisar en cada caso por medio de flotadores o basándose en experiencias similares o con aproximaciones analíticas.

Si el flujo fuera supercrítico, se recomienda que se tenga un salto hidráulico aguas arriba del aforador a una distancia de al menos 30 veces la profundidad del agua en

el aforador. El aforador debe construirse e instalarse de manera que en el piso de la sección convergente no se tenga más de 0.01 ft de desnivel en ninguna dirección.

En la norma se afirma que con objeto de tener la mejor medición posible, el aforador se debe calibrar en sitio y que en ocasiones es suficiente con la calibración del instrumento de medición del nivel (cuando se tiene).

Un aspecto importante de la norma ASTM se refiere a la precisión; se indica que un aforador que cumpla con la norma, esté fabricado de acuerdo a las dimensiones estándar y en el que se use la ecuación correcta, tendrá una precisión de $\pm 5\%$.

En cuanto a las fuentes de error, se informa que no se tiene suficiente información experimental sobre los errores que se tienen en aforadores que no cumplen con la norma. Sin embargo, para aforadores pequeños (2.24 a 7.62 cm de ancho de garganta) en los que no se tiene mucho error de construcción en la garganta, es aceptable usar las ecuaciones como si el ancho promedio real de la garganta fuese igual que el ancho estándar u obligatorio.

La diferencia de medidas entre lo real y la referencia (la dimensión dada en la norma) no debe exceder de 0.4 mm en el ancho de garganta y de 0.8 mm en cualquier otra dimensión. Así mismo, el aforador debe instalarse y mantenerse con la sección convergente bien nivelada, tanto en el sentido longitudinal como transversal, para lograr mediciones precisas. En general, no se recomienda medir profundidades menores a 30 mm y se debe mantener la sección de entrada limpia de musgo y azolve.

2.3 Comentarios a las normas ISO y ASTM

Cuando se pretende el cumplimiento de las normas, se tiene una situación confusa: un Aforador podría cumplir con la norma en todos los requisitos, pero en la norma de la ISO no se indica qué magnitud del error se tendría si se cumpliera dicha norma, solamente se indica que la incertidumbre relacionada con el coeficiente C de la ecuación, es de 3 % a 4 %. Por el contrario, en la norma de la ASTM sí se indica y se dice que se tendría un error de $\pm 5\%$.

En ambas normas se indica la manera de estimar el error que se tendría al medir con un aforador Parshall y se describen las diferentes fuentes de error, además de los diferentes tipos de dicho error. Si se calculan los errores como se indica en las normas (así se procede en las inspecciones realizadas) es posible determinar un gasto promedio en función de los valores medios, tanto de los diferentes valores del ancho de la garganta, como de los diferentes datos del medidor de nivel. En este caso, las variaciones de la medida de la garganta, se deben a los errores constructivos de la estructura; y los diferentes valores del nivel del agua, se deben a la variación de las lecturas en la pantalla del medidor (se supone el uso de un medidor continuo de nivel). Por otro lado las mismas variaciones de la garganta y del nivel del agua se utilizan para estimar la incertidumbre global con la combinación de las incertidumbres particulares, por medio de la desviación estándar.

Lo anterior parece aceptable, pero ¿qué relación tiene el valor del error propuesto en la norma ASTM ($\pm 5\%$) y la incertidumbre calculada como ya se mencionó? En primer lugar debe aclararse que en la norma ASTM se utiliza la palabra *accuracy* y al incluir el símbolo “ \pm ” se puede entender que más bien se trata del concepto “incertidumbre”. Si esto es así, entonces ¿qué caso tiene calcular la incertidumbre con las variaciones tanto de la garganta como del nivel del agua? Cabe aclarar que la forma de estimar la incertidumbre solamente se describe en la norma de la ISO; mientras que en la norma ASTM se advierte sobre la imposibilidad de estimar la precisión y el sesgo (*precision and bias*).

Otro aspecto interesante en ambas normas es que se recomienda cumplir y mantener ciertos requisitos; unos relacionados con el respeto a las medidas obligatorias que deberían tener los aforadores y otros relacionados con el material y acabado de la estructura del aforador, principalmente en las paredes de la garganta; también se dan recomendaciones sobre la geometría y batimetría del canal de llegada, así como de las condiciones hidráulicas; sin embargo, no se informa sobre el orden de magnitud de los errores en los que se incurriría si no se cumplen dichas recomendaciones.

Finalmente, uno de los párrafos que más llaman la atención en la norma de la ASTM es aquel en el que se menciona la necesidad de calibrar un aforador si se desea obtener la mejor medición posible por medio del mismo. Ello invita a preguntar: ¿Qué significa “la mejor medición posible”?

2.4 Procedimiento de inspección de aforadores Parshall

Con base en las dos normas utilizadas, se diseñó un formato sencillo en el que se registran las revisiones y se indica de manera sucinta la forma de proceder en cada caso. Primeramente, se registran los datos básicos relacionados con el aforador, como son ubicación, propietario o usuario, marca del aforador, marca del totalizador y tipo de sensor de nivel. En los siguientes párrafos se describen las revisiones que se realizan durante la inspección, se antepone un identificador porque así es como se reportan en el formato (ver anexo 1).

A.1 Medidas del aforador

La primera revisión se hace a las dimensiones del aforador. Se toman las medidas del aforador y se comparan con las medidas estándar, calculando alguna posible diferencia. Las medidas que se toman se ilustran en la figura 3.

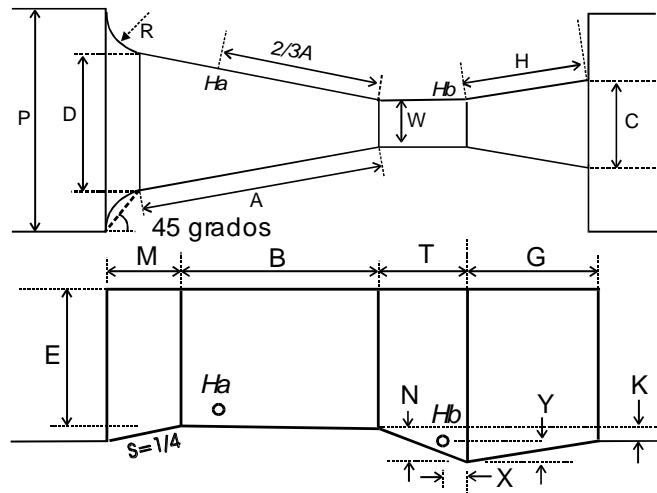


Figura 3. Dimensiones que se revisan en un aforador Parshall.

A.2 “Cero” de la escala

Otra revisión importante es la verificación de que el “cero” de la escala esté bien colocado. Esta revisión se realiza por medio del flexómetro midiendo desde la superficie hasta el fondo con una regla tipo nivel y posteriormente comparan con lecturas dadas por el registro, ya sea en una escala pintada en la pared, en un limnómetro o en un medidor automático, por ejemplo del tipo ultrasónico.

A.3 Canal de llegada

En seguida se revisa que el canal de llegada sea recto, uniforme y con pendiente constante en una longitud de 5 veces el ancho de la garganta para el gasto máximo. Lo anterior se realiza con el flexómetro y después se verifica la longitud recta.

A.4 Alineación del canal de llegada

Después, se revisa la alineación entre el canal de llegada y el eje longitudinal del aforador. Se coloca un hilo de acuerdo al croquis (figura 4). Si el aforador está alineado, las distancias $D/2$, $W/2$ y $C/2$ deberán ser iguales entre ellas.

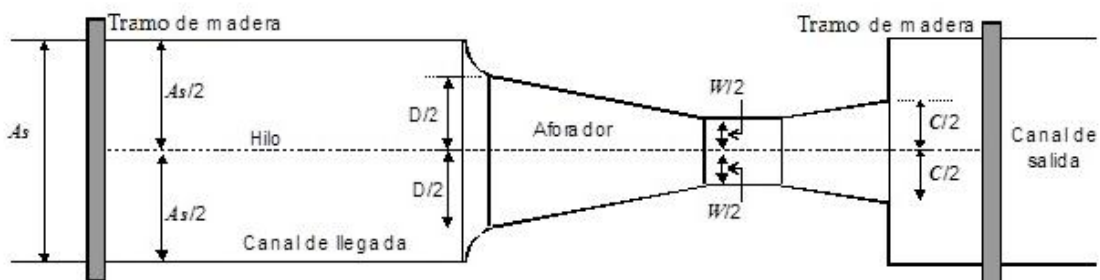


Figura 4. Esquema para la revisión de la alineación entre el canal de llegada y el aforador.

A.5 Construcción y material del aforador

Se revisa que el material del medidor sea rígido e impermeable y que esté lo suficientemente anclado para resistir avenidas que pudieran dañar las paredes o provocar erosión aguas abajo. También se revisan las superficies del aforador, particularmente las de las secciones de entrada y garganta, ya que deben ser lisas. Finalmente se revisa que el aforador esté construido con materiales permitidos en los aforadores: concreto con acabado de cemento fino u otro material, pero igualmente con acabado fino.

A.6 Medidas del ancho de garganta

Como lo indica la norma, se realizan varias mediciones del ancho de la garganta, con dichas mediciones se estima la incertidumbre en la estimación del gasto. El procedimiento es simple: se toman al menos 20 mediciones del ancho de la garganta procurando cubrir toda la garganta, con una ubicación arbitraria de cada medición.

A.7 Coeficiente y exponente de la ecuación del Aforador

Uno de los aspectos más importantes de la revisión es la verificación del uso de la ecuación correcta para el cálculo del gasto. Según la norma se utiliza una ecuación preestablecida de acuerdo al ancho de la garganta (ecuación 1):

$$Q = CH_a^n \quad (1)$$

Donde:

Q , Gasto o caudal (m^3/s).

H_a , Carga sobre la cresta del aforador (m).

C , Coeficiente que varía de acuerdo al ancho de la garganta (-).

n , Exponente que igualmente es función del ancho de la garganta (-).

Los valores predeterminados, tanto del coeficiente C y del exponente n se deben tomar obligatoriamente de las normas. La revisión se realiza en el sentido de corroborar que efectivamente el coeficiente y el exponente sean los valores correctos. Cabe mencionar que también se revisan las unidades usadas, ya que si no se tiene cuidado se pueden estar usando erróneamente mm en donde se deben usar cm ó m; así mismo se debe tener cuidado entre litros por segundo y m^3/s .

B.1 Lecturas del Registro electrónico

Otra revisión importante, incluso más que la medición del ancho de la garganta, es el análisis de los registros del medidor de nivel, que en la mayoría de los casos, se trata de medidores de registro continuo, tipo ultrasónico o de burbujeo. En este caso también se registran 20 lecturas; con el valor promedio, se calcula el gasto y con la variación de cada una de las lecturas se estima la incertidumbre de esta medición por medio de la desviación estándar.

B.2 Número de Froude

La norma indica que se debe tener un número de Froude bajo en el canal de llegada; es por ello que se requiere recolectar alguna información de dicho canal. Según la norma ISO, se debe utilizar la ecuación 2 para calcular el número de Froude (F_r) :

$$F_r = \frac{Q_{max}}{A\sqrt{gh_{max}}} \quad (2)$$

Donde:

- Q_{max} , Gasto máximo que puede escurrir en el canal (m^3/s).
- A , Área hidráulica correspondiente al gasto máximo (m^2).
- h_{max} , Tirante máximo (m).

Para poder calcular el número de Froude, es necesario conocer el gasto máximo que puede escurrir por el canal y su correspondiente tirante. Si el canal es rectangular se debe medir el ancho del canal, si es trapecial, se debe conocer adicionalmente el talud, y si es un cauce natural o irregular se debe conocer la sección transversal para estar en condiciones de estimar el área hidráulica.

B.3 Distribución de Velocidades en el canal de llegada

Otra condición que exige la norma ISO, es que el escurrimiento del agua se presente en forma paralela a las paredes del canal. Para indagar si se cumple esta condición, se sueltan varios flotadores aguas arriba del aforador en el centro del canal de llegada y se mide la distancia a cualquiera de las paredes justo cuando el flotador pasa a la entrada del aforador (ver figura 5).

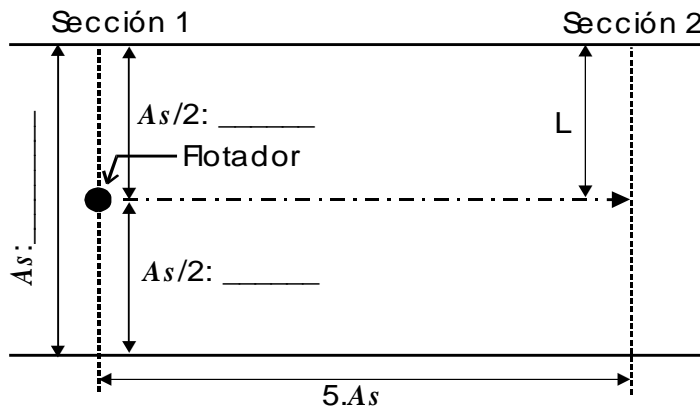


Figura 5. Verificación del escurrimiento paralelo antes del aforador.

2.5 Ejemplos de empresas inspeccionadas

A continuación se mencionan algunos casos de inspección en aforadores Parshall de industrias y se presentan brevemente los resultados de cada uno.

2.5.1 Planta de tratamiento del Grupo Modelo

Se trata de la planta de tratamiento de una industria dedicada a la producción de cerveza. Está ubicada en la ciudad de México, la inspección se realizó en el mes de junio del año 2003. En la planta se tiene dos aforadores Parshall, mismos que fueron inspeccionados. A continuación se dan algunos detalles de la inspección a uno de ellos. Primeramente se muestran los errores de medición y construcción de acuerdo a lo indicado en la norma ISO (tabla 3).

Tabla 3. Errores de medición y construcción, Grupo Modelo

Tipo de error	Error (%)
Error sistemático en la medición del ancho de garganta	0.78
Error aleatorio en la medición del nivel	2.29
Error sistemático en la medición del nivel	0.02
Error aleatorio en el cálculo del gasto	3.64
Error sistemático en el cálculo del gasto	0.82
Error total por medición y construcción	3.73

Errores por coeficientes de la ecuación utilizada

El manual del usuario del equipo de medición indica que el cálculo del gasto se realiza utilizando los coeficientes y exponentes presentados en la Norma Internacional ISO 9826. En ella se indica la ecuación que debe utilizarse para cada aforador en función del ancho de garganta. Es en esta parte donde se tiene el problema. Las ecuaciones se presentan para aforadores de 0.152, 0.25 y 0.30 m. Es decir, no se presenta ningún ancho de garganta igual al del aforador verificado cuyo ancho de garganta es de 0.2286 m. Esto representa un error en el cálculo del gasto de la magnitud indicada en la lámina siguiente. Las unidades de gasto son las que presenta el medidor (ver figura 6).

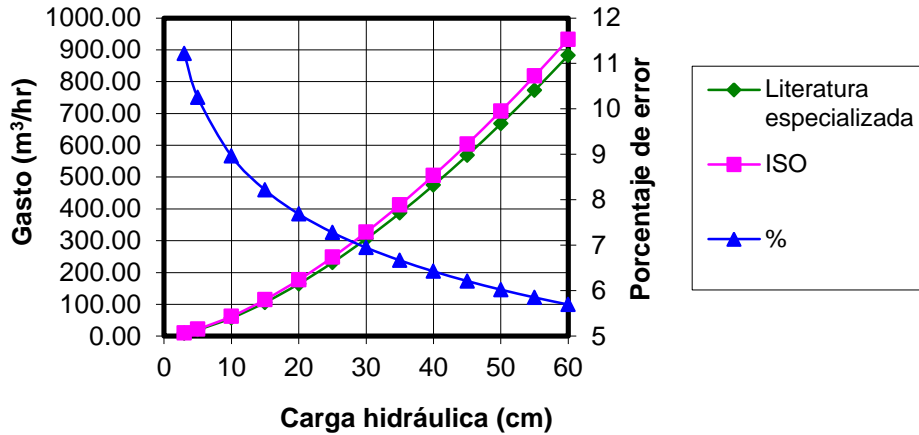


Figura 6. Errores por ecuación errónea en el aforador Parshall, Grupo Modelo.

Error total por medición, construcción y ecuación utilizada, Grupo Modelo

En función de los errores por construcción, lectura de nivel y ecuación errónea del aforador, el porcentaje total de error en el aforador se presenta en la figura 7.

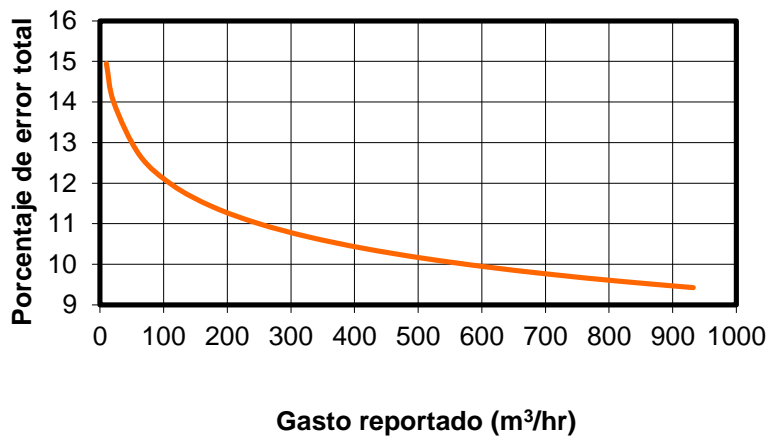


Figura 7. Porcentaje de error total en el aforador de la cervecería Modelo.

También se revisaron los requisitos físicos e hidráulicos, tanto del aforador, como del canal de llegada. Cada uno de los aspectos revisados se presenta en la tabla 4, como se muestra, se tiene el tipo de revisión y una breve evaluación de la misma.

Tabla 4. Inspecciones al aforador y al canal de llegada, Grupo Modelo

Número	Aspecto	Diagnóstico
A.1	Medidas del aforador	El medidor presenta diferencias en sus dimensiones. Sin embargo, las más importantes, como son las relacionadas con la garganta presentan errores pequeños.
A.2	Cero de la escala	El medidor de nivel reporta diferencias respecto al nivel medido con el flexómetro. El promedio de dicho error se sitúa en 0.25 cm.
A.3	Canal de llegada	El ancho de la superficie libre del agua es de 110 cm, por lo que el tramo recto debiera ser de 550 cm; sin embargo, dicho tramo tiene solamente 376 cm.
A.4	Alineación del canal de llegada	No se tiene una alineación perfecta del canal con el aforador. Se presenta una excentricidad promedio de 1.20 cm.
A.5	Construcción y material del aforador	Cumple
B.2	Número de Froude	El número de Froude para el aforador es de 0.14, por lo que si cumple este requisito.
B.3	Distribución de velocidades en el canal de llegada	En promedio los flotadores soltados al centro del canal, en la salida del tubo, llegan al aforador desviados en 2.30 cm respecto del centro. Y la trayectoria no es recta, todos los flotadores se desviaron hacia uno de los costados.
B.4	Coefficiente de la ecuación del Aforador	El manual del usuario del aforador, indica que se usa la ecuación presentada en la Norma Internacional ISO 9826.

Conclusiones y recomendaciones para el grupo Modelo

Si se observa el valor del error total por medición y construcción (3.73 %, tabla 3), se puede decir que se tiene un funcionamiento adecuado del conjunto aforador-medidor. Sin embargo, se recomienda verificar con el proveedor del equipo electrónico (medidor) para solucionar el problema de los coeficientes de la ecuación utilizada, ya que se incurre en un error mayor; aproximadamente de 7.6 % por esta razón, lo que da un error total de 11.3 %, para el gasto de prueba (200 m³/hr).

2.5.2 Planta Colgate

En este caso se trata de la conocida marca de dentífrico denominada Colgate; la inspección se realizó en una de su planta ubicada en la ciudad de Toluca, en el estado de México. La inspección se realizó en el año de 2005. La revisión de las dimensiones del aforador se presenta a continuación (tabla 5).

Tabla 5. Medidas del aforador de la Planta Colgate

Parte	Medidas (cm)		
	Estándar	Real	Diferencia
W	7.62	7.62	
A	46.70	46.70	
2/3 A	31.10	31.10	
B	45.70	45.70	
C	17.80	17.80	
D	25.90	25.90	0.40
E	45.70	45.70	
T	15.20	15.20	
G	30.50	30.50	
K	2.50	2.50	
N	5.70	5.70	
X	2.50	2.50	
Y	3.80	3.80	
S	0.25	0.25	

Se considera aceptable el dimensionamiento del aforador, toda vez que las diferencias respecto de las magnitudes estándar se presentan únicamente en la dimensión "D" que es la entrada del aforador y con una diferencia pequeña. En cambio las dimensiones sustantivas del aforador "W" y "T", correspondientes a la garganta, no se detecta diferencia.

Los requisitos que debe cubrir el medidor en cuanto a su material y construcción, se revisaron y se observó que se cumple con todos (tabla 6). También se tomaron varias medidas al ancho de la garganta y se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 7. Estas medidas se usaron para estimar la incertidumbre por construcción.

Tabla 6. Construcción y material del aforador

Características del material	Características de la superficie	Materiales permitidos en aforadores
El material del medidor debe ser rígido e impermeable y suficientemente anclado para resistir avenidas que dañen las paredes o provoquen erosión aguas abajo.	Las superficies del aforador, particularmente las de las secciones de la entrada y garganta, deben ser lisas.	Concreto con acabado de cemento fino u otro material pero igualmente con acabado fino.
Cumple (Si/No): Si	Cumple (Si/No): Si	Cumple (Si/No): Si

El objetivo de la inspección es realizar una serie de mediciones en diferentes partes de la garganta. Para ello, se midió con un flexómetro en 20 puntos de la garganta distribuidos uniformemente en lo ancho y alto de la misma.

Tabla 7. Medidas del ancho de garganta

Número	W	Número	W	Número	W	Número	W
1	2.992	6	2.967	11	2.995	16	2.974
2	2.986	7	2.986	12	2.976	17	2.987
3	2.997	8	2.995	13	2.984	18	2.975
4	2.984	9	2.960	14	2.988	19	2.991
5	2.965	10	2.983	15	2.984	20	2.972

2.5.3 Industrias Proquina

Esta empresa se localiza en la ciudad de Orizaba en el estado de Veracruz. A solicitud del personal de la empresa se han realizado inspecciones a su aforador Parshall desde el año 2004, mismo que descarga agua limpia que primero toma de un manantial y luego desfoga hacia el río. La empresa se dedica a la producción de hormonas para uso medicinal. Primeramente se revisaron las condiciones del aforador y del canal de llegada (ver tabla 8).

Errores por el ancho de garganta en el aforador de la empresa Proquina

La norma indica que “con base en experimentos realizados cuidadosamente y con la suficiente repetición de las lecturas para asegurar la precisión adecuada, la incertidumbre sistemática del porcentaje del coeficiente de descarga se ubica entre el 2 % y el 4 %”. Para este caso se estableció un 3 %. El ancho de la garganta del aforador es 2.9816 pulgadas y se tiene una incertidumbre aleatoria $X_b = 0.737 \%$, adicionando un error en la estimación del coeficiente de $X_c = 3 \%$ y la incertidumbre para la estimación del nivel de $X_h = 2.0 \%$. Entonces la incertidumbre global es la semisuma cuadrática del error $X_q = 3.68 \%$. Por otro lado, si el aforador tuviera las 3 pulgadas exactas de ancho, el coeficiente sería de 0.992; pero como no es así, el coeficiente se debe cambiar para disminuir el error debido a tal diferencia.

Tabla 8. Inspecciones al aforador y al canal de llegada, Industrias Proquina

Número	Aspecto	Diagnóstico
A.1	Medidas del aforador	Todas las dimensiones de reales del aforador tienen una diferencia menor a 1% respecto de las dimensiones que indica la norma. Únicamente la longitud de la sección convergente tiene una diferencia de 7.22 %.
A.2	Cero de la escala	El medidor de nivel reporta diferencias respecto al nivel medido con el flexómetro. El promedio de dicho error se sitúa en 0.05 cm.
A.3	Canal de llegada	El ancho de la superficie libre del agua es de 94 cm, por lo que el tramo recto debiera ser de 470 cm; sin embargo, dicho tramo tiene solamente 328 cm.
A.4	Alineación del canal de llegada	No se tiene una alineación perfecta del canal con el aforador. Se presenta una excentricidad promedio de 1.2 cm.
A.5	Construcción y material del aforador	Cumple
B.2	Número de Froude	El número de Froude para el aforador es de 0.15, por lo que si cumple este requisito.
B.3	Distribución de velocidades en el canal de llegada	El centro del canal de llegada está a 48 cm (la mitad del ancho total). Los cinco flotadores llegaron al aforador con 10, 0, 80, 60 y 50 cm de distancia del bordo del canal. Lo que indica que el flujo no llega paralelo al aforador.
B.4	Coefficiente de la ecuación del Aforador	No se conocía la ecuación utilizada.

Errores de medición

En esta industria fue posible la medición con molinete aguas arriba del aforador. La diferencia de gastos fue de 11 % en esta fecha (2004), para el año de 2005, se tuvo una diferencia de 7 % y para 2006 se obtuvo una diferencia de 14 %.

2.5.4 Comentarios a la inspección de industrias

En los casos de las empresas “Grupo Modelo” y “Colgate” no se realizó la comparación de gastos con algún medidor de referencia; de hecho, aunque así se hubiera solicitado, no era posible porque la ubicación de los aforadores no lo permitía, así que el resultado de la inspección fue una evaluación cualitativa sobre el cumplimiento de la norma, en cuanto al cumplimiento de requisitos físicos e hidráulicos tanto del aforador mismo como del canal de llegada. También se estimó la incertidumbre de acuerdo a la norma. Pero no se proporcionó ninguna relación entre la evaluación cualitativa y la magnitud de la incertidumbre; es decir, no hay manera de informar si la incertidumbre tiene alguna relación cuantitativa con algún grado de incumplimiento de los requisitos de la norma.

Por otro lado, en la inspección del aforador de la empresa “Proquina” se realizó la misma inspección al aforador y al canal de llegada y se comentó sobre el incumplimiento de algunos requisitos; además, en esta empresa fue posible aforar con un molinete recién calibrado, encontrándose diferencias en los gastos respectivos. En este caso, aunque se pudo calcular la magnitud del error de

medición que se tiene para los gastos de prueba, tampoco fue posible relacionar los incumplimientos en la norma con dicho error de medición como se comentó en el párrafo anterior.

De lo anterior, surge la necesidad de realizar trabajos experimentales para tratar de relacionar el incumplimiento de los requisitos de la norma con errores de medición o bien, realizar experimentos para calibrar aforadores como se recomienda en la norma ASTM para poder contar con elementos que permitan aclarar si bajo algunas circunstancias la calibración de un aforador Parshall es diferente de otras. Por ejemplo, qué tipo de calibración se tendrá en un mismo aforador al cual se le cambie la pendiente del canal de llegada; o bien, acaso se tendrá diferente comportamiento si las paredes del aforador no tienen el acabado especificado. También podría revisarse si con un aforador Parshall se estimarían diferentes gastos si se tiene un elemento perturbatorio del flujo en el canal de llegada, dentro del tramo en el cual no debiera tenerse tal situación.

2.6 Experimentos en un aforador Parshall realizados en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

2.6.1 Instalaciones experimentales para las pruebas

De acuerdo a la recomendación anterior, se realizaron pruebas en el Laboratorio de Hidráulica “Ing. David Hernández Huéramo” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en el año 2008. El laboratorio está destinado preponderantemente a las prácticas de la materia de Hidráulica, pero también se utiliza para realizar experimentos como el presente.

Para realizar las pruebas se utilizaron los canales de pendiente variable y de flujo permanente. El canal de pendiente variable, es una estructura de metal y cristal, de sección rectangular de 30 cm de ancho y una longitud uniforme de 8 m (ver figura 8).



Figura 8. Canal de pendiente variable.

El gasto que circula por el canal se estima por medio de un vertedor rectangular de pared delgada tipo Rehbock colocado en uno de los canales de retorno. La lectura de la carga sobre el vertedor se realizó con un limnómetro de punta y un pozo de lectura conectado a un vaso comunicante al canal de llegada (ver figura 9 y 10). Para estimar el gasto se utilizó la ecuación 3, que es la fórmula de Rehbock, tiene gran precisión y es de las más utilizadas por su sencillez (Sotelo, 1999). Este aspecto se ha confirmado previamente por medio de verificaciones volumétricas realizadas con fines didácticos:

$$Q = \frac{2b\sqrt{2gh}^{3/2}}{3} \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h+0.011}{w} \right) \right] \left[\left(1 + \frac{0.0011}{h} \right) \right]^{3/2} \quad (3)$$

Donde:

- b , Ancho del canal (m)
- g , Aceleración de la gravedad (m/s^2)
- h , Carga sobre el vertedor (m)
- w , Altura de la placa del vertedor (m)



Figura 9. Vertedor Rehbock.



Figura 10. Limnómetro para leer la carga sobre el vertedor Rehbock.

El canal de flujo permanente está construido en mampostería recubierto por un acabado liso de cemento y pintura acrílica en secciones de geometría variable. En la zona donde se colocó el aforador Parshall la sección es rectangular de 41 cm de ancho y pendiente uniforme de 0.0001 (ver figura 11).



Figura 11. Parte final del canal de flujo permanente.

Para el control de las pruebas realizadas en el canal de flujo permanente, se utilizó como medidor de referencia un vertedor triangular de pared delgada, mismo que se calibró volumétricamente. La ecuación resultante de esta calibración fue la ecuación 4:

$$Q = 1.2077h^{2.3192} \quad (4)$$

Este vertedor se localiza en la parte final del canal de flujo permanente (ver figura 12).



Figura 12. Vertedor triangular.

2.6.2 Aforador Parshall utilizado en las pruebas

Se propuso un aforador Parshall de 3 pulgadas de ancho en la garganta; para este tamaño de aforador, en la norma del ASTM se indica un rango de funcionamiento desde 0.85 L/s hasta 53.80 L/s. El aforador se construyó en acrílico con las dimensiones sugeridas por la norma ASTM (figura 13). En la misma norma se indica la ecuación que debe usarse para este ancho de garganta (ecuación 5):

$$Q = 1.141H_a^{1.55} \quad (5)$$

Donde Q se da en L/s y H_a en cm. La carga H_a , se midió con un limnómetro de punta colocado encima del aforador, justo en el sitio que se indica en la ISO, sección 8.2.1 inciso "d" y en la ASTM, sección 7.2.2, es decir a $2/3$ de la longitud de la pared convergente, medida desde la garganta hacia la parte inicial del aforador.

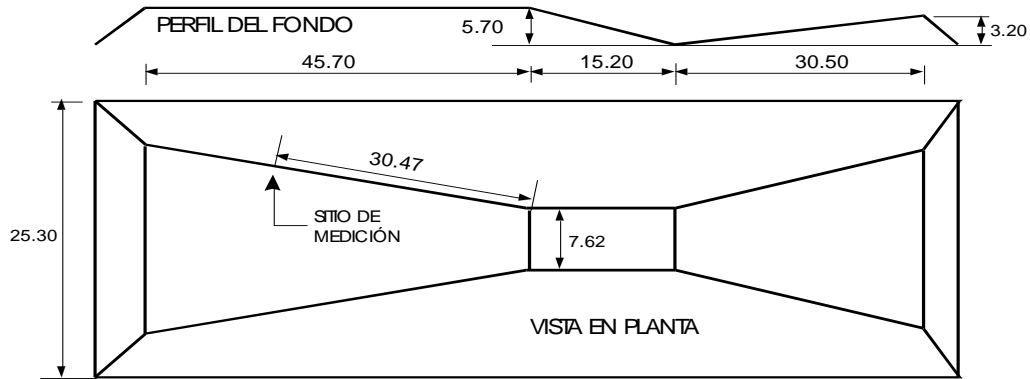


Figura 13. Dimensiones del aforador y sitio de medición del nivel del agua, unidades en centímetros.

En la figura 14, mostrada a continuación, se aprecia el aforador durante la fase de construcción.

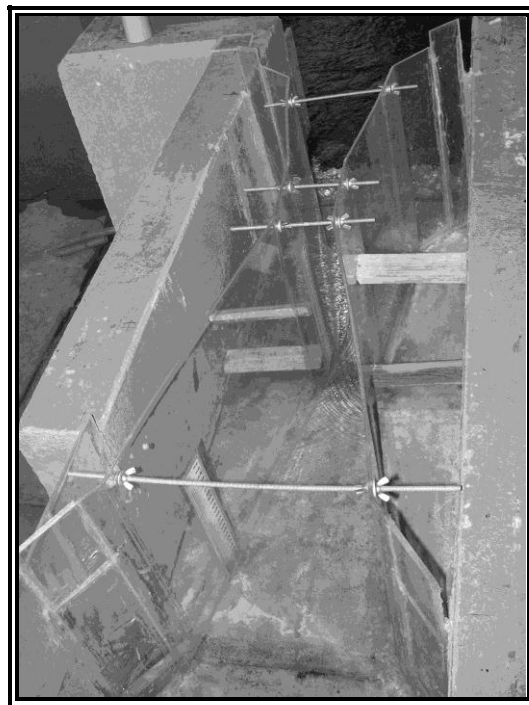


Figura 14. Vista del aforador en la etapa de construcción.

2.6.3 Prueba número 1. Calibración para valores altos del número de Froude

En los trabajos de revisión de aforadores en las industrias no se detectaron números de Froude altos; sin embargo, se consideró posible la presencia de dichos valores en aquellos sitios sin acceso al canal de llegada. Fue por ello que se intentó calibrar el aforador para un rango de números de Froude mayores a los máximos permitidos en la norma ISO. En esta norma se propone calcular el número de Froude con base en la ecuación 2 vista anteriormente.

La norma no indica en dónde debe medirse el tirante h_{max} , por lo que decidió medirse justo antes de la entrada del aforador.

En el canal de pendiente variable se pueden lograr fácilmente diferentes valores del número de Froude, incluyendo valores mayores a la unidad; por ejemplo durante las prácticas de la clase de Hidráulica se logran valores de hasta 2.345. Sin embargo, después de colocar el aforador fue imposible lograr dichos valores altos; el aforador, como podría haberse supuesto, representa un estrechamiento de la sección que “remansa” el agua, por lo tanto, el tirante medido después de la colocación del aforador es sustancialmente mayor y consecuentemente, el número de Froude es mucho menor. En las gráficas de la figura 15 se presentan los resultados de esta prueba y se aprecia claramente que aún para pendientes altas, no se logran números de Froude mayores a 0.18.

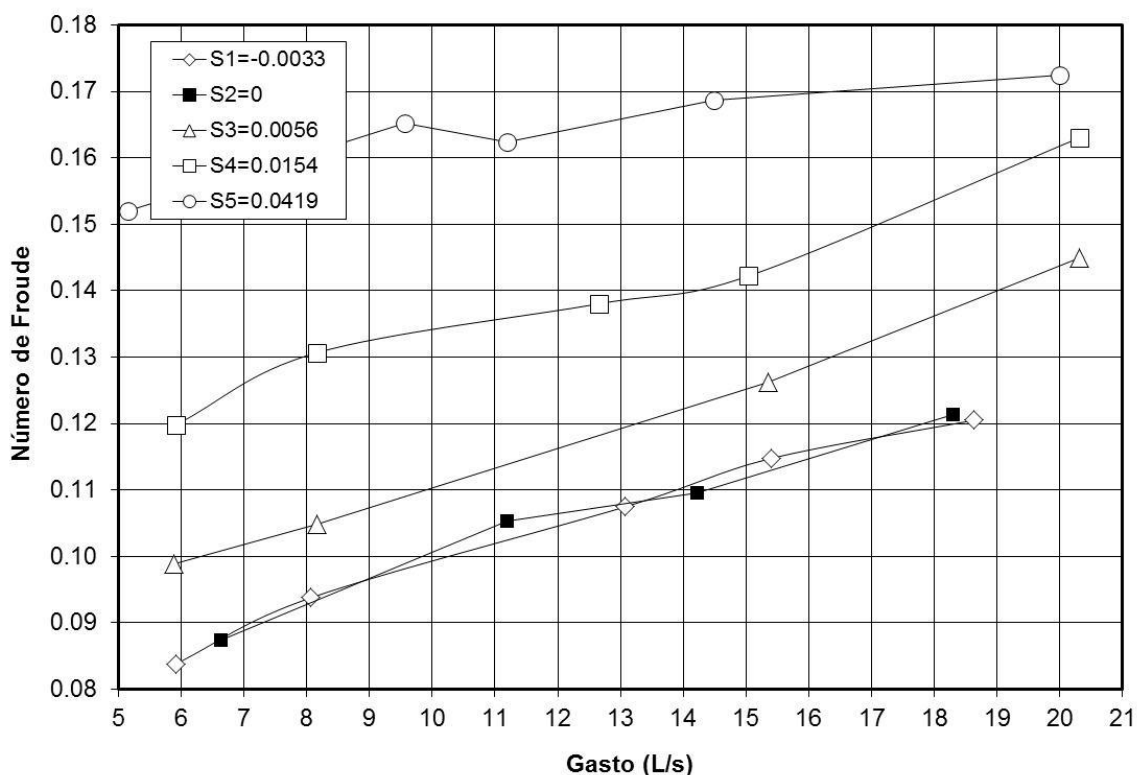


Figura 15. Valores del número de Froude para diferentes pendientes y gastos.

Acorde con el objetivo de la investigación, se determinaron ecuaciones de calibración, pero se cambió un poco el enfoque: al no lograr valores altos del número de Froude, se buscaron diferentes calibraciones para cada valor de la pendiente. En primer lugar, es notorio que para cada pendiente se tiene una diferente ecuación. En la figura 16, se aprecia la gráfica de cada una de las pendientes comparada con la ecuación de la ASTM.

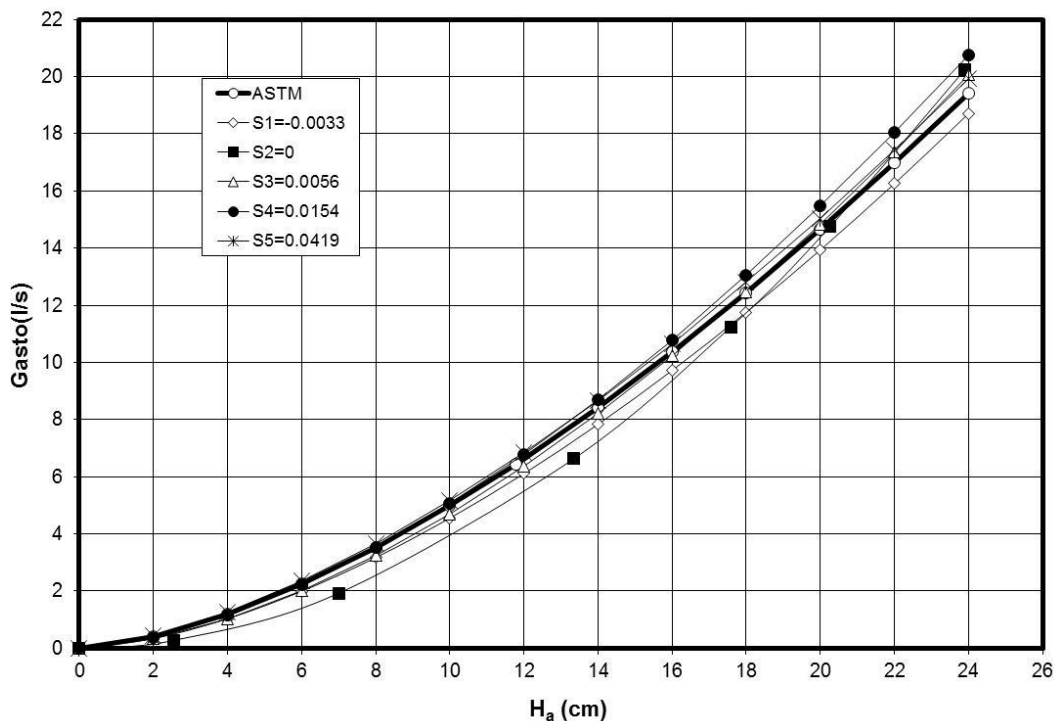


Figura 16. Resultados de la calibración del aforador para diferentes pendientes.

Con objeto de presentar de manera gráfica las diferencias entre las ecuaciones, se calculó la diferencia porcentual entre el gasto resultante de la ecuación ASTM y los gastos calculados con las ecuaciones de calibración. Dicha diferencia se calculó con la ecuación 6:

$$D = \frac{(Q_C - Q_A)}{Q_A} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

D , Diferencias (%)

Q_C , Gasto de calibración (L/s)

Q_A , Gasto de la ecuación de la ASTM (L/s)

De esta manera, si el resultado es positivo significa que la ecuación calibrada sobreestima el gasto y viceversa.

Los resultados se aprecian de mejor manera en la figura 17, en dicha figura dos líneas llaman notoriamente la atención, las correspondientes a las pendientes mayores ($S_4 = 0.0154$ y $S_5 = 0.0419$) porque se acercan más a la ecuación de la ASTM (la línea que se acerque más a cero, será la mejor); las otras pendientes en el canal afectan la ecuación de calibración de tal manera que se tienen grandes diferencias, por ejemplo, el caso de la pendiente cero. Estos resultados invitan a

suponer que si la ecuación ASTM es la más adecuada, las pendientes fuertes afectan menos que las pendientes suaves.

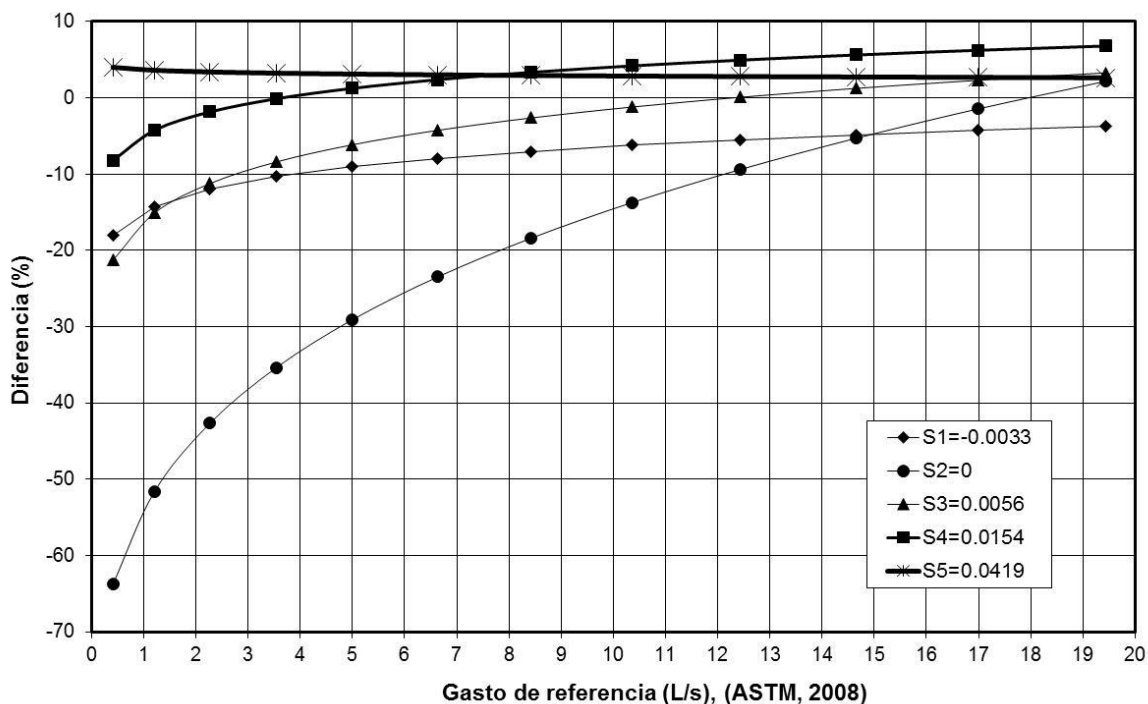


Figura 17. Diferencia entre la ecuación de calibración y la ecuación de la ASTM para diferentes pendientes.

Con los resultados encontrados se demuestra que el número de Froude no es una variable importante, ya que al colocar el aforador, la corriente tenderá al flujo subcrítico de manera inevitable; por el contrario, el valor de la pendiente en el canal sí tiene un efecto importante sobre la ecuación de calibración. Ninguna de las normas consultadas indica restricciones sobre la pendiente, por lo que se asume que el aforador puede colocarse con cualquier pendiente y como se aprecia en los resultados, cada pendiente generará una diferente ecuación de calibración.

2.6.4 Prueba número 2. Calibración para diferentes rugosidades en el interior del aforador

Para realizar estas pruebas se cubrieron las paredes y el fondo del aforador con dos diferentes tamaños de arena. En las normas se recomienda construir el aforador con un acabado de cemento pulido y el tamaño máximo de la rugosidad no debe ser mayor de 0.4 mm; como tal tamaño es poco práctico, se usó arbitrariamente arena de aproximadamente 2 mm y 5 mm (ver figuras 18 y 19); también se consideró el caso del aforador sin recubrimiento como una tercera opción prácticamente lisa.

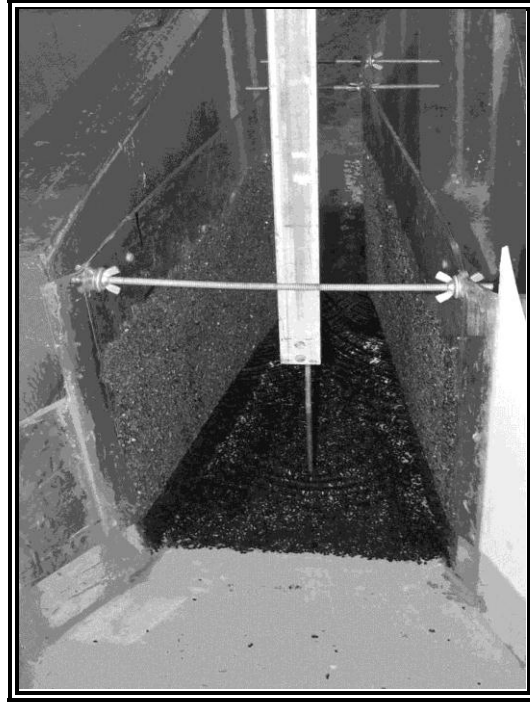


Figura 18. Aforador recubierto con arena de 2 mm.

En la figura 20, se presentan las diferentes curvas de calibración para cada tipo de rugosidad mencionada anteriormente.

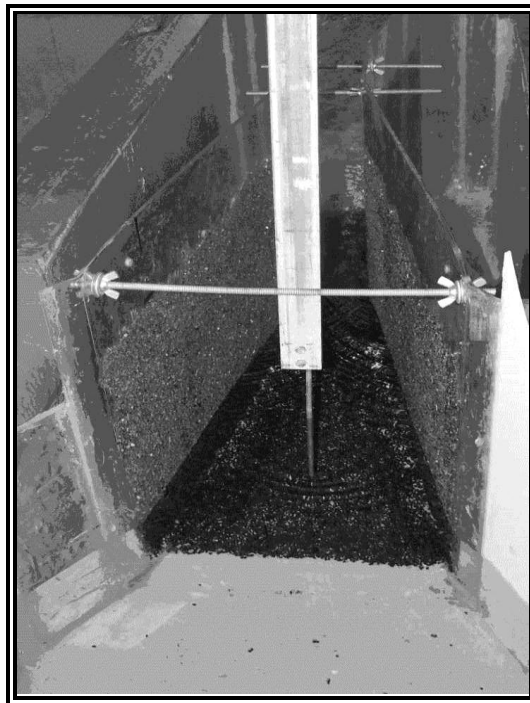


Figura 19. Aforador recubierto con arena de 5 mm.

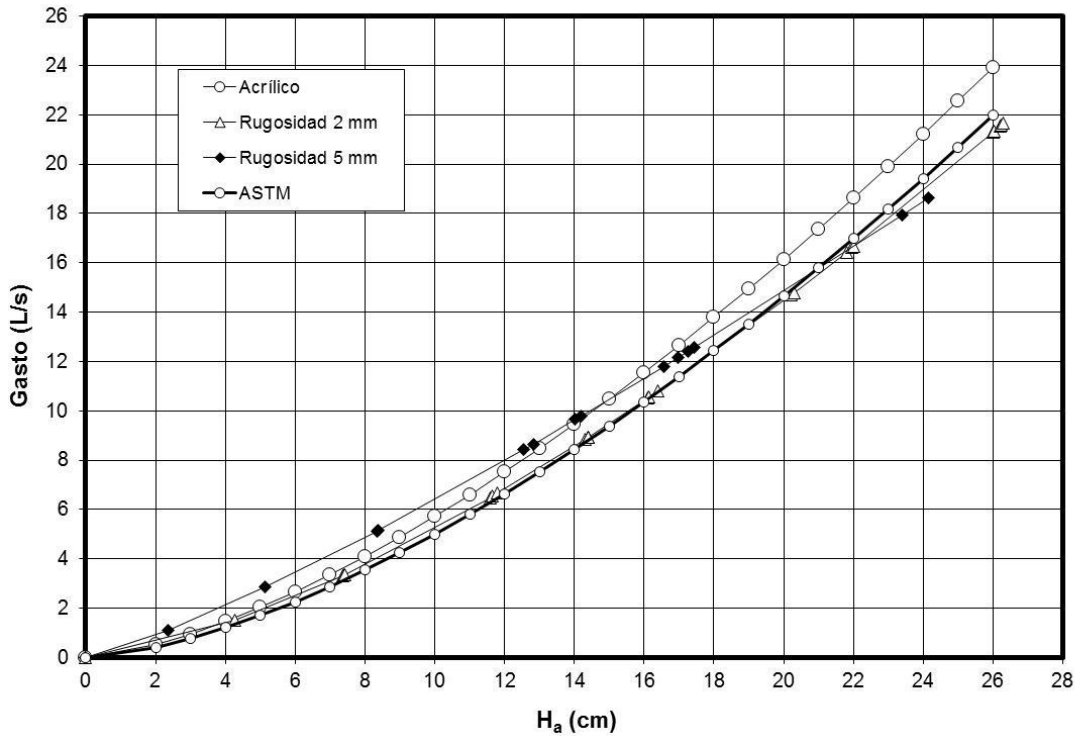


Figura 20. Resultados de la calibración del aforador para diferentes rugosidades.

Al graficar las diferencias porcentuales en la figura 21, para mayor claridad, se aprecia que la rugosidad de 2 mm no parece afectar demasiado, y el peor caso resulta efectivamente la rugosidad de 5 mm. Llama la atención que el acabado acrílico no parece ser la mejor opción. En la norma se recomienda evitar protuberancias mayores 0.4 mm, pero los resultados de la prueba realizada con rugosidad de 2 mm, valor sustancialmente mayor al máximo recomendado, indican que no es tan importante mantener la rugosidad baja en el aforador.

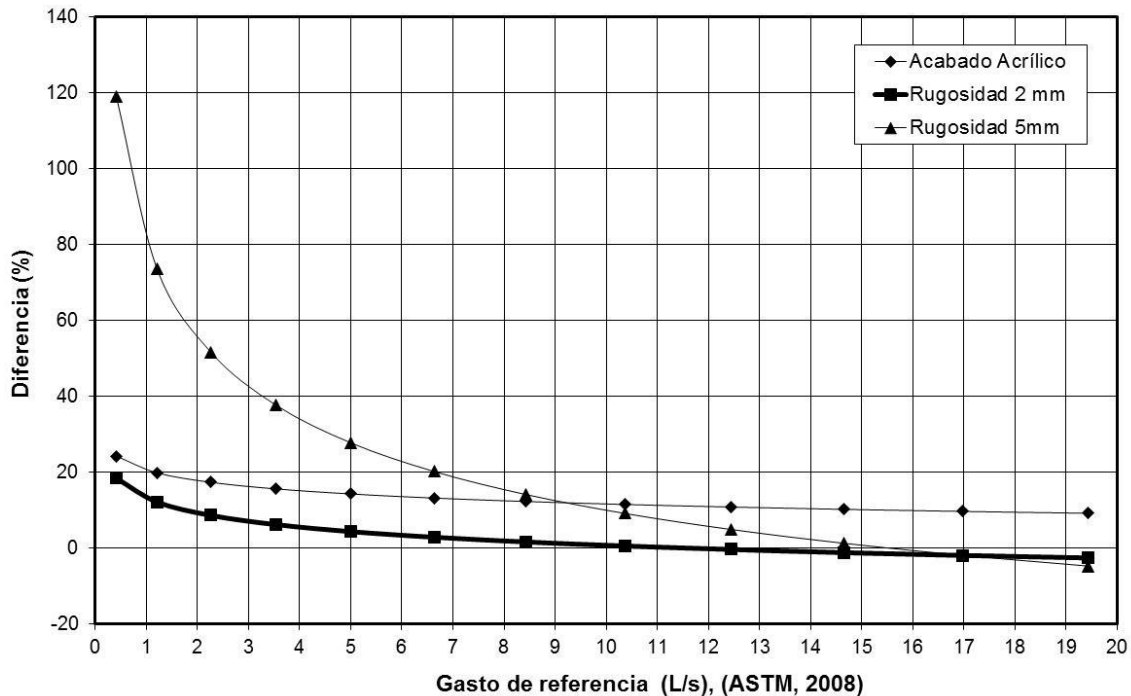


Figura 21. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes rugosidades.

2.6.5 Prueba número 3. Calibración con obstáculos aguas arriba del aforador

Para conocer el comportamiento del aforador cuando se tienen obstáculos aguas arriba del mismo, se colocaron dos elementos que perturbarían de manera diferente el flujo. El primer elemento es una pantalla formada por una placa de acrílico montada en un marco metálico y colocada al centro del canal. La pantalla cubre gran parte de la sección y permite el paso del agua únicamente por los costados (ver figuras 22 y 23). Según la recomendación de la norma ASTM, el tramo recto y sin obstáculos antes del aforador debe ser de 20 veces el ancho de la garganta, para este caso 152.4 cm. Las diferentes posiciones de la pantalla fueron 40, 80 y 160 cm aguas arriba de la entrada del aforador; ello significa que dos posiciones quedaron dentro del tramo en el que no debieran existir obstáculos (40 y 80 cm) y la tercera posición está prácticamente fuera del mismo tramo (160 cm).

Así mismo, se utilizó una especie de “desviador” consistente en varias barras o placas verticales inclinadas respecto del eje longitudinal del canal, con una cierta separación para desviar el flujo que escurre entre ellas (ver figuras 22 y 23). El desviador se colocó en las mismas posiciones que la pantalla (40, 80 y 160 cm).

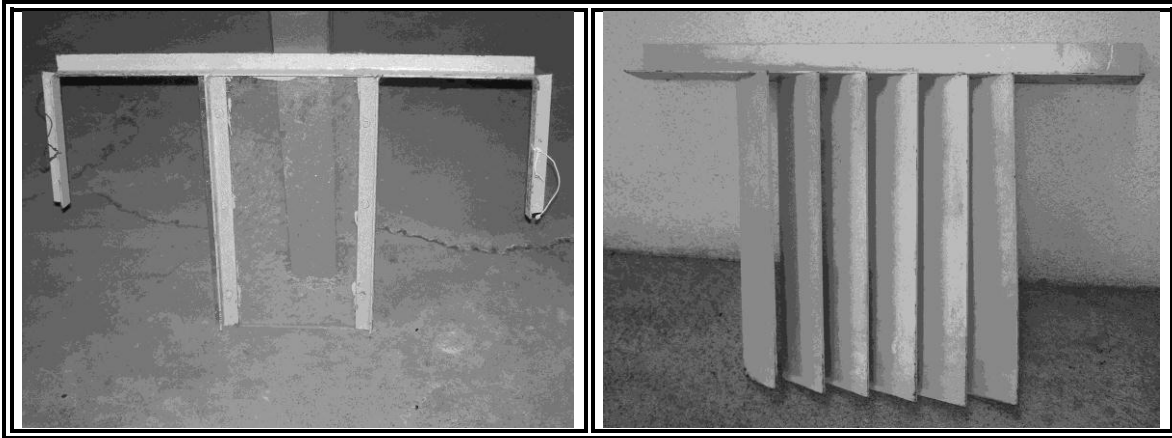


Figura 22. Pantalla y desviador utilizados en las pruebas.

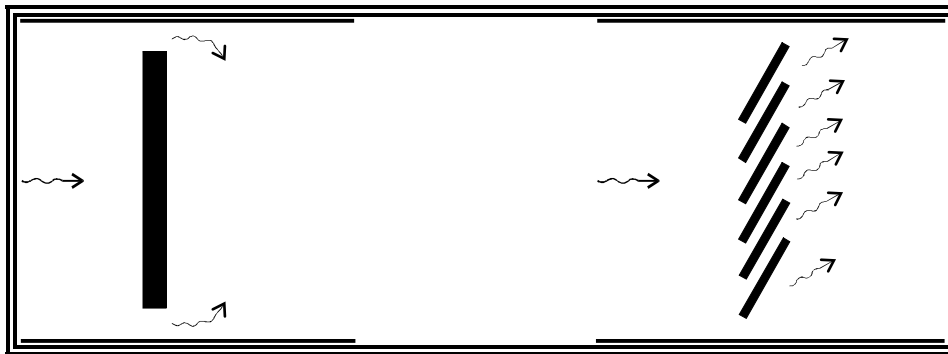


Figura 23. Vista en planta de la perturbación en el flujo por efecto de la pantalla y el desviador.

Las curvas de calibración para las diferentes ubicaciones de la pantalla se pueden ver en la figura 24; y las diferencias porcentuales se grafican en la figura 25. Especial atención merece el hecho evidente de la menor influencia que tiene la pantalla cuando está cerca del aforador, contrariamente a lo que se esperaría.

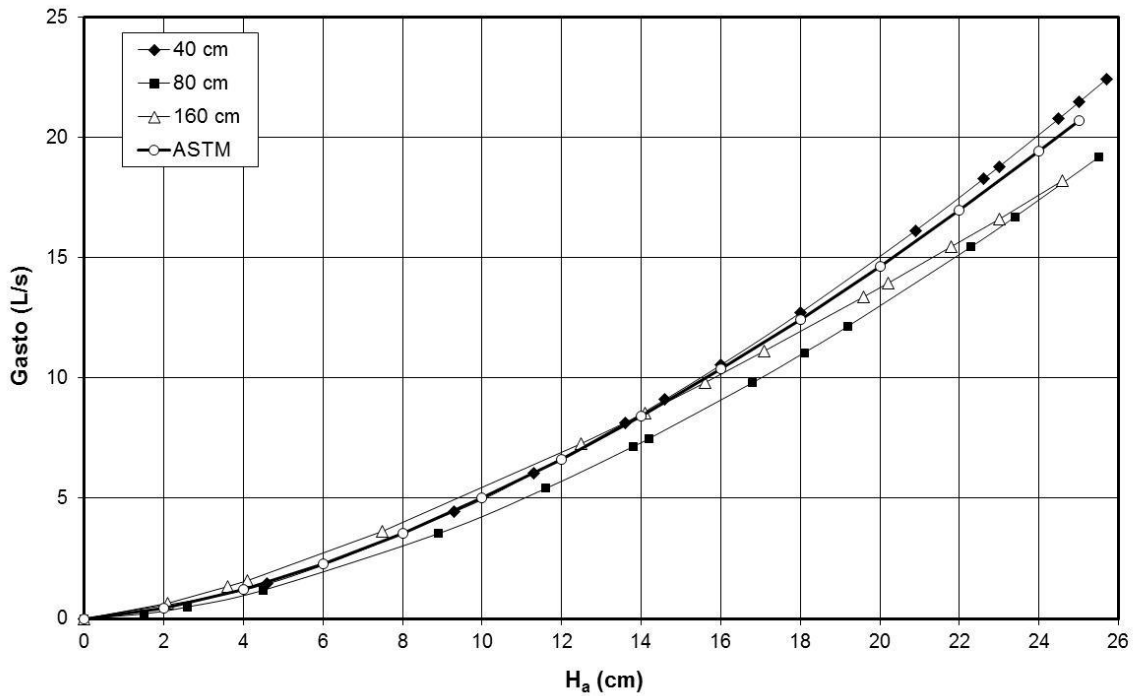


Figura 24. Resultados de la calibración del aforador para diferentes ubicaciones de la pantalla.

En el caso del desviador se encontraron las curvas de calibración que se muestran en la figura 26.

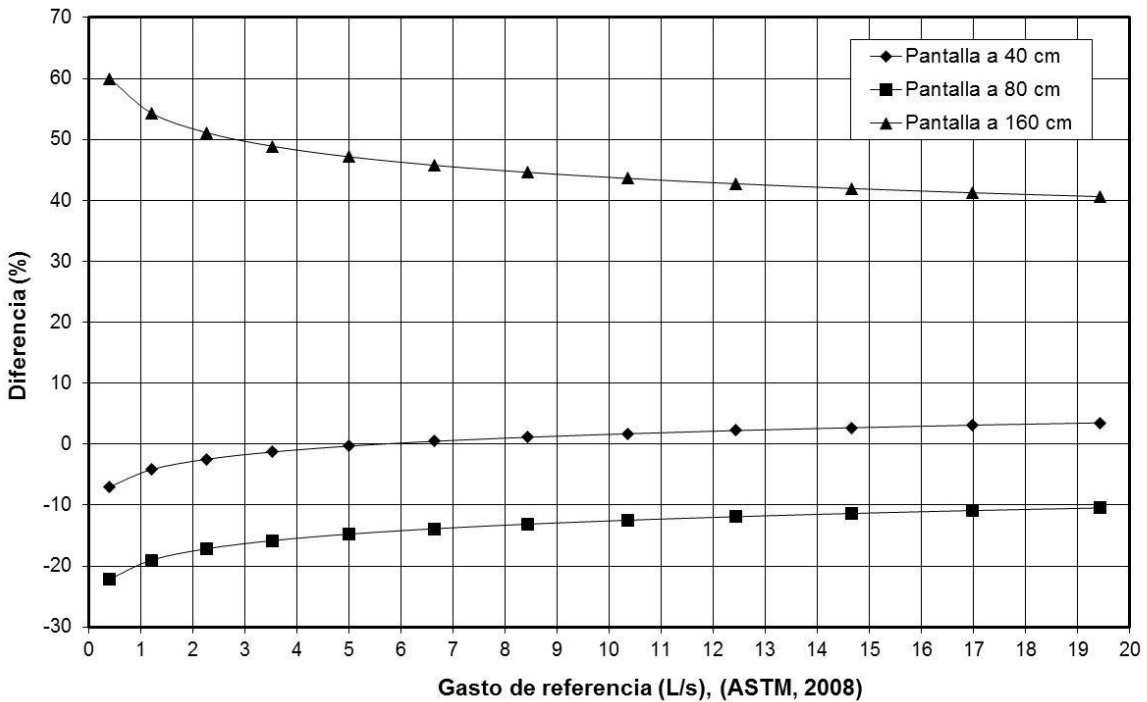


Figura 25. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes ubicaciones de la pantalla.

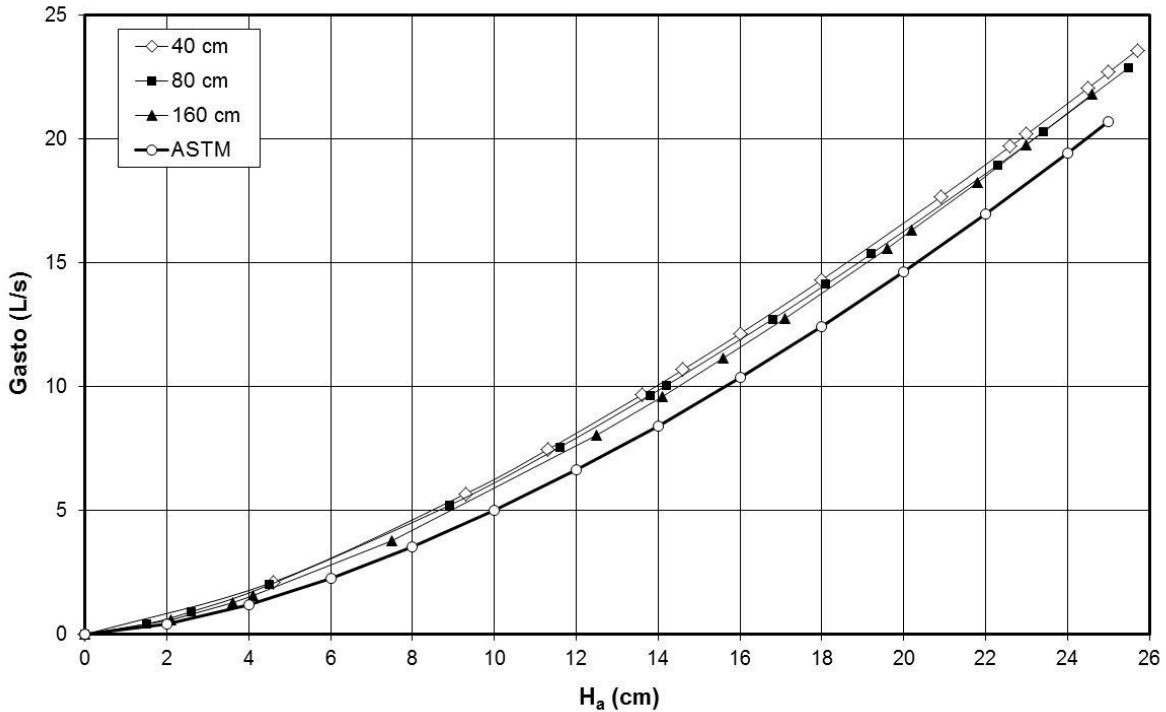


Figura 26. Resultados de la calibración del aforador para diferentes ubicaciones del desviador.

La comparación porcentual presentada en la figura 27 muestra que todas las líneas para el caso del desviador tienen un mismo patrón y se desarrollan en una zona común de la gráfica, además, el desviador colocado más cerca es más perjudicial y cuando se coloca más lejos afecta menos, lo que es de esperar; por el contrario, las líneas correspondientes a la pantalla, son muy diferentes, cambian de signo entre ellas; y el caso de la pantalla a 160 cm del aforador es el que presenta mayor diferencia entre su calibración y la ecuación de la ASTM, aun cuando ya está fuera del tramo recto mínimo recomendado.

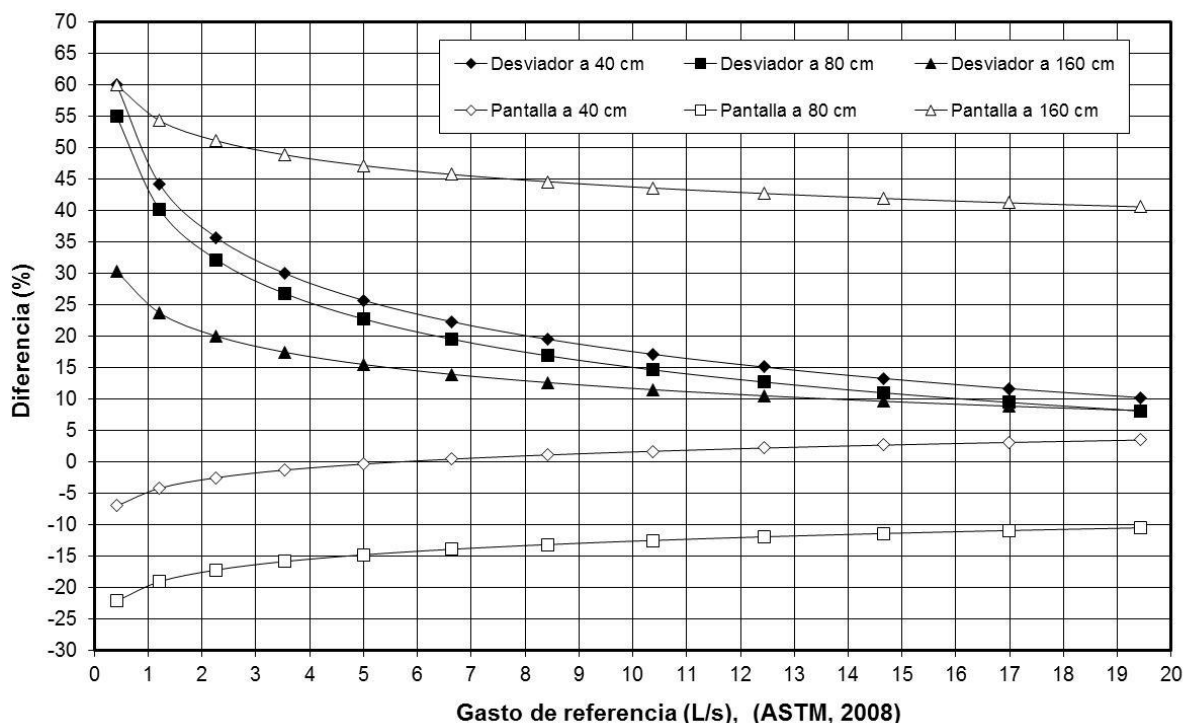


Figura 27. Diferencia respecto a la ecuación ASTM cuando se tienen obstáculos aguas arriba del aforador.

2.6.6 Conclusiones de los experimentos realizados en la Universidad Michoacana

La recomendación dada en la norma ASTM, respecto a la calibración de los aforadores Parshall después de que éstos hayan sido colocados en el sitio, parece muy atinada, ya que los resultados encontrados indican que para cada diferente situación, se tendrá una diferente ecuación de ajuste. Por otro lado, en la misma norma se indica que un medidor que cumpla con los requisitos establecidos tendrá una precisión de $\pm 5\%$; esto no parece muy acertado, ya que se ha demostrado que en algunos de los casos en los que el aforador cumple con lo indicado en la norma, la ecuación de calibración tiene grandes diferencias respecto a la ecuación recomendada. Por el contrario, en algunos casos de evidente incumplimiento de la norma, la ecuación de calibración se parece mucho a la ecuación de la norma. Tal es el caso de las calibraciones para pendientes fuertes, ya que dichas pendientes generan ecuaciones de calibración que son las más parecidas a la ecuación de la ASTM. Otro caso es la calibración del aforador con rugosidad de 2 mm, que resultó más parecida a la de la norma que la ecuación de calibración con paredes de acrílico (contrariamente a lo esperado). Similar circunstancia se encontró en el caso de la pantalla como obstáculo aguas arriba del aforador; los mejores resultados se encontraron cuando la pantalla estaba cerca del aforador y no cuando ésta estaba lejos, aún fuera del tramo recto mínimo recomendado.

Con base en lo anterior, la conclusión general más importante es que la calibración de los aforadores en sitio, es más recomendable que el cumplimiento de los

requisitos de la norma, ya que para cada situación se tendrán condiciones diferentes.

Se hace la advertencia que se calibró un aforador de 3 pulgadas, no deberá esperarse necesariamente, la misma situación para aforadores de otros tamaños. La investigación experimental es necesaria para otras dimensiones con objeto de estar en condiciones de conocer el efecto en la calibración de diferentes incumplimientos a la norma.

Por otro lado, se recomienda ampliamente que la calibración de aforadores se vea acompañada del correspondiente y adecuado análisis de incertidumbre, puesto que en algunas de las pruebas, se encontraron bajos coeficientes de correlación, lo que significa una dispersión mayor de los puntos experimentales.

3. OBJETIVO Y ACLARACIONES

Las inspecciones que el IMTA ha realizado en industrias que utilizan aforadores tipo Parshall para medir dichas descargas, han adolecido de claridad en la resolución metrológica. En aras de clarificar lo mejor posible el objetivo del trabajo presente, aunque ya se mencionaron, se enlistan de manera sucinta, las situaciones y la problemática encontradas durante tales inspecciones:

- a) En todos los casos, se revisaron los requisitos que deben cumplir los aforadores, en función de lo estipulado en las normas (ISO y ASTM). En la mayoría de ellos se encontraron incumplimientos de dichos requisitos.
- b) En algunos casos fue posible comparar los caudales contra un medidor de referencia y se encontraron diferencias en la magnitud de dichos caudales.
- c) En otros casos no fue posible colocar el medidor, por lo que no fue posible opinar sobre posibles errores de medición. En estos casos se estimó el error de medición y su incertidumbre, mediante argumentos estadísticos propuestos en las normas, pero únicamente en función de sus propias mediciones.
- d) En ninguno de los casos fue posible relacionar los incumplimientos a la norma con las diferencias de caudales o con la estimación de errores e incertidumbres.

En función de lo anterior, se realizaron experimentos en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Dichos experimentos no se enfocaron a encontrar la relación entre los incumplimientos a las normas y los errores de medición. Ello porque los posibles incumplimientos pueden ser innumerables. En lugar de esto, se calibró un aforador Parshall, bajo situación de evidentes y diversos incumplimientos a las normas. Los resultados más importantes, en dichos experimentos fueron los siguientes:

- a) Las ecuaciones de calibración resultantes no se parecen a la ecuación de la norma.
- b) En algunos casos, los incumplimientos que supondrían errores mayores, fueron los que mejores resultados arrojaron. Por ejemplo, pendientes fuertes, rugosidades en las paredes del aforador y obstáculos en la entrada del mismo.

Las recomendaciones mencionadas, en virtud de los experimentos de la Universidad Michoacana son las siguientes:

- a) Es más importante la calibración *in situ* de un aforador Parshall, que el cumplimiento de las normas.

- b) Es conveniente realizar experimentos similares en otros tamaños de aforador, para buscar similitudes, o diferencias, respecto de los resultados ya conocidos. (El aforador analizado tenía 3 pulgadas de ancho en la garganta).

3.1 Objetivo de la investigación actual

El objetivo deviene claramente de lo expuesto en lo anterior:

“Comparar la ecuaciones de calibración, contra la ecuación de las normas, de un aforador Parhall de 9 pulgadas de garganta, bajo situación de incumplimiento de requisitos estipulados en dichas normas”

Se considera pertinente la mención de las aclaraciones siguientes, mismas que bien pueden considerarse como alcances de la investigación:

Los resultados encontrados se sujetan a las características propias de las pruebas y de su entorno, es decir, sólo se consideran válidos para el ancho de garganta utilizado, para las características físicas de los canales en los que se coloca el aforador y para las condiciones de los medidores de nivel utilizados.

El medidor de referencia es un medidor electromagnético con error nominal (según el fabricante) de ± 0.5 %. Para los fines de experimentación perseguidos, se considera confiable el medidor de referencia.

4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de hidráulica “Enzo Levi” ubicado en las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Dicho laboratorio tiene una superficie bajo techo de 3,200 m² y cuenta con una gran variedad de modelos hidráulicos utilizados para fines académicos y de investigación. Para la realización del presente trabajo, se emplearon dos canales y algunas estructuras hidráulicas que a continuación se describen.

4.1 Cuarto de máquinas

El cuarto de máquinas tiene una superficie de 165 m² y al interior de éste se encuentran instaladas diez bombas verticales centrifugas con capacidad de 15 caballos de potencia, éstas tienen la función de trasladar el agua hacia un tanque elevado para posteriormente ser recirculada a una cisterna con capacidad de 1200 m³, o en su defecto, a la red de distribución. En la figura siguiente se muestra esta estructura.



Figura 28. Cuarto de máquinas.

4.2 Tanque elevado

Es una estructura de concreto con capacidad aproximada de 350 L/s y cuyo volumen de almacenamiento en forma aproximada es de 150 m³. Se encuentra a una elevación de 10 m y tiene una sección irregular. Su función es almacenar el agua para posteriormente distribuirla a una cisterna o a la línea de conducción para abastecer a los diferentes modelos según los gastos requeridos. En la figura 29 se presenta este tanque.



Figura 29. Tanque elevado.

4.3 Líneas de conducción

Del tanque elevado, se derivan tres líneas de conducción, dos de 20" de diámetro y una de 4" de diámetro. Las dos primeras cambian a 14" justo antes de entrar al laboratorio, mientras que la tubería de 4", sólo se utiliza para un modelo en particular. Las dos líneas de 14" son las que se utilizan para abastecer a los diferentes modelos, entre ellos, el aforador Parshall. Obviamente, las líneas de alimentación cuentan con accesorios hidráulicos tales como: junta dresser, "te", codos, bridas, medidores de flujo, válvula de seccionamiento y válvula de retención respectivamente. En la figura 30 se aprecia la línea de alimentación con algunos accesorios hidráulicos.



Figura 30. Línea de alimentación al sistema.

4.4 Canal de pendiente constante

El canal de pendiente constante es una estructura de acero, cuya plantilla está hecha de concreto con acabado fino, las paredes son transparentes de cristal templado de 9 mm de espesor. El canal es de sección rectangular de 60 cm de ancho, 1 m de alto y 50 m de largo. Es utilizado para realizar diferentes trabajos experimentales, entre ellos, el que aquí presentamos. En la figura 31 se aprecia dicha estructura hidráulica.

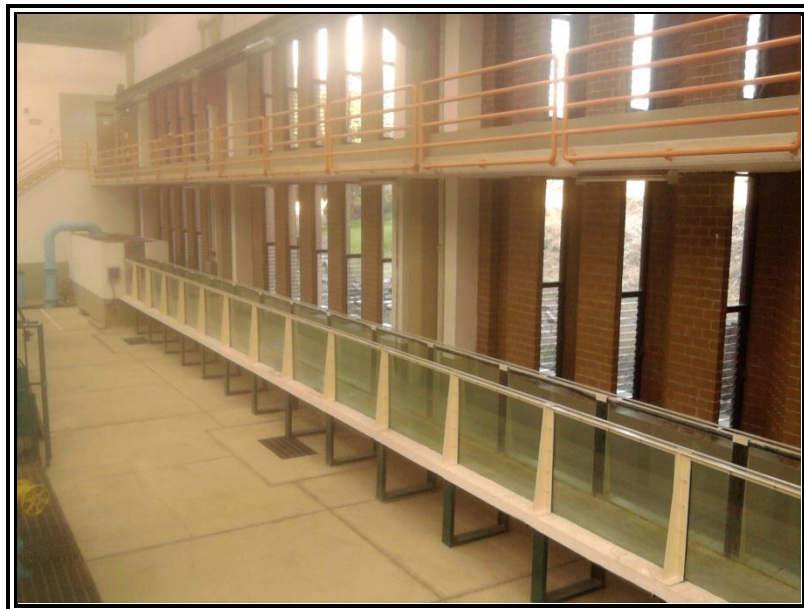


Figura 31. Canal de pendiente constante.

4.5 Canal de pendiente variable

El canal de pendiente variable es de sección rectangular de 60 cm de ancho, 70 cm de alto y 18 m de largo. Es una estructura de acero, cuya plantilla está hecha de acrílico, las paredes son transparentes de cristal templado de 9 mm de espesor. Al igual que el canal de pendiente constante, se utiliza para realizar diferentes pruebas experimentales. En la figura 32 se presenta dicha estructura.



Figura 32. Canal de pendiente variable.

4.6 Medidor electromagnético

El laboratorio de hidráulica cuenta con un medidor electromagnético (ver figura 34) marca Mag Flux, la medición hecha por éste dispositivo se utilizó como gasto de referencia durante las pruebas de laboratorio. Los medidores electromagnéticos utilizan la ley de inducción de Faraday; dicha ley se relaciona con el fenómeno de la generación de una corriente eléctrica cuando en un campo magnético se mueve un elemento conductor. Faraday descubrió este efecto tratando de invertir el fenómeno ya conocido de que al pasar una corriente eléctrica por un metal lo convertía en un imán; es decir, trató de que a partir de un campo magnético se generara electricidad.

La peculiaridad del funcionamiento de un medidor electromagnético se deriva de la misma aplicación de este tipo de motores. El motor eléctrico funciona de la manera siguiente (figura 33): se tiene primeramente un imán permanente con sus polos norte (N) y sur (S); después se coloca en medio de estos polos una barra conductora con cable enrollado a su alrededor (a este conjunto se le llama bobina), a la bobina se le adiciona otra barra a modo de eje, sobre la cual puede girar; el cable se conecta a una fuente de energía y magnetiza la barra con sus polos norte y sur. Las fuerzas magnéticas de atracción y repulsión generadas entre los polos del imán permanente y los polos del imán generado por el flujo de electricidad, hacen girar la bobina y de

esta manera se genera una rotación en el eje que puede ser aprovechado mecánicamente.

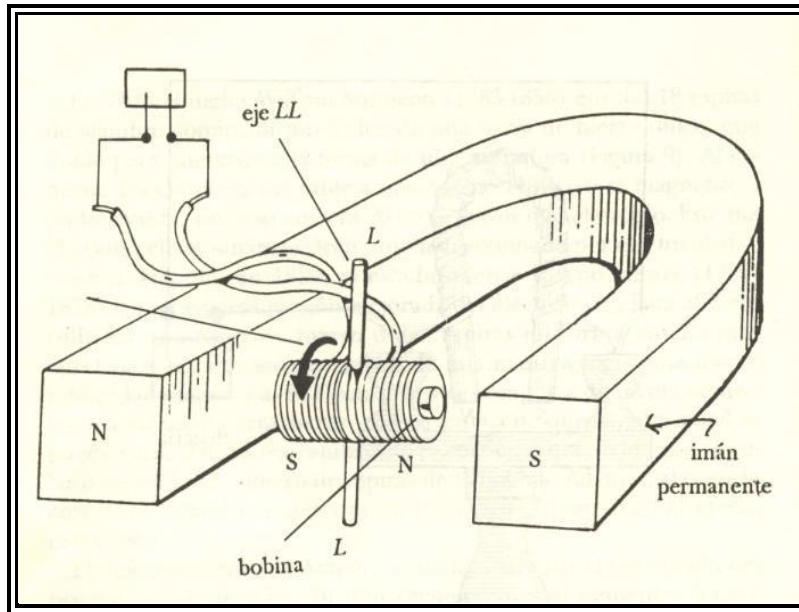


Figura 33. Principio básico del motor eléctrico.

Ahora bien, ¿qué sucede si en lugar de la fuente de energía colocamos un medidor de voltaje y hacemos girar forzosamente el eje? Se produce electricidad que puede ser medida. Precisamente este es el fenómeno específico que utiliza el medidor, el agua se mueve en un campo magnético generándose el voltaje que se registra en el voltímetro.



Figura 34. Medidor electromagnético.

5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE PRUEBA

5.1 Introducción

Para realizar el diseño del aforador Parshall, primero se seleccionó el canal donde se iban a efectuar los experimentos. Una vez hecho esto, se pudo observar el espacio disponible para el diseño y construcción del aforador. Considerando lo anterior, atendiendo a las normas mencionadas anteriormente y con apoyo en la serie autodidáctica de medición del IMTA: “Canal Parshall”, se pudo realizar el diseño del modelo a emplear durante las pruebas de laboratorio.

El material que se utilizó para la construcción del dispositivo fue madera, ya que es sencilla de adquirir, económica y fácil de manejar durante el proceso constructivo. Una vez construido el modelo, éste se colocó en un sitio del canal que garantizó un flujo lento al momento de pasar por el aforador.

5.2 Diseño del aforador Parshall

Una vez definido el canal donde se colocó el modelo y teniendo en cuenta el espacio disponible para ello, se procedió a realizar el diseño del aforador. Para determinar las dimensiones del modelo se utilizó la tabla 2, donde se aprecia que para un ancho de garganta (W) de 228.6 mm (9”), se requiere un ancho de la entrada de la sección convergente (D) de 575 mm, esto indica que es el tamaño adecuado, ya que el canal tiene un ancho de 600 mm. De igual forma, se determinaron todas las dimensiones restantes del modelo, las cuales se muestran a continuación en la tabla 9.

Tabla 9. Dimensiones de diseño del aforador Parshall

Variable	W	A	a	B	C	D	E	T	G	H	K	M	N	P	R	X	Y
Longitud (mm)	228.6	879	587	864	381	575	762	305	457	0	76	305	114	1080	406	51	76

En las figuras 35 y 36, se presenta el diseño del aforador Parshall, donde se aprecia una vista en planta y otra en perfil respectivamente. Las dimensiones están expresadas en metros.

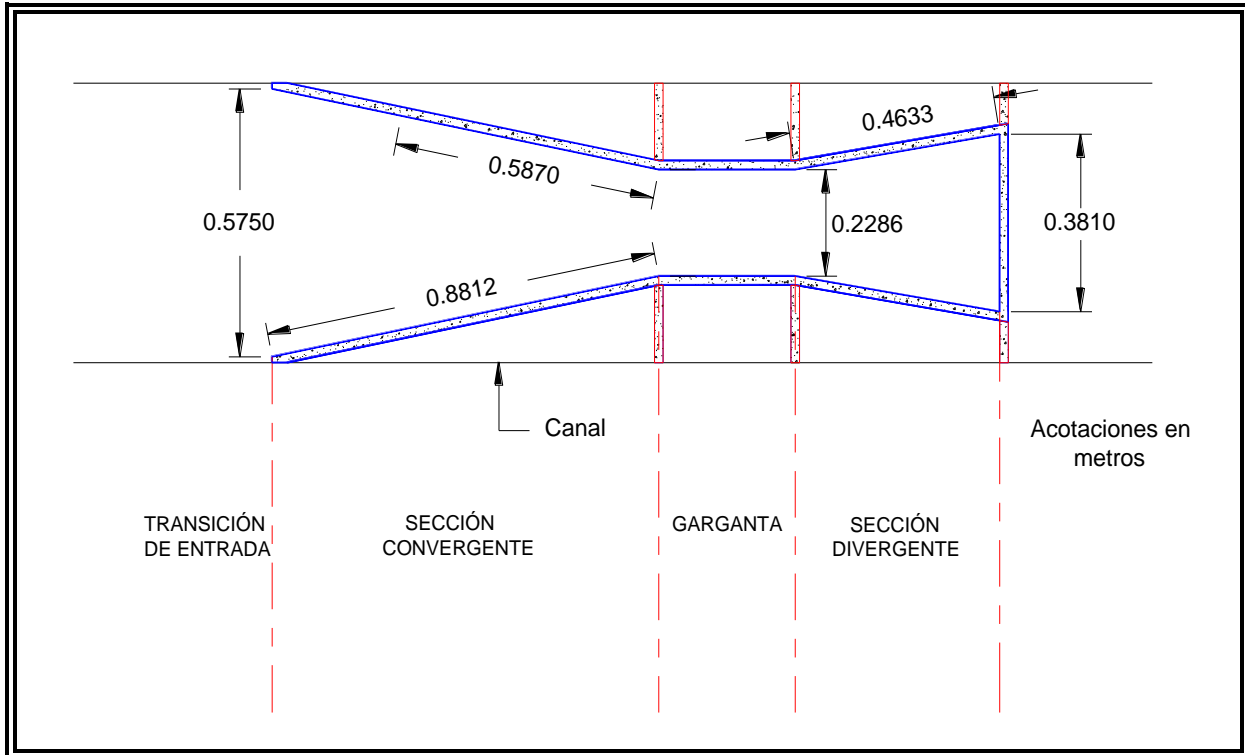


Figura 35. Diseño del aforador Parshall, vista en planta.

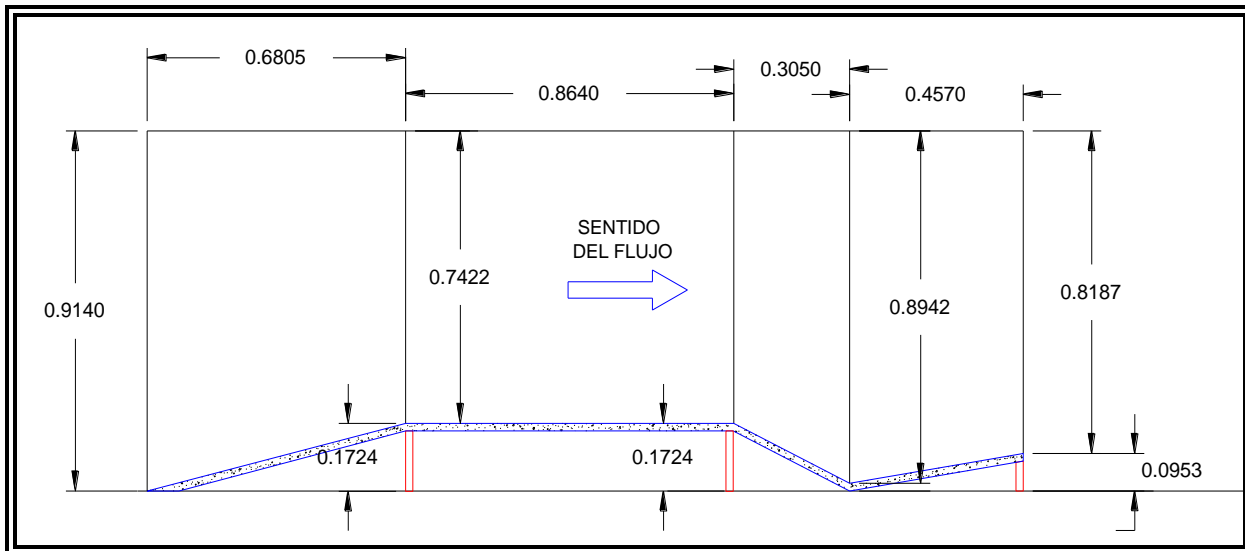


Figura 36. Diseño del aforador Parshall, vista de perfil.

5.3 Construcción del aforador Parshall

Como ya se mencionó, el aforador Parshall se construyó de madera, debido a que es de fácil manejo durante el proceso de construcción, a continuación se mencionan los materiales empleados, las herramientas utilizadas y los pasos para la construcción del dispositivo de pruebas.

Materiales empleados:

- 3 hojas de triplay de 1.22 m de ancho, 2.44 m de largo y 19 mm de espesor.
- 6 latas de Nitrocelulosa (sellador) para madera de un litro.
- 3 latas de barniz de un litro.
- 1 lata de pasta (resanador) para eliminar porosidades en la madera de 1 kg.
- 1 botella de resistol blanco para madera de un litro.
- 10 hojas de lijas de diferentes granos.
- 50 pijas para madera de 2" de largo.
- 8 ménsulas de aluminio.
- 18 barras de plastilina.
- 16 tubos de silicón de 300 ml.
- Un rollo de mica adherible de 1 m de ancho por 18 m de largo.
- 4 tornillos de 3/16" de diámetro por 1.5" de largo.
- 1 codo de cobre de 90° de 3/8" de diámetro.
- 1 m de manguera transparente de 3/8" de diámetro.
- 2 abrazaderas sin fin de 1/2".
- 1 lámina de acrílico de 0.50 m de largo por 0.30 m de ancho por 6 mm de espesor.
- 20 pijas de 3/8" de diámetro por 1.5" de largo.
- 5 kg de arena de 2 mm de diámetro.
- 2 brocas de 1/8" de diámetro.

- 2 brocas de 3/16" de diámetro.
- 2 brocas de 1/4" de diámetro.
- 6 m de piola.

- Cinta adhesiva.

Máquinas y herramientas eléctricas:

Máquinas:

- ✓ Sierra eléctrica.
- ✓ Canteadora.
- ✓ Taladro.

Herramientas eléctricas de mano:

- Taladro.
- Sierra caladora.
- Lijado.
- Router.

Herramientas manuales:

- Martillo.
- Arco con segueta.
- Serrote.
- Flexómetro.
- Escuadra.
- Brochas.
- Desarmador de cruz y plano.
- Nivel de gota.
- Mazo de goma.
- Formón.
- Lápiz.
- Cepillo de madera.

Pasos para la construcción del aforador:

- 1) Se cortaron las piezas correspondientes a la plantilla.
- 2) Se cortaron las piezas de las paredes laterales.
- 3) Se lijaron todas las piezas.
- 4) Se ensamblaron las piezas de la plantilla y de las paredes laterales para así formar el aforador.

- 5) Se resanaron todas las rendijas producidas por la unión de las piezas.
- 6) Se aplicaron varias manos de sellador tipo nitrocelulosa.
- 7) Concluido lo anterior, se barnizó todo el dispositivo para darle protección contra el agua.
- 8) Se realizó el ensamble del limnómetro y del pozo de lectura.
- 9) Se montó el dispositivo en el canal de pendiente constante.
- 10) Se ancló el aforador al canal de llegada para evitar que tuviera movimiento durante las pruebas.
- 11) Se colocó plastilina en los extremos donde se une el modelo con el canal para evitar que el agua ingrese al dispositivo y así provocar una mala lectura del tirante.
- 12) Terminado lo anterior, se procedió a dar inicio con las pruebas.

En las siguientes figuras se aprecia el proceso constructivo del Aforador.



Figura 37. Hoja de triplay empleada para la construcción del dispositivo.



Figura 38. Trazo de piezas del aforador.

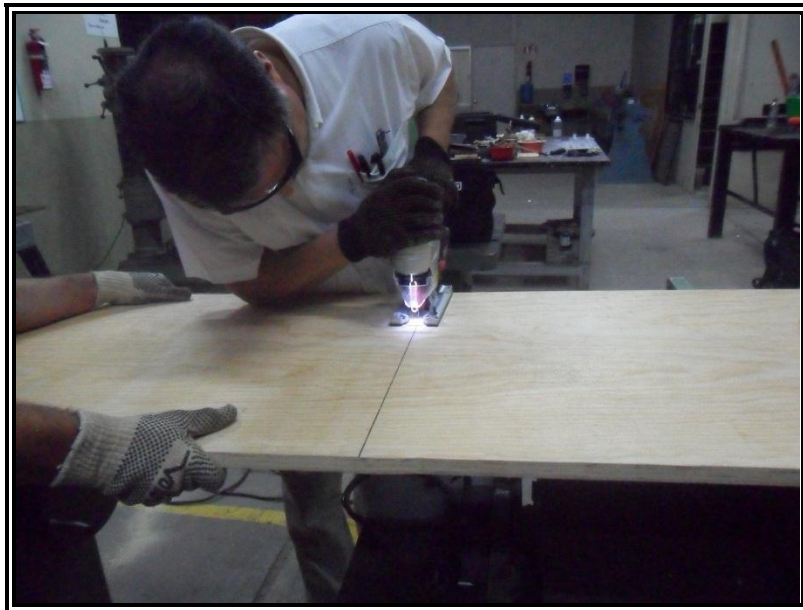


Figura 39. Corte de piezas del modelo.



Figura 40. Ajuste de acabado con cepillo de madera.



Figura 41. Ensamble de piezas del modelo de pruebas.



Figura 42. Colocación de un limnómetro a la entrada del Parshall.



Figura 43. Colocación de un pozo de lectura en la pared lateral del dispositivo.



Figura 44. Montaje del aforador Parshall al canal de pendiente constante.

Como se aprecia en las figuras anteriores, en el modelo se colocaron dos limnímetros; uno ubicado a la entrada del Parshall y el otro en la garganta. También se instaló un pozo de lectura. Lo anterior nos permitirá hacer tres mediciones del tirante que se presenta para cada prueba y seleccionar el valor que nos arroje una mejor precisión en el aforador, teniendo como gasto de referencia el que se presenta en el medidor electromagnético.

6. DISEÑO EXPERIMENTAL

El propósito de este trabajo, fue observar qué sucede con la precisión en la medición del aforador Parshall si no cumple con las recomendaciones hechas por la norma ISO 9836 y la norma de la ASTM. Para ello, primero se efectuó una prueba atendiendo a las recomendaciones hechas por la normatividad. Después, se realizaron cuatro diferentes tipos de pruebas que no acatan las normas citadas anteriormente: 1) alterando la rugosidad del aforador, 2) colocando un obstáculo o pantalla aguas arriba del dispositivo a diferentes distancias, 3) colocando un desviador de flujo aguas arriba a diferentes distancias, y 4) cambiando la pendiente del canal.

6.1 Descripción de las pruebas

Con base en los trabajos hechos por parte de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, se realizó cada una de las pruebas como a continuación se describe.

6.1.1 Condiciones normales de acuerdo a la normatividad

La primera prueba se hizo atendiendo a las normas descritas anteriormente. Durante esta prueba, se utilizó el canal de pendiente constante, el acabado de la superficie del aforador fue lisa, la pendiente nula, las paredes verticales y el flujo aguas arriba del dispositivo fue subcrítico. El objetivo de esta prueba fue observar la precisión con la que mide el Parshall trabajando con base en las recomendaciones de la normas, para posteriormente comparar estos resultados con las pruebas en las que no se acata dicha normatividad. De igual forma, se determinó el rango de caudales que se pueden transportar por el dispositivo sin que haya derrames, o gastos muy pequeños que imposibiliten la medición.

6.1.2 Diferentes rugosidades

La norma establece que el acabado de la superficie del aforador deber ser totalmente lisa. El objetivo de esta prueba fue ver qué sucede si la superficie del Parshall no es lisa y presenta ciertas rugosidades, todo esto con la finalidad de observar que sucede con la medición, es decir, si se ve afectada o no. Para esta prueba se manejaron tres rugosidades diferentes de arena en la superficie de contacto del agua con el modelo: de 2, 4 y 6 mm de diámetro respectivamente.

6.1.3 Colocando una pantalla u obstáculo aguas arriba del aforador

La norma indica que se deben evitar obstrucciones en el canal de llegada para obtener mejores mediciones. Esta prueba se llevó acabo con el objetivo de observar qué sucede con la medición en el Parshall si se coloca un obstáculo aguas arriba del mismo. Éste obstáculo o pantalla se ubicó en cuatro posiciones diferentes con la finalidad de observar en cuál posición afecta más la medición en el aforador. Las

posiciones de la pantalla antes de la entrada al modelo son: 0.75 m, 1.53 m, 2.29 m y 3.00 m. La pantalla mide 0.30 m de ancho, 1.00 m de alto y 19 mm de espesor.

6.1.4 Colocando un desviador aguas arriba del Parshall

Para la realización de esta prueba, se construyó un desviador de flujo tipo peine el cual está constituido por cuatro trozos de madera de 0.20 m de ancho, 1.00 m de alto y 19 mm de espesor, éstos elementos están unidos a una base metálica con una separación de 8 cm entre cada uno, y un ángulo con la horizontal de 45° , todos paralelos entre sí. El objetivo de esta prueba fue observar que ocurre con la medición en el modelo si se coloca un desviador de flujo aguas arriba del mismo. Éste se colocó a cuatro diferentes posiciones antes de la entrada al Parshall. Las posiciones del desviador del flujo antes de la entrada al dispositivo son: 0.75 m, 1.53 m, 2.29 m y 3.00 m.

Para la realización de las pruebas anteriores se utilizó el canal de pendiente constante y el Parshall se colocó a una distancia aguas arriba del canal de 40.50 m.

6.1.5 Diferentes pendientes en el Parshall

Estas pruebas se realizaron en el canal de pendiente variable. La finalidad fue observar qué sucede con la precisión en el Parshall si se altera la pendiente de la plantilla del canal donde se colocó el modelo. En total se hicieron cinco pruebas, cada una de estas con una pendiente diferente. Las pendientes que se manejaron son las siguientes: $S=-0.0060$, $S=0$, $S=0.0003$, $S=0.0102$ y $S=0.0192$ respectivamente.

6.2 Procedimiento para la realización de cada prueba

En forma general, para cada una de las pruebas hechas en el laboratorio, se siguió el procedimiento que a continuación se describe:

- 1) Se accionó el interruptor general y se prendieron las bombas que se van a necesitar para suministrar el gasto requerido, dicho interruptor está ubicado en la caseta de control del bombas (ver figura 45).
- 2) Se esperó a que el nivel del tanque elevado llegara al nivel de agua deseado para poder suministrar a la red de distribución.
- 3) Se abrieron las válvulas ubicadas en las líneas de alimentación al sistema para un caudal determinado (ver figura 46).
- 4) Se esperó cinco minutos a que el caudal se estabilizara.
- 5) Se midieron los tirantes en los limnómetro ubicados a la entrada del dispositivo y en la garganta del mismo. De igual forma, se midió el tirante ubicado en el pozo de lectura (ver figura 47).

- 6) Se registraron 10 caudales del medidor electromagnético para posteriormente obtener un promedio de estas mediciones (ver figura 48).
- 7) Se repitieron los pasos del 3 al 6 para veinte gastos diferentes y así concluir cada prueba.



Figura 45. Caseta de control de bombas.



Figura 46. Abertura de válvulas para alimentar al sistema.

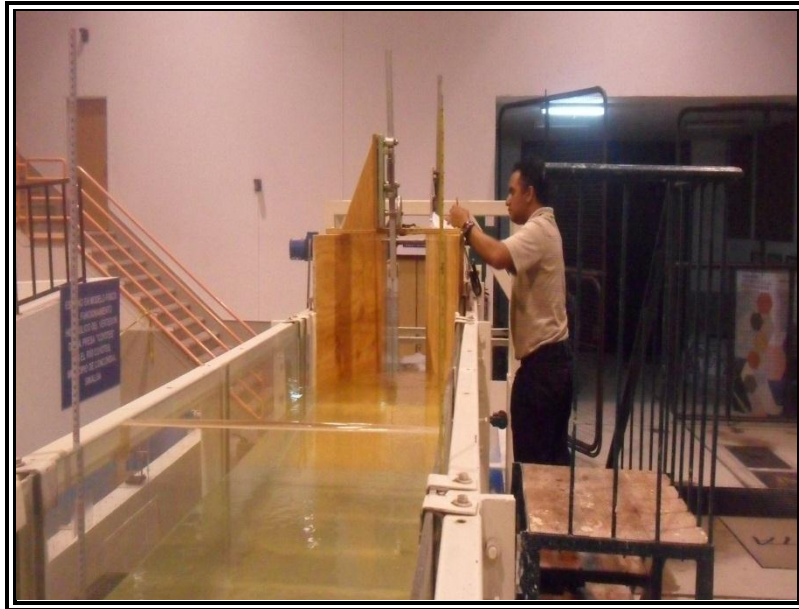


Figura 47. Lectura de los tirantes en el aforador.





Figura 48. Registro de gastos del medidor electromagnético.

6.3 Recopilación de datos en el laboratorio

Para la recopilación de datos durante las pruebas experimentales, se utilizó el formato mostrado en la tabla 10, donde se aprecia que para cada una de las pruebas se midieron los tirantes en el aforador y como referencia, los gastos registrados en el medidor electromagnético.

Tabla 10. Recopilación de datos en el laboratorio

Universidad Nacional Autónoma de México				
				
Maestría en Ingeniería Hidráulica				
Pruebas de laboratorio			Fecha:	
Tipo de prueba:				
Niveles de Referencia			Ubicación	
NH1 =		mm	Al inicio del Aforador	
NH2 =		mm	Pozo de lectura	
n	H1 (mm)	H2 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Como se aprecia en la tabla anterior, para cada prueba se midieron tres tirantes en el modelo, el primero a la entrada del Parshall, el segundo en la garganta y el tercero corresponde al pozo de lectura (ver figura 49). Esto para observar cuál de los tres nos arrojaba una mejor medición al calcular el gasto y compararlo con el caudal de referencia. En las figuras siguientes se aprecia la ubicación de los limnímetros y del pozo de lectura.

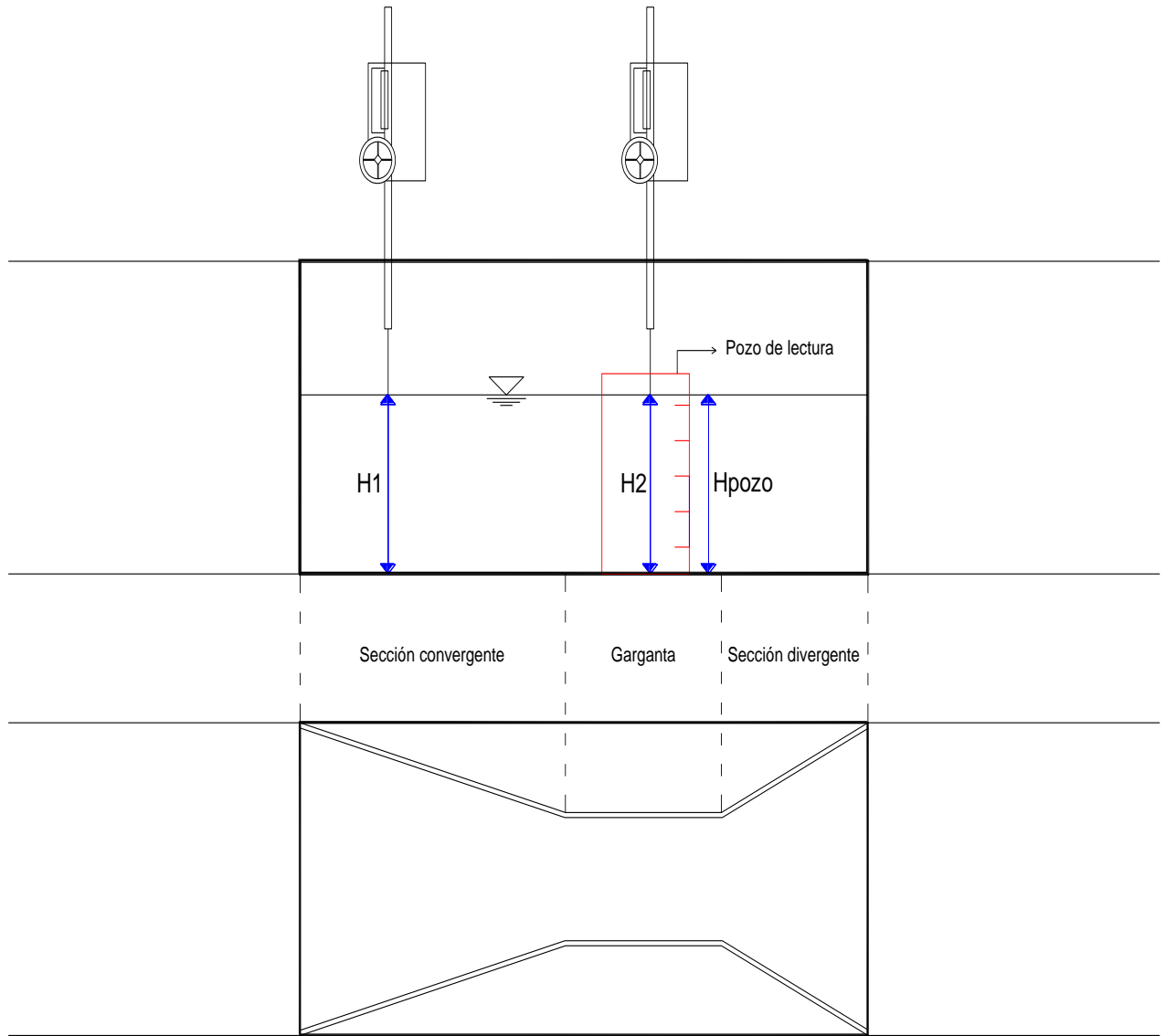


Figura 49. Esquema para la ubicación en planta y perfil de los tirantes en el aforador Parshall.

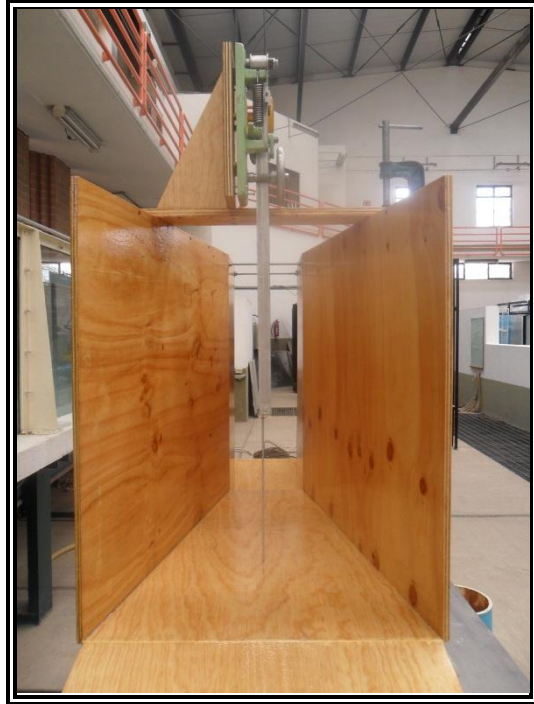


Figura 50. Limnómetro ubicado a la entrada al aforador.



Figura 51. Limnómetro ubicado en la garganta del Parshall.



Figura 52. Pozo de lectura ubicado en la garganta del aforador.

6.4 Hojas de cálculo utilizadas para procesar los datos

Una vez terminadas las pruebas experimentales, se procesó la información obtenida en el laboratorio, para ello se hicieron hojas de cálculo en el programa de Excel. Estas hojas nos permiten calcular el gasto que pasa por el aforador Parshall, gastos promedios que se presentaron en el medidor electromagnético y posteriormente calcular la diferencia porcentual entre éstos, teniendo como gasto de referencia el caudal registrado en el medidor electromagnético. También se obtuvo la ecuación de ajuste para cada una de las pruebas realizadas.

A continuación se muestra la tabla 11 utilizada para calcular los caudales en el Parshall y sus diferencias porcentuales respecto al medidor electromagnético.

Tabla 11. Resumen de resultados

n (A)	H1 (mm) (B)	H2 (mm) (C)	H _{pozo} (mm) (D)	Q _{electro} (L/s) (E)	Q _{parshall} (L/s) (F)			Diferencias (%) (G)		
					H1 (F1)	H2 (F2)	H _{pozo} (F3)	H1 (G1)	H2 (G2)	H _{pozo} (G3)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

En la columna A se aprecia el número de lectura, en la columna B el tirante medido en el limnómetro ubicado a la entrada del Parshall, en la columna C el tirante medido en el limnómetro ubicado en la garganta del modelo, en la columna "D" el tirante medido en el pozo de lectura, en la columna E el gasto promedio en el medidor electromagnético, en la columna F1, F2 y F3 el caudal calculado en el Parshall para cada tirante y en la columna G1, G2 y G3 las diferencias porcentuales de los gastos anteriores respecto al caudal de referencia. Para calcular el gasto en el Parshall se utilizó la ecuación 1 vista en el capítulo dos que a continuación se presenta, las variables ya fueron definidas:

$$Q = CH_a^n$$

Para calcular las diferencias porcentuales se empleó la siguiente expresión matemática:

$$\frac{Q_{electro} - Q_{parshall}}{Q_{electro}} * 100$$

Donde:

$Q_{electro}$, caudal registrado en el medidor electromagnético (L/s).

$Q_{parshall}$, caudal calculado en el aforador Parshall (L/s).

La figura que se muestra a continuación se utilizó para representar la variación de los gastos entre el caudal registrado en el medidor electromagnético, el gasto calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el caudal obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

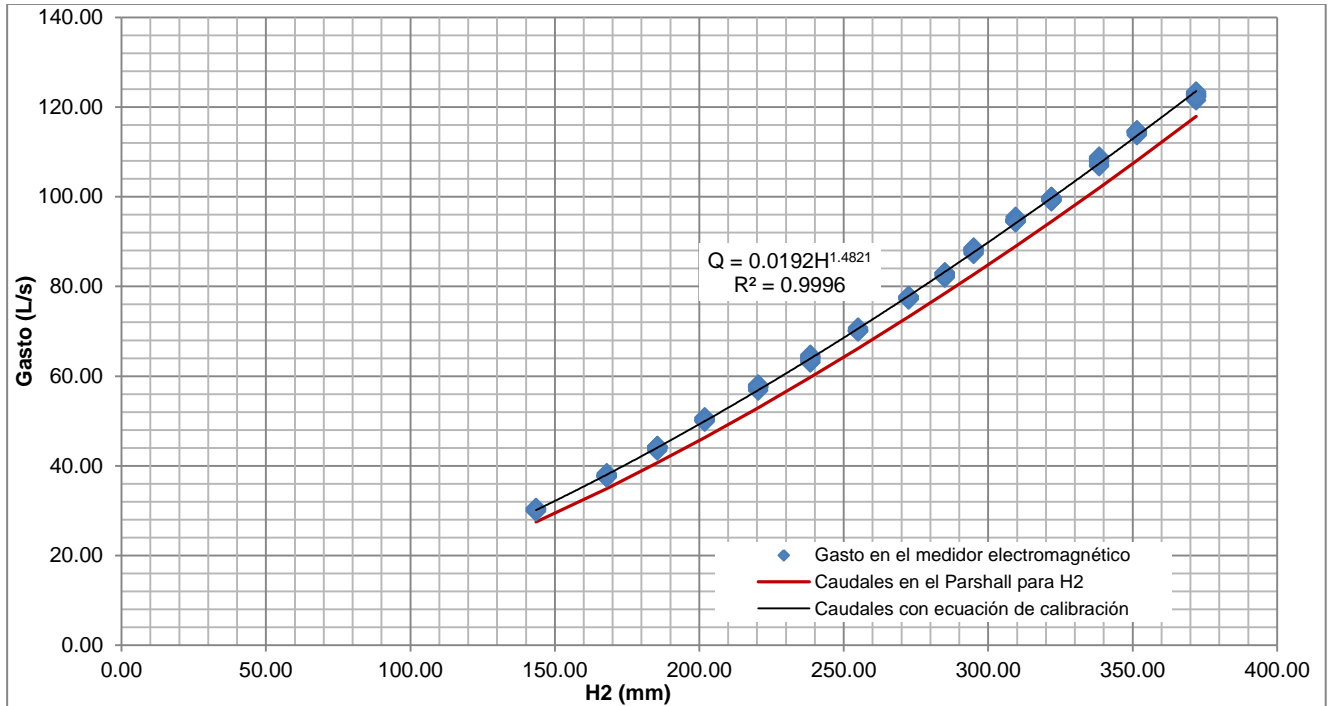


Figura 53. Ejemplo para representar gráficamente la variación de los gastos.

Finalmente, la figura 54 se utilizó para graficar las diferencias porcentuales para cada tipo de prueba respecto al gasto calculado con la ecuación de la ASTM.

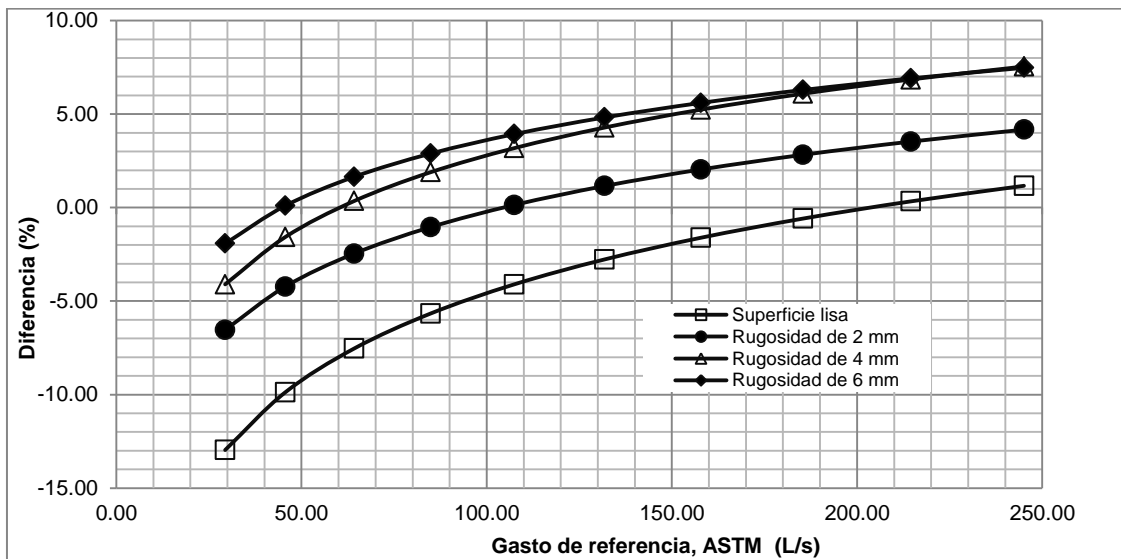


Figura 54. Ejemplo para representar las diferencias respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes pruebas.

7. ADECUACIÓN DEL MODELO PARA CADA UNA DE LAS PRUEBAS

Para cada una de las pruebas que se realizaron en el laboratorio, fue necesario adecuar el aforador Parshall a las condiciones que demanda cada experimento. Por ejemplo, para la prueba con diferentes rugosidades, se pegaron a la plantilla y a las paredes del modelo arena de 2 mm, 4 mm y 6 mm de diámetro respectivamente. Para el obstáculo y el desviador de flujo, se construyeron ambas estructuras y se colocaron aguas arriba de la entrada al aforador. Finalmente, para la prueba con diferentes pendientes, se ajustó el canal de pendiente variable a la inclinación deseada. A continuación se describe el proceso constructivo para la adecuación del modelo en cada una de las pruebas.

7.1 Prueba en condiciones normales de operación

Esta prueba se realizó con base en las recomendaciones hechas en las normas mencionadas anteriormente, por lo que no fue necesario realizar ninguna adecuación del Aforador para la ejecución de esta prueba.

7.2 Pruebas con diferentes rugosidades

La finalidad de esta prueba fue alterar la rugosidad del aforador a través de la colocación de partículas de arena en la plantilla y en las paredes del Parshall. El proceso constructivo para cambiar la rugosidad del modelo fue el siguiente:

- Se tamizó la arena al diámetro de partícula deseado.
- Se cortaron micas de acuerdo a las dimensiones del modelo, tanto para la plantilla como para las paredes del dispositivo.
- Se pegaron con silicón las partículas de arena a la mica.
- Se sellaron con plastilina todas las aberturas entre el modelo y el canal.
- Finalmente se pegaron estas micas al Aforador, obteniéndose la rugosidad deseada.

En la figura 55 se observa como quedó el aforador al colocarle una rugosidad de arena de 2 mm de diámetro característico.



Figura 55. Rugosidad con arena de 2 mm de diámetro.

Para los diámetros de 4 mm y 6 mm se hizo lo mismo, pero a la hora de llevar a cabo las pruebas, las partículas de arena se desprendían, esto debido a la velocidad del flujo que era considerable y al peso mismo de los granos de arena. Por tal motivo, se optó por cambiar las partículas de arena por bolas de silicón, estas son menos pesadas y se pegan de una forma más sólida a las micas. El proceso constructivo para unir las bolas de silicón al aforador es el mismo que se realizó para las arenas. En la figura 56 y 57 se aprecia la rugosidad del modelo para estos dos tamaños de partícula.



Figura 56. Rugosidad hecha con silicón de 4 mm de diámetro.



Figura 57. Rugosidad hecha con silicón de 6 mm de diámetro.

7.3 Pruebas con una pantalla aguas arriba del dispositivo

El objetivo de esta prueba fue alterar el flujo aguas arriba de la entrada al Parshall para posteriormente observar si se ve afectada la precisión en la medición del aforador. Para ello, se colocó una pantalla la cuál se construyó de la siguiente manera:

- Se cortó un trozo de triplay de 0.30 m de ancho, 1.00 m de alto y 19 mm de espesor.
- Se lijó la pieza.
- Se aplicaron varias manos de sellador tipo nitrocelulosa.
- Se barnizó la pantalla para darle protección contra el agua.
- Se colocó una barra metálica en la parte superior de la pantalla para poderla anclar al canal y evitar que se mueva durante las pruebas.

En la figura 58 se observa la pantalla utilizada para el desarrollo de estas pruebas.

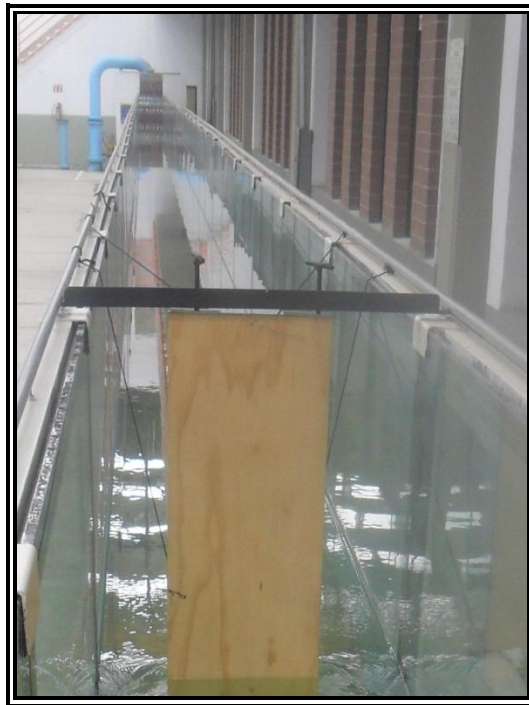


Figura 58. Pantalla utilizada durante las pruebas experimentales.

7.4 Pruebas con un desviador de flujo aguas arriba del aforador

Durante esta prueba se alteró el flujo aguas arriba de la entrada al aforador. Para ello, se construyó un desviador de flujo tipo peine. El proceso constructivo para esta estructura es el siguiente:

- Se cortaron cuatro trozos de triplay de 0.20 m de ancho, 1.00 m de alto y 19 mm de espesor.
- Se lijó cada una de las piezas.
- Se aplicaron varias manos de sellador tipo nitrocelulosa a cada pieza.
- Se barnizó cada pieza para darle protección contra el agua.
- Se unieron los cuatro trozos de madera a una base metálica con una separación de 8 cm entre cada uno, y un ángulo con la horizontal de 45° , todos paralelos entre sí.
- Se ancló esta estructura al canal para realizar cada una de las pruebas.

En la figura 59 se presenta el desviador de flujo utilizado para la realización de estas pruebas.

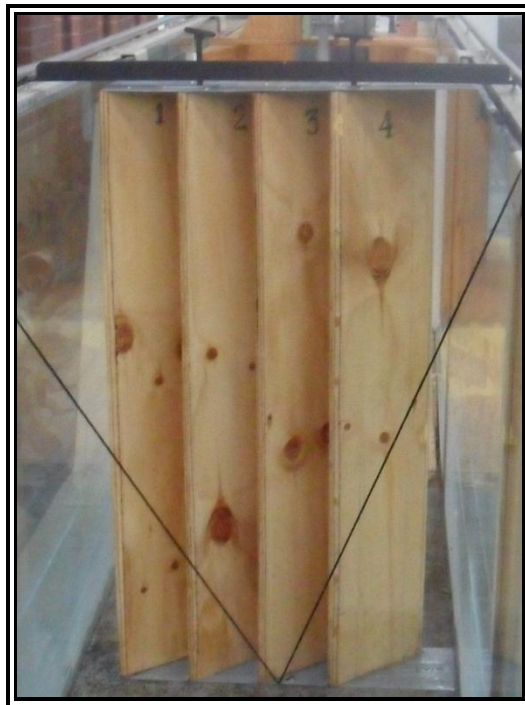


Figura 59. Desviador de flujo utilizado durante las pruebas experimentales.

7.5 Pruebas con diferentes pendientes en el Parshall

Para esta prueba, el aforador Parshall se trasladó al canal de pendiente variable. No fue necesario hacerle ninguna adecuación al modelo, sólo se fue cambiando la pendiente del canal para cada una de las pruebas que se realizaron. La pendiente del canal para cada prueba se ajustó con los mecanismos presentados en la figura 60.



Figura 60. Mecanismos para ajustar la pendiente del canal.

En la figura siguiente se muestra el canal de pendiente variable donde se llevaron a cabo cada una de las pruebas con diferentes pendientes.



Figura 61. Canal de pendiente variable utilizado para las pruebas.

8. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Concluidas las pruebas en el laboratorio y con base en el diseño experimental descrito en el capítulo 6, se obtuvieron los resultados para cada una de las pruebas realizadas. El procedimiento para la ejecución de cada prueba esta descrito en el subtema 6.2. Los resultados del trabajo experimental se presentan a continuación.

8.1 Medición de tirantes

Durante el desarrollo de las pruebas experimentales, se midieron tres tirantes hidráulicos en cada una de las pruebas. El primer tirante (H1), se localiza en la entrada al aforador, donde inicia la sección convergente y se midió con ayuda de un limnómetro allí instalado. El segundo tirante (H2), está ubicado en la garganta del modelo y de igual forma se midió con otro limnómetro allí colocado. Finalmente, el tercer tirante (H_{pozo}), corresponde al tirante registrado en el pozo de lectura, este se midió con ayuda de una escala graduada.

En diversas fuentes, se menciona que la lectura de la carga o tirante, es mejor en un pozo de lectura. Con objeto de comprobar dicha mejora, se tomaron todos los tirantes medidos en las pruebas de variación de rugosidades, de colocación de pantalla y de colocación de desviador, y se graficaron como se muestra en la figura 62.

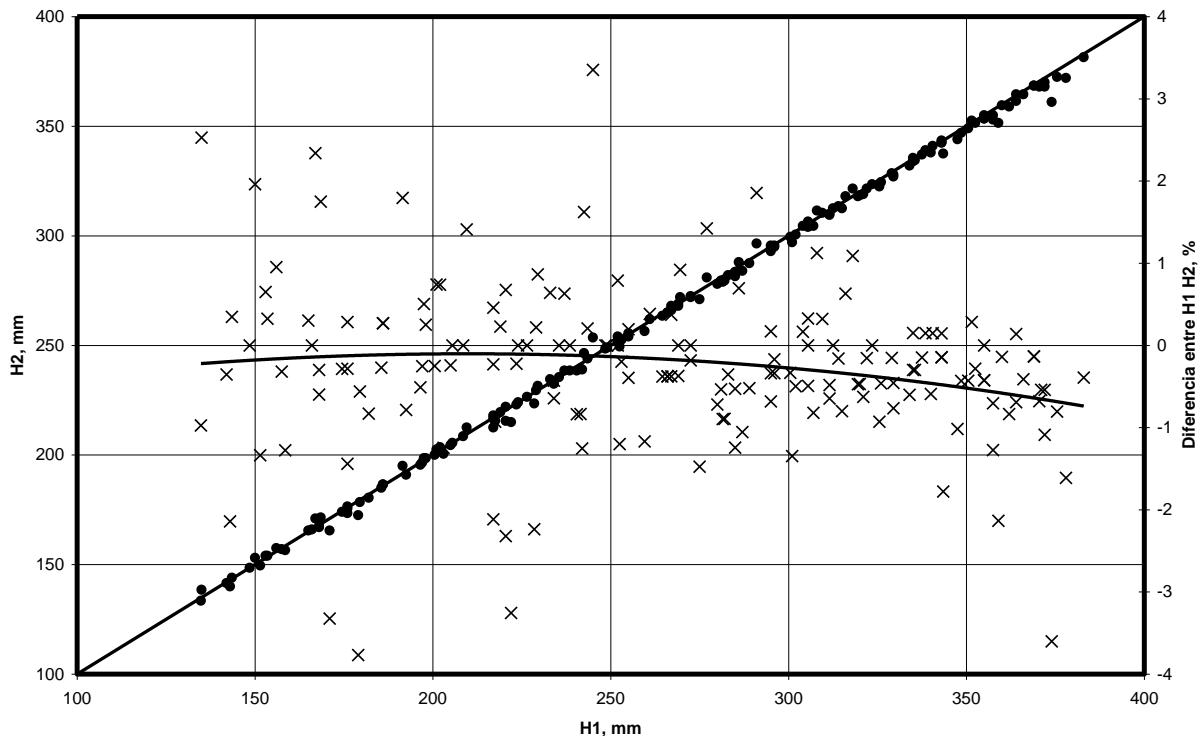


Figura 62. Diferencia entre los tirantes H1 y H2.

A simple vista, se pueda apreciar que la diferencia entre los tirantes H1 y H2, no es tan importante. La línea recta diagonal indica los puntos donde deberían unirse los

valores de tirantes, si fueran exactamente iguales estarían sobre la línea; al estar un poco fuera de dicha línea se concluye que no son iguales.

Para saber qué tan grande o pequeña es la diferencia se calculó dicha diferencia como el porcentaje entre ambos tirantes, usando como referencia el tirante H1. Los valores obtenidos se graficaron como "X" en la figura anterior. Dichos puntos se mueven entre los valores de 4%, tanto positivos como negativos, hasta antes de los 300 mm. Se puede ver que solamente se tiene tendencia significativa para valores mayores de los 300 mm. Se adicionó una línea de tendencia cuadrática y se puede ver que en promedio, la diferencia no rebasa el 0.5 %.

Lo anterior indica, al menos para el presente experimento, que contrariamente a lo indicado por la literatura, el hecho de medir la profundidad del agua en un tanque de lectura, no representa una ventaja importante.

Otro caso es la lectura de los mismos tirantes H1 y H2 cuando se tienen pendientes fuertes en el canal. Ello es lógico, ya que el tanque de lectura se colocó unos 60 cm, aguas abajo del punto de lectura en el aforador. Ello provoca que se tengan diferencias importantes entre ambas lecturas, dado que para una pendiente positiva, H2 será mayor que H1 y viceversa (ver figura 63).

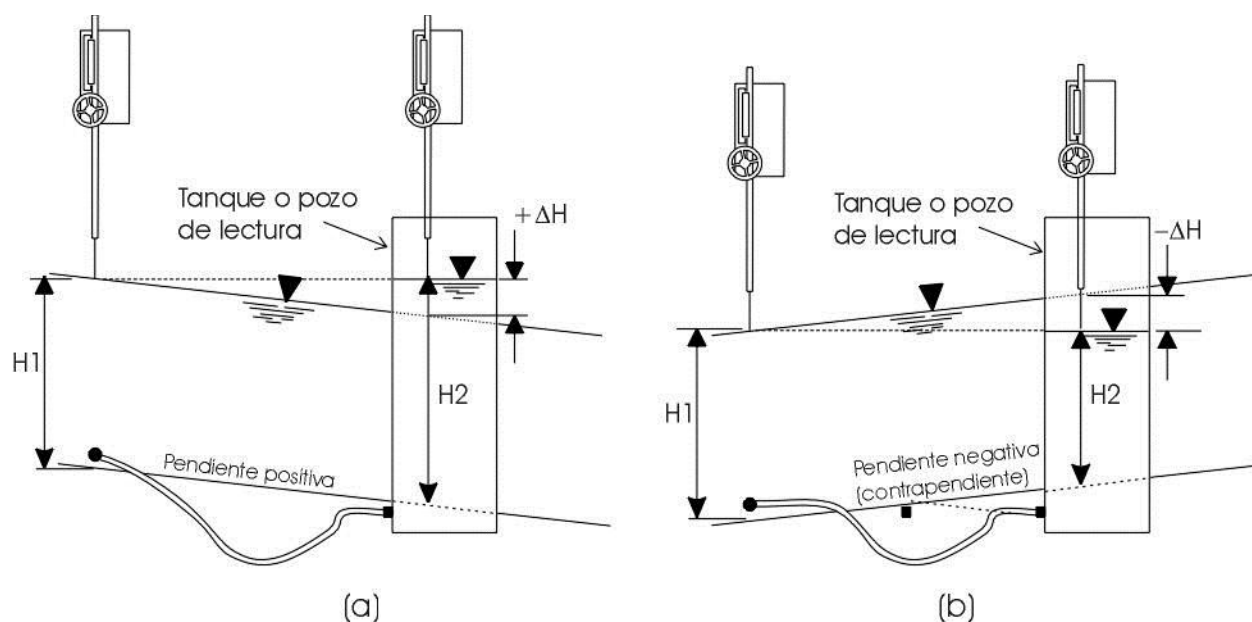


Figura 63. Aumento y disminución del tirante medido.

En función de los resultados anteriores, se decidió usar H2 como la carga sobre el aforador, aunque no se tuviera gran ventaja en la estimación correcta del gasto. Sin embargo, en las pruebas de variación de pendiente no se pudo usar el tirante H2, por lo explicado anteriormente, por lo que para estas pruebas, el gasto se calculó usando el tirante H1.

8.2 Prueba en el Flow Tracker

Para verificar el funcionamiento del medidor electromagnético se realizó una prueba en el laboratorio con el Flow Tracker (ver figura 64), este dispositivo se utiliza para medir variables hidráulicas en canales abiertos, por ejemplo: el gasto y la velocidad. Los datos medidos se aprecian en una pantalla digital del mismo dispositivo. El objetivo de esta prueba fue comparar las mediciones en el medidor electromagnético con las registradas en el Flow Tracker para posteriormente concluir si las lecturas en el medidor de referencia son confiables o no. Esta prueba se llevó a cabo en el canal de pendiente variable en posición horizontal. Para la ejecución de esta prueba se atendió el siguiente procedimiento:

- 1) Se configuró el Flow Tracker y se creó un nuevo trabajo.
- 2) Se abrieron las válvulas de alimentación y se esperó a que se estabilizara el flujo en el canal.
- 3) Se colocó el Flow Tracker dentro del canal a la altura deseada (ver figura 65) y se registró la velocidad. Para cada gasto medido, el área hidráulica se dividió en celdas y en cada una de estas se midió la velocidad en el centro de la misma, como se observa en la figura 66.
- 4) Se calculó el área de cada celda y se multiplico por la velocidad allí registrada.
- 5) Finalmente, se hizo la suma de los gastos y se obtuvo el caudal total que circula por el canal.
- 6) Se repitieron los pasos del 3) al 6) para cinco gastos diferentes.

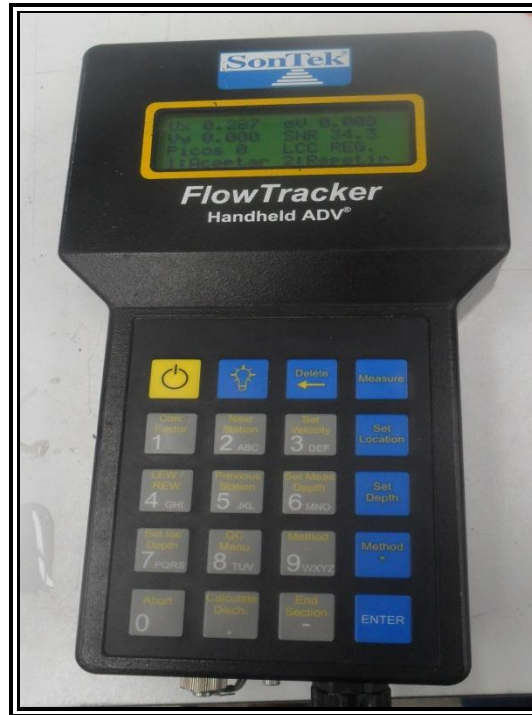


Figura 64. Flow Tracker.

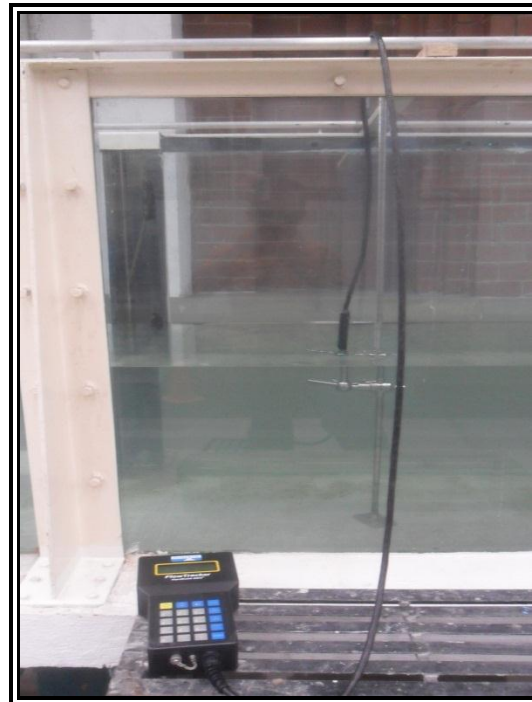


Figura 65. Colocación del Flow Tracker dentro del canal.

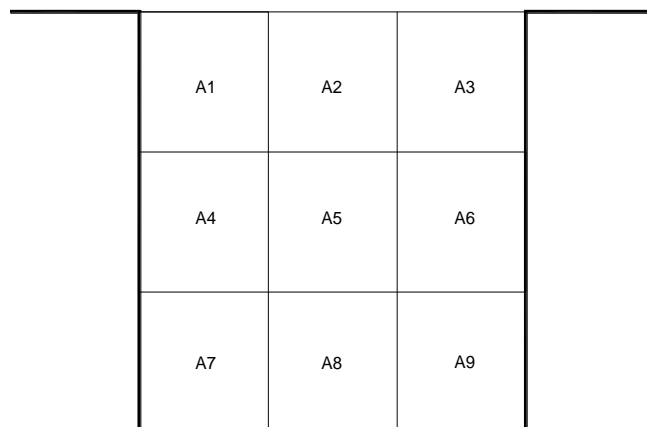


Figura 66. División del área hidráulica en celdas.

Para el primer gasto medido se obtuvieron los resultados vistos en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados de la prueba para el primer gasto medido en el Flow Tracker

Celda	A (m ²)	V (m/s)	Q (L/s)
1	0.042	0.393	16.506
2	0.042	0.401	16.842
3	0.042	0.368	15.456
4	0.042	0.409	17.178
5	0.042	0.410	17.22
6	0.042	0.339	14.238
7	0.042	0.379	15.918
8	0.042	0.401	16.842
9	0.042	0.335	14.07
		Q _{total} (L/s)	144.27

Para este primer caudal, los gastos observados en el medidor electromagnético se observan en la tabla siguiente.

Tabla 13. Gastos observados en el medidor electromagnético

n	Q_{electro} (L/s)
1	148.4
2	147.3
3	147.4
4	146.7
5	147.3
6	148.8
7	147.8
8	149.0
9	147.7
10	148.3
Promedio	147.87

Como se observa en la tabla 12 y 13 el gasto en el medidor electromagnético y el caudal obtenido en el Flow Tracker son muy similares.

Se realizó el mismo procedimiento para los cuatro gastos restantes. En la siguiente tabla se aprecia el resumen de resultados correspondientes a esta prueba.

Tabla 14. Resumen de resultados de la prueba con el Flow Tracker

n	Q_{electro} (l/s)	Q_{FT} (l/s)
1	8.62	5.675
2	39.16	36.576
3	61.36	62.328
4	95.31	93.942
5	147.87	144.27

De manera gráfica los resultados de la tabla anterior se aprecian en la figura 67.

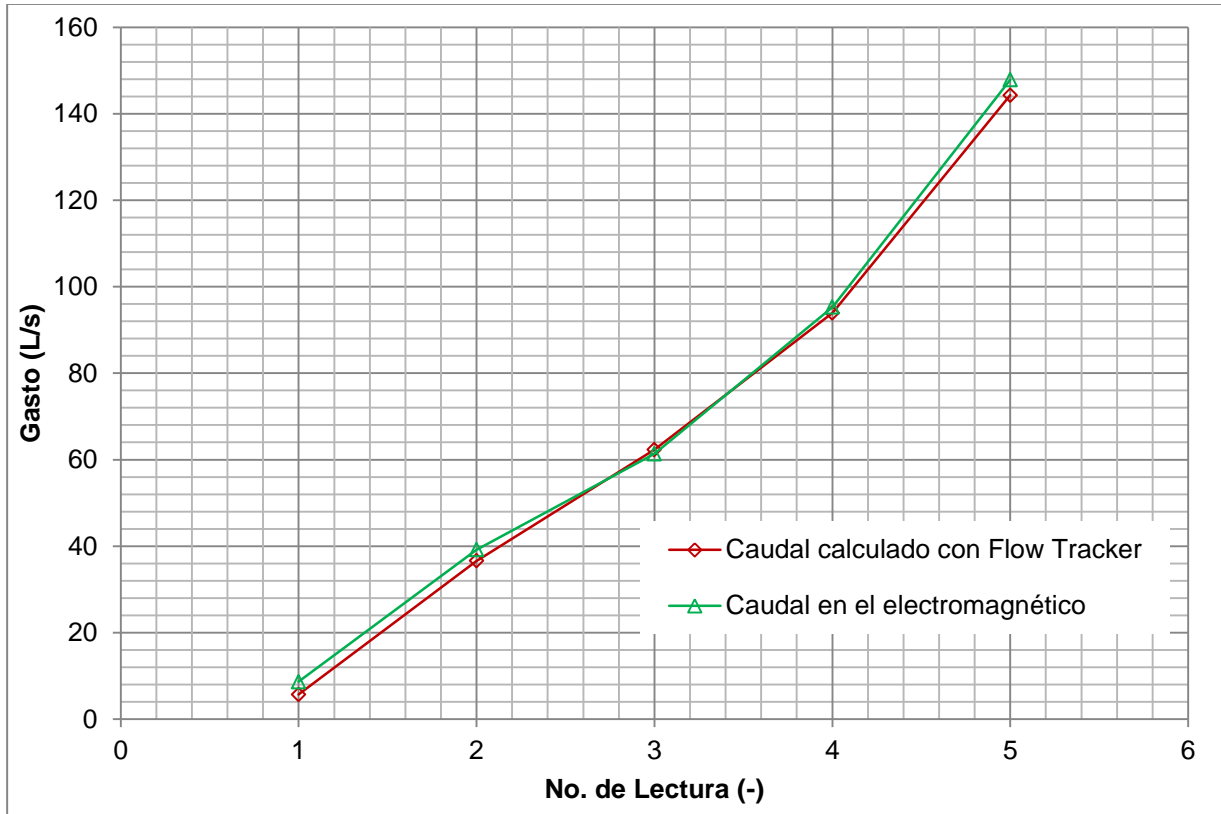


Figura 67. Comparación del caudal en el medidor electromagnético con el calculado en el Flow Tracker.

De la figura anterior se puede observar que los gastos arrojan valores muy similares, por lo que se puede concluir que el medidor electromagnético presenta datos confiables y estos sirven de referencia para cada una de las pruebas que se realizaron en el presente trabajo.

8.3 Resultados de las prueba en condiciones normales de acuerdo a la normatividad

Esta prueba se realizó atendiendo a las normas descritas anteriormente. Durante esta prueba, se utilizó el canal de pendiente constante, la superficie del aforador fue lisa, el canal estaba horizontal, se presentó un flujo subcrítico y no hubo alteraciones en el caudal antes de la entrada al modelo.

En la tabla 15 se aprecian los resultados que se obtuvieron para esta prueba.

Tabla 15. Resultados de la prueba en condiciones normales de operación

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	134.80	133.50	134.00	26.68	24.95	24.58	24.73	6.49	7.85	7.32
2	142.00	141.50	141.00	33.27	27.02	26.87	26.73	18.80	19.22	19.66
3	166.00	166.00	168.00	36.87	34.31	34.31	34.95	6.95	6.94	5.22
4	174.50	174.00	173.00	43.53	37.03	36.87	36.55	14.93	15.29	16.03
5	196.50	195.50	197.00	47.25	44.41	44.07	44.59	6.01	6.73	5.63
6	205.00	204.50	204.50	54.34	47.38	47.21	47.21	12.81	13.12	13.12
7	223.50	223.00	223.00	57.21	54.08	53.90	53.90	5.48	5.79	5.79
8	243.50	244.00	246.00	65.81	61.65	61.86	62.63	6.32	6.01	4.83
9	269.00	269.00	270.00	76.10	71.80	71.81	72.22	5.65	5.63	5.10
10	296.00	295.00	295.00	87.17	83.12	82.70	82.70	4.65	5.13	5.13
11	305.50	305.50	306.00	95.76	87.23	87.25	87.47	8.90	8.89	8.66
12	319.50	318.00	318.50	97.40	93.42	92.77	92.99	4.08	4.76	4.53
13	337.50	337.00	337.50	105.97	101.60	101.38	101.61	4.13	4.33	4.11
14	360.00	359.50	360.50	116.72	112.14	111.92	112.39	3.92	4.11	3.71
15	392.00	-	391.00	129.26	127.75	-	127.27	1.17	-	1.54
16	404.50	-	402.00	137.55	134.03	-	132.78	2.56	-	3.46
17	425.00	-	421.50	147.50	144.56	-	142.77	1.99	-	3.21
18	441.00	-	438.50	156.52	152.97	-	151.67	2.27	-	3.10
19	454.50	-	450.50	165.37	160.19	-	158.06	3.13	-	4.42

En la columna 1 se aprecia el número de mediciones que se realizaron, en la columna 2 el tirante medido en el limnómetro ubicado en la garganta del aforador, en la columna 3 el tirante medido en el limnómetro ubicado justo a la entrada del Parshall, en la columna 4 el tirante registrado en el pozo de lectura, en la columna 5 se observa el gasto de referencia del medidor electromagnético, en las columnas 6, 7 y 8 se muestra el gasto calculado en el aforador Parshall para cada uno de los tirantes descritos anteriormente, finalmente, en las columnas 9, 10 y 11 se calcularon las diferencias porcentuales del gasto calculado en el aforador para cada tirante respecto al gasto de referencia.

Para esta prueba, así como las realizadas con diferentes rugosidades, con la pantalla y con el desviador de flujo, se utilizó el tirante H2 para calcular el gasto en el Parshall ya que la norma recomienda utilizar el tirante medido en la garganta del aforador para calcular el gasto.

En la figura 68, se aprecia gráficamente la variación del gasto calculado en el aforador empleando la ecuación de la ASTM para el tirante H2 respecto al gasto de referencia en el medidor electromagnético. Debido a esta variación, se obtuvo la ecuación de calibración mostrada en la misma figura.

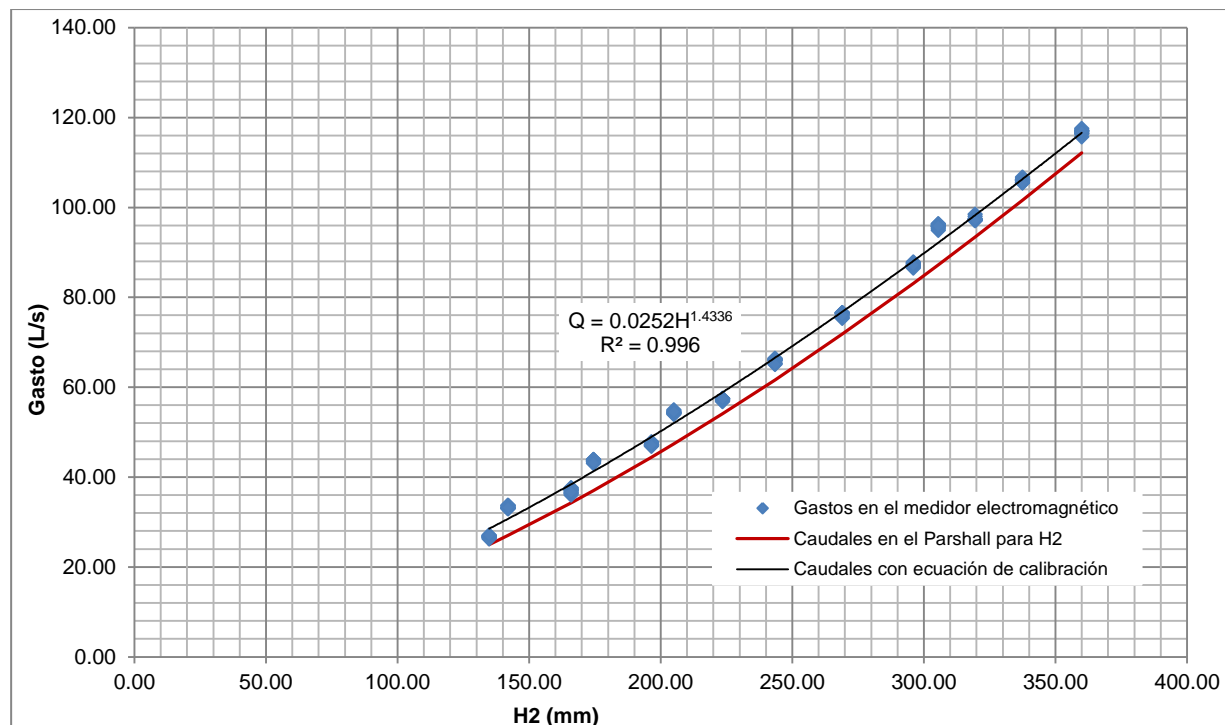


Figura 68. Variación del caudal en el Parshall respecto al gasto de referencia en condiciones normales de operación.

En la gráfica anterior, se aprecia que el gasto medido en el Parshall está por debajo del que realmente pasa por el canal, es decir, mide menos del que realmente pasa.

En la figura 69 mostrada a continuación, se presenta el flujo en el aforador Parshall trabajando en condiciones normales de operación.



Figura 69. Aforador trabajando de acuerdo a las normas.

Durante el desarrollo de esta prueba, se pudo observar que para gastos altos el flujo a la entrada del aforador presentaba una pequeña turbulencia. Para caudales bajos, el flujo era prácticamente subcrítico, ya que las líneas de corriente eran prácticamente paralelas a la plantilla del canal. También se observó, que para caudales altos los tirantes variaban un poco, por lo que fue necesario obtener un tirante promedio.

En general, esta prueba se realizó sin problema alguno y sirvió de base para poder comparar los resultados aquí obtenidos con las pruebas en donde no se acata la normatividad para estas estructuras.

8.4 Resultados de las pruebas para diferentes rugosidades

Para llevar a cabo estas pruebas, fue necesario cambiar la rugosidad de la superficie del aforador. Para ello, se pegaron a la plantilla y a las paredes del Parshall tres rugosidades diferentes: arena de 2 mm, silicón de 4 y 6 mm de diámetro respectivamente. Cada una de estas pruebas se realizó conforme al diseño experimental visto en el capítulo 6. A continuación se presentan los resultados de estas pruebas.

8.4.1 Arena de 2 mm de diámetro

Como ya se comentó anteriormente, para la ejecución de esta prueba se revistió el aforador de partículas de arena de 2 mm de diámetro; tanto las paredes laterales

como la plantilla del mismo. En la tabla 16 se muestran los resultados obtenidos para esta prueba.

Tabla 16. Resultados de la prueba para una rugosidad de 2 mm

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	150.00	153.00	154.00	32.04	29.38	30.29	30.59	8.31	5.47	4.52
2	167.00	171.00	172.00	35.78	34.62	35.91	36.23	3.23	0.35	1.25
3	191.50	195.00	196.50	43.91	42.69	43.90	44.41	2.78	0.03	1.15
4	209.50	212.50	214.00	50.30	48.98	50.07	50.61	2.62	0.47	0.61
5	229.00	229.50	230.00	57.84	56.13	56.32	56.51	2.96	2.62	2.30
6	242.50	246.50	248.00	63.39	61.27	62.83	63.42	3.35	0.88	0.04
7	261.00	262.00	263.00	70.48	68.56	68.97	69.38	2.72	2.14	1.57
8	277.00	281.00	282.00	77.07	75.10	76.77	77.19	2.56	0.39	0.16
9	291.00	296.50	296.00	83.18	80.98	83.34	83.13	2.65	0.20	0.06
10	311.50	310.00	312.00	90.68	89.87	89.22	90.10	0.89	1.61	0.64
11	326.00	324.50	326.00	96.62	96.35	95.68	96.36	0.28	0.97	0.27
12	340.50	341.00	344.00	103.01	102.98	103.23	104.62	0.03	0.21	1.56
13	355.00	353.50	354.50	109.36	109.77	109.07	109.55	0.37	0.26	0.17
14	369.00	368.50	370.00	116.09	116.46	116.23	116.96	0.32	0.12	0.75
15	381.50	-	383.00	122.32	122.55	-	123.30	0.19	-	0.80
16	396.50	-	398.00	129.05	130.00	-	130.77	0.73	-	1.33
17	410.50	-	410.00	134.81	137.08	-	136.85	1.69	-	1.51
18	426.00	-	423.00	142.54	145.08	-	143.54	1.78	-	0.70
19	437.00	-	421.00	146.96	150.85	-	142.51	2.65	-	3.03
20	453.50	-	446.00	155.10	159.68	-	155.66	2.95	-	0.36

De la tabla anterior se puede observar que a medida que el gasto aumenta, las diferencias del gasto calculado en el Parshall respecto al medidor electromagnético para cada uno de los tirantes disminuyen. Lo anterior se debe a que entre mayor velocidad lleve el flujo y considerando que se tiene una rugosidad baja, ésta no afecta mucho en la precisión en la medición en el Parshall.

En la figura 70 se aprecian tres gráficas en donde se puede ver la variación de los gastos entre el caudal registrado en el medidor electromagnético, el gasto calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el caudal obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

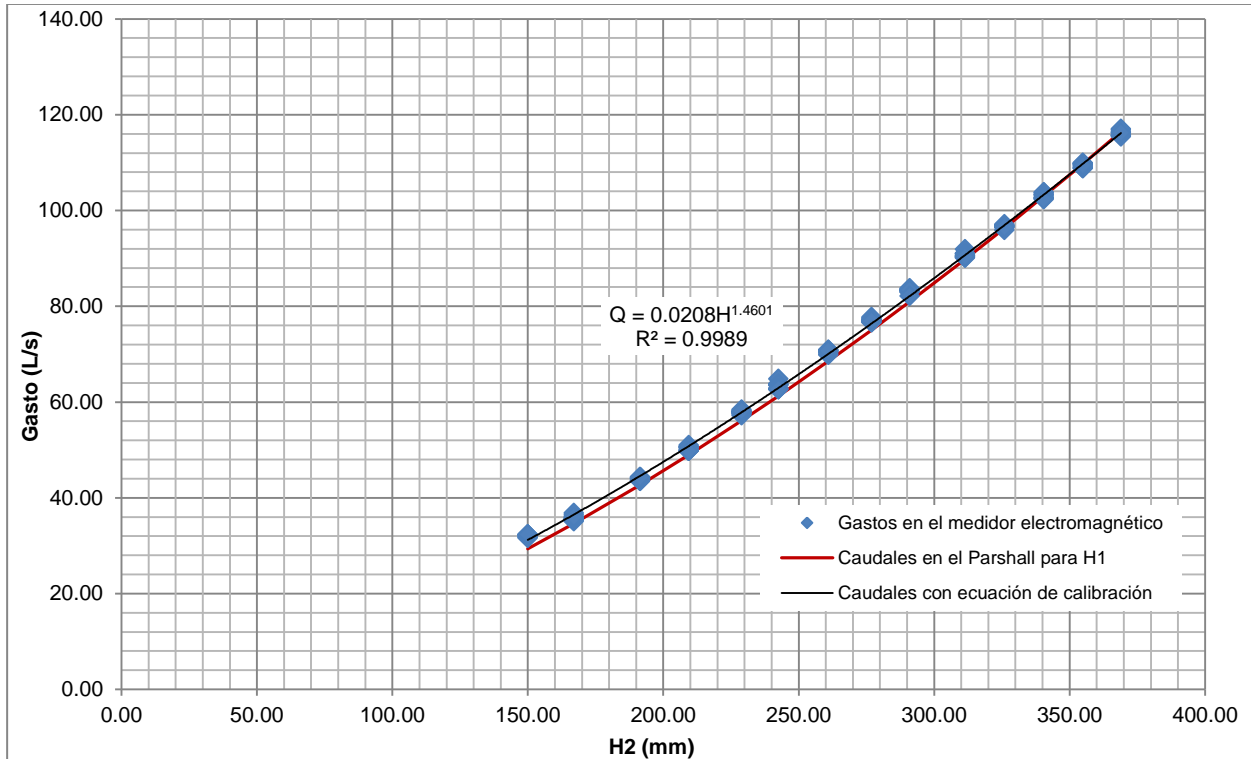


Figura 70. Variación de los caudales para una rugosidad de arena de 2 mm de diámetro.

De la gráfica anterior se puede apreciar que no hay mucha diferencia entre los gastos calculados con el Parshall, los vistos en el medidor electromagnético y los ajustados con la ecuación de calibración.

En la figura 71 se puede observar el cambio de rugosidad que se le hizo al aforador.



Figura 71. Rugosidad hecha con arena de 2 mm de diámetro.

En la figura 72 se aprecia que el flujo que se presentó para esta rugosidad fue muy tranquilo y por ende las líneas de corriente fueron paralelas a la plantilla del canal, lo anterior para gastos bajos.

Para gastos altos, las líneas de corriente fueron multidireccionales, aunque prácticamente no se presentó turbulencia que pudiera afectar la medición en los tirantes.

El flujo a la entrada de canal llevaba cierta velocidad, al momento en que entraba a la sección convergente se aprecian pérdidas de energía. Al pasar por la garganta el flujo llegaba un poco más tranquilo lo que facilitaba la medición del tirante en ese punto y así suponer que esta lectura sería un poco más precisa.



Figura 72. Comportamiento del flujo para una rugosidad con arena de 2 mm.

8.4.2 Silicón de 4 mm de diámetro

Como ya se mencionó con anterioridad, para la realización de esta prueba se revistió el aforador de partículas de silicón de 4 mm de diámetro; tanto las paredes como el fondo del mismo. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para esta prueba.

Tabla 17. Resultados de la prueba para una rugosidad de 4 mm

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	156.00	157.50	158.00	32.13	31.20	31.66	31.81	2.91	1.46	0.98
2	176.00	176.50	178.00	38.00	37.52	37.69	38.18	1.27	0.82	0.47
3	201.00	202.50	202.00	46.40	45.97	46.51	46.33	0.92	0.23	0.15
4	217.00	212.50	218.50	52.44	51.69	50.07	52.24	1.43	4.53	0.37
5	229.50	231.50	233.00	57.17	56.31	57.07	57.64	1.50	0.17	0.82
6	252.00	252.00	253.00	64.72	64.98	64.99	65.38	0.40	0.41	1.02
7	267.00	268.00	269.00	70.64	70.99	71.40	71.81	0.49	1.08	1.66
8	285.00	281.50	287.00	77.37	78.44	76.98	79.29	1.38	0.50	2.49
9	304.00	304.50	305.00	85.18	86.58	86.81	87.03	1.64	1.91	2.17
10	316.00	318.00	318.50	90.58	91.86	92.77	92.99	1.42	2.41	2.66
11	335.00	335.50	336.00	98.59	100.45	100.69	100.92	1.88	2.13	2.36
12	352.50	351.50	352.00	104.91	108.59	108.13	108.37	3.50	3.07	3.29
13	364.00	364.50	366.00	110.58	114.05	114.31	115.03	3.14	3.37	4.02
14	382.50	-	383.00	117.87	123.04	-	123.30	4.39	-	4.61
15	398.00	-	399.00	125.16	130.75	-	131.27	4.47	-	4.88
16	411.00	-	410.00	130.11	137.34	-	136.85	5.56	-	5.18
17	416.00	-	415.00	136.93	139.90	-	139.41	2.17	-	1.81
18	439.50	-	438.00	143.50	152.18	-	151.40	6.05	-	5.51
19	461.00	-	462.00	151.09	163.71	-	164.28	8.35	-	8.73
20	470.00	-	465.00	157.99	168.65	-	165.91	6.75	-	5.02

De la tabla anterior, se puede ver que no hay mucha diferencia entre los tirantes medidos para esta prueba. Las diferencias porcentuales entre los gastos calculados con el aforador y el gasto de referencia no presentan una tendencia definida, sino que presenta altibajos a lo largo del desarrollo experimental.

En la figura 73 se presenta la variación de los gastos entre el caudal registrado en el medidor electromagnético, el gasto calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el caudal obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

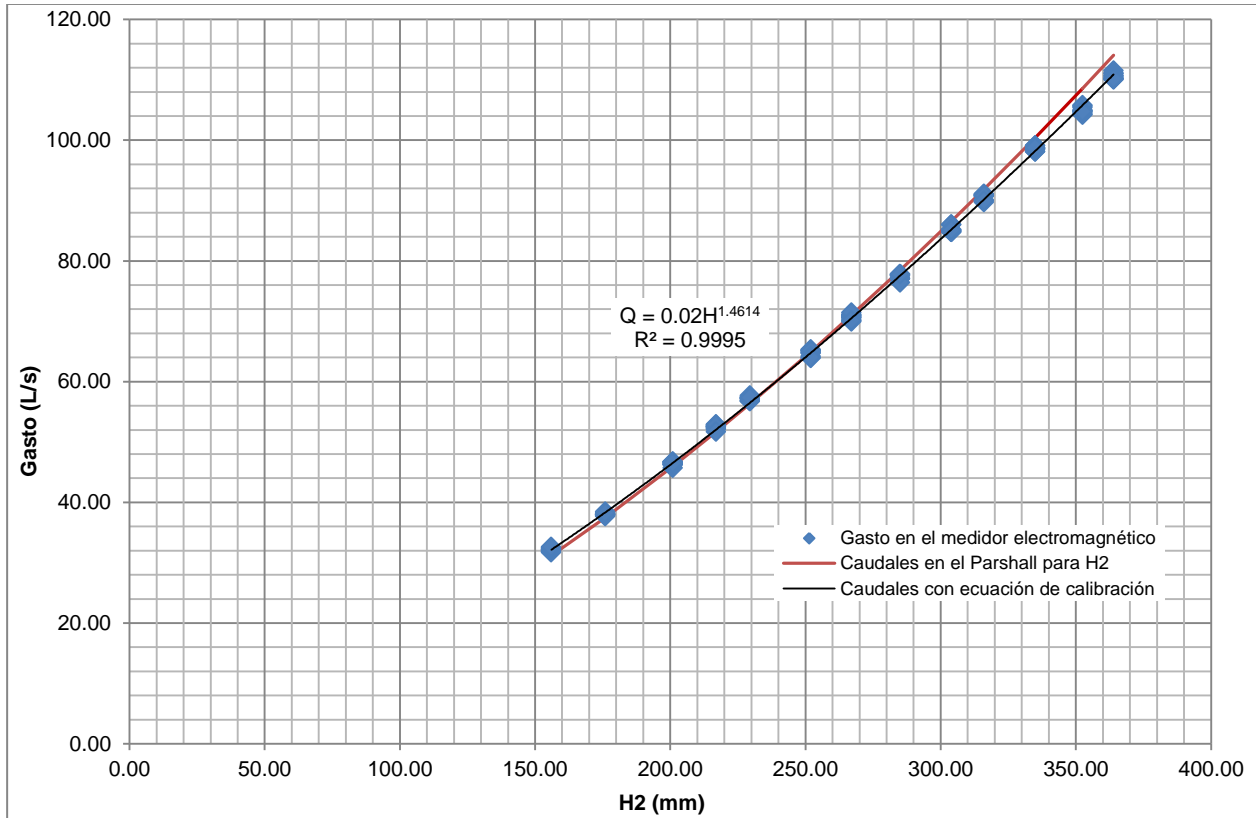


Figura 73. Variación de los caudales para una rugosidad de silicón de 4 mm de diámetro.

De la gráfica anterior se puede apreciar que para gastos bajos las curvas prácticamente se superponen, a medida que el caudal aumenta el gasto en el aforador presenta cierta discrepancia respecto al medidor de referencia y a la curva obtenida empleando la ecuación de ajuste.

En la figura 74 se presenta el cambio de rugosidad que se le realizó al aforador, como ya se mencionó, se trata de “montículos” de silicón adheridos a las paredes y al fondo del aforador.



Figura 74. Rugosidad hecha con silicón de 4 mm de diámetro.

En la figura 75 se muestra se puede ver que el comportamiento del flujo presentaba cierta turbulencia para gastos altos. Las líneas de corriente no eran paralelas a la plantilla del Parshall por lo que el valor del tirante presentaba cierta variación y por lo tanto fue necesario hacer dos mediciones para posteriormente obtener un tirante promedio.



Figura 75. Comportamiento del flujo para gastos altos para una rugosidad de 4 mm.

Para gastos bajos, la turbulencia disminuyó considerablemente y no fue necesario hacer dos mediciones del tirante. Se puede concluir que el flujo que se presentó fue lento, ver figura 76.

También se pudo observar que cuando el flujo hace contacto con las paredes y el fondo del modelo, genera pérdidas de energía y origina cierta alteración a las líneas de corriente. Lo anterior debido a la velocidad que lleva el flujo aguas arriba del aforador.



Figura 76. Comportamiento del flujo para gastos bajos para una rugosidad de 4 mm.

8.4.3 Silicón de 6 mm de diámetro

Al igual que en la prueba anterior, se revistió el aforador de partículas de silicón de 6 mm de diámetro; tanto las paredes como el fondo del mismo. En la tabla 18 mostrada enseguida se presentan los resultados para esta prueba.

Tabla 18. Resultados de la prueba para una rugosidad de 6 mm

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	153.00	154.00	155.00	30.69	30.28	30.59	30.90	1.33	0.32	0.67
2	176.00	173.50	175.00	36.93	37.52	36.71	37.20	1.60	0.59	0.73
3	197.50	198.50	199.00	44.20	44.75	45.11	45.28	1.25	2.05	2.45
4	217.00	218.00	218.00	51.15	51.69	52.06	52.06	1.05	1.78	1.78
5	237.00	238.50	240.00	58.61	59.15	59.74	60.31	0.93	1.92	2.90
6	245.00	253.50	255.00	65.10	62.24	65.58	66.17	4.40	0.74	1.65
7	269.50	272.00	273.00	71.34	72.01	73.04	73.45	0.93	2.39	2.96
8	286.00	288.00	289.00	77.49	78.86	79.72	80.14	1.77	2.87	3.42
9	305.50	306.50	307.00	85.02	87.23	87.68	87.90	2.60	3.13	3.39
10	318.00	321.50	321.00	91.41	92.75	94.33	94.11	1.47	3.20	2.95
11	335.50	334.50	336.00	96.59	100.68	100.23	100.92	4.23	3.77	4.48
12	355.00	353.50	355.00	104.66	109.77	109.07	109.78	4.88	4.22	4.89
13	369.00	368.50	368.00	111.13	116.46	116.23	115.99	4.79	4.59	4.38
14	383.00	381.50	384.00	117.41	123.29	122.57	123.80	5.00	-	5.44
15	387.50	-	388.00	124.24	125.51	-	125.77	1.02	-	1.24
16	417.00	-	415.00	131.91	140.42	-	139.41	6.45	-	5.69
17	426.00	-	425.50	136.89	145.08	-	144.84	5.98	-	5.81
18	441.00	-	439.00	142.69	152.97	-	151.93	7.21	-	6.48
19	454.50	-	453.50	150.10	160.19	-	159.68	6.72	-	6.38
20	472.00	-	471.00	159.30	169.75	-	169.20	6.56	-	6.22

Al igual que en el caso anterior, se puede observar que no hay mucha diferencia entre los tirantes medidos para esta prueba. Las diferencias porcentuales entre los gastos calculados en el Parshall y el gasto de referencia no presentan una tendencia definida, sino que presenta altibajos conforme aumenta el flujo.

En la siguiente figura se muestra la variación de los gastos entre el caudal registrado en el electromagnético, el gasto calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el caudal obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

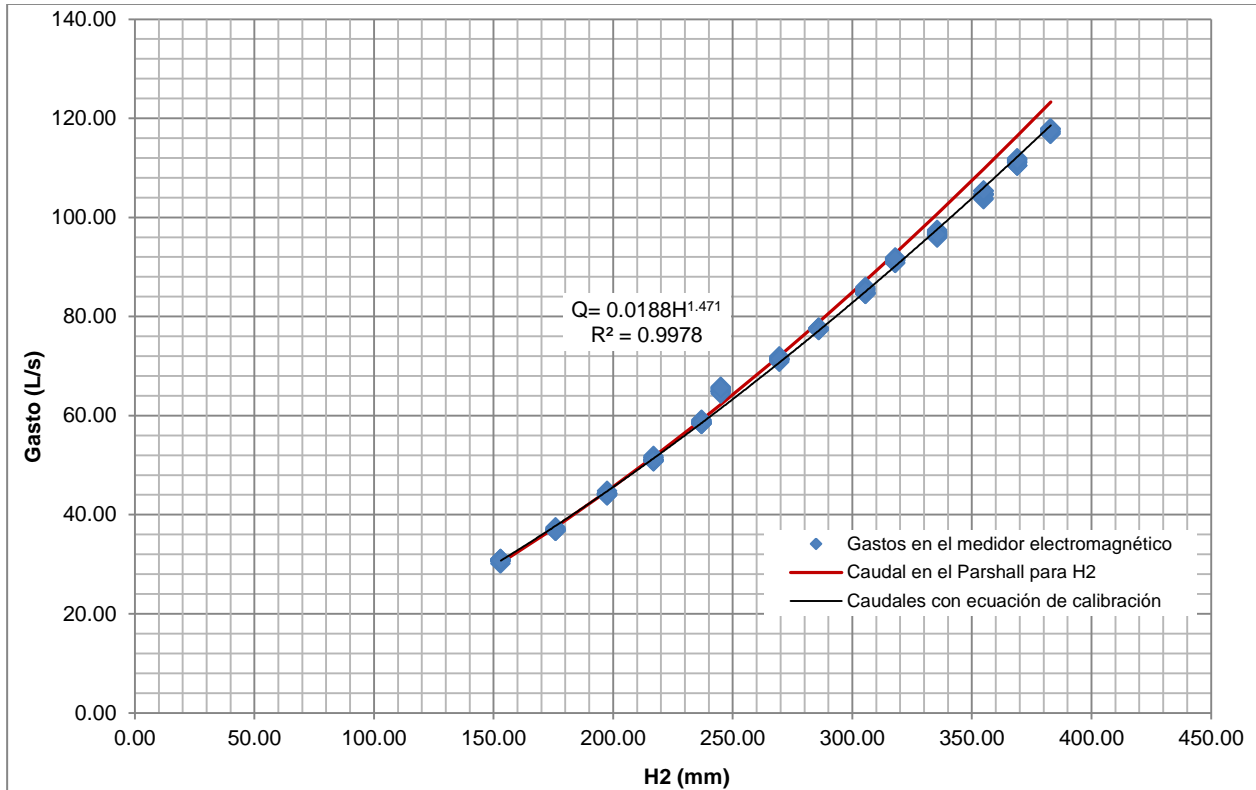


Figura 77. Variación de los caudales para una rugosidad de silicón de 6 mm de diámetro.

Al igual que en el caso anterior, se puede observar que para caudales bajos las curvas prácticamente se superponen, a medida que el gasto aumenta, las curvas se separan un poco. Esto debido a que entre mayor sea el caudal, mayor será la turbulencia en el flujo y por ende se verá afectada la precisión en la medición del tirante.

En la figura 78 se presenta el cambio de rugosidad que se le realizó al aforador. Se trata de silicón de 6 mm de diámetro pegado a las paredes y a la plantilla del dispositivo de medición.



Figura 78. Rugosidad hecha con silicón de 6 mm de diámetro.

Al igual que en la prueba anterior, se puede observar que para gastos altos, el flujo presentó cierta turbulencia. Las líneas de corriente no eran paralelas a la plantilla del Parshall (ver figura 79). El tirante presentaba cierta variación y por lo tanto fue necesario hacer dos mediciones para posteriormente obtener un tirante promedio.



Figura 79. Comportamiento del flujo para gastos altos para una rugosidad de 6 mm.

En cambio, para gastos bajos, las líneas de corriente apenas se percibían y fueron paralelas a la plantilla del aforador tal como se muestra en la figura 80.

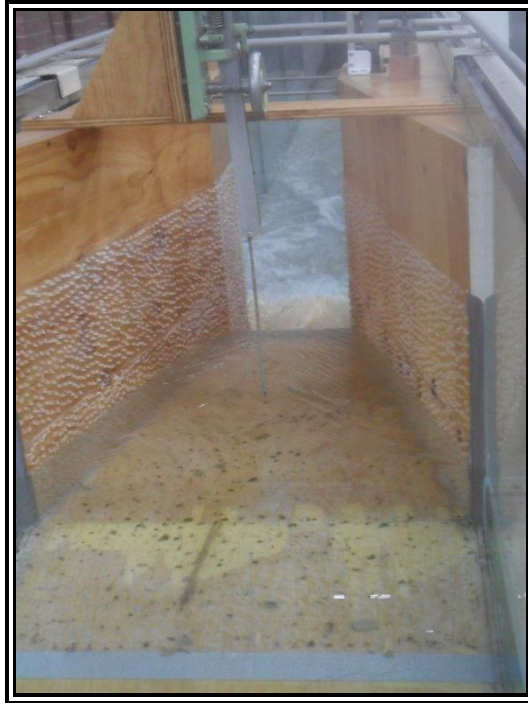


Figura 80. Comportamiento del flujo para gastos bajos para una rugosidad de 6 mm.

Finalmente en la figura 81 presentada enseguida se aprecia la diferencia porcentual de cada una de las rugosidades respecto a la ecuación de la ASTM.

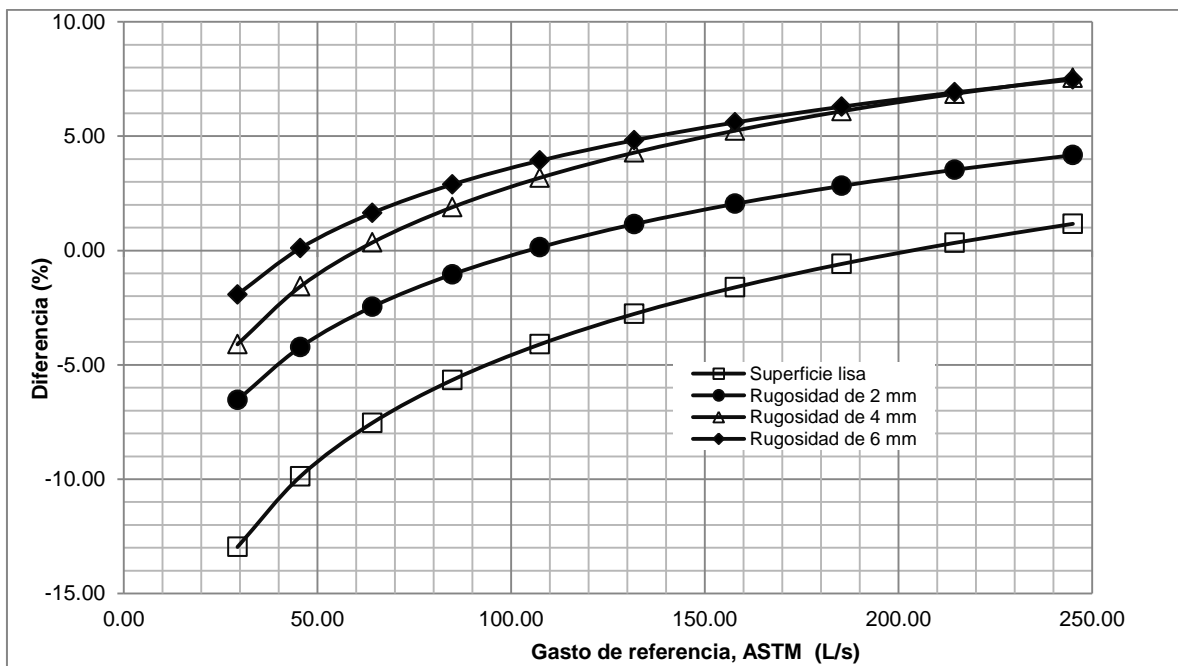


Figura 81. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes rugosidades.

Contrario a lo que podría pensarse, los caudales obtenidos con las rugosidades más altas en el modelo son las que tienen una menor diferencia con el caudal obtenido de acuerdo a la norma. Mientras que las rugosidades más bajas son las que presentan mayores diferencias.

8.5 Resultados de las pruebas con una pantalla aguas arriba del Parshall

Para poder llevar a cabo estas pruebas se colocó un obstáculo o pantalla aguas arriba del aforador a diferentes distancias de la entrada al dispositivo: 0.75 m, 1.53 m, 2.28 m y 3.00 m. El objetivo de esta prueba fue observar que sucede con la precisión en la medición en el Parshall al colocar este obstáculo. Cada una de las pruebas se desarrolló conforme al diseño experimental visto en el capítulo 6. A continuación se presentan los resultados correspondientes.

8.5.1 Pantalla a 0.75 m

La primera ubicación en la que se colocó la pantalla fue a 0.75 m antes de la entrada del Parshall. Posteriormente, fijamos la pantalla en el canal para que no se moviera durante la prueba. Concluido lo anterior, se procesaron las mediciones y se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 19.

Tabla 19. Resultados de la prueba colocando la pantalla a 0.75 m

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	151.50	149.50	150.00	32.51	29.83	29.23	29.38	8.24	10.08	9.62
2	168.50	171.50	171.00	38.88	35.10	36.07	35.91	9.72	7.24	7.65
3	192.50	191.00	193.00	46.22	43.03	42.53	43.21	6.90	7.99	6.51
4	222.00	215.00	215.50	55.22	53.52	50.97	51.15	3.07	7.70	7.37
5	228.50	223.50	233.50	57.96	55.94	54.08	57.83	3.49	6.69	0.22
6	242.00	239.00	240.50	64.76	61.07	59.93	60.50	5.69	7.46	6.57
7	259.50	256.50	257.00	71.82	67.96	66.77	66.97	5.38	7.03	6.75
8	275.00	271.00	272.00	77.58	74.27	72.63	73.04	4.27	6.38	5.85
9	287.00	284.00	285.00	84.20	79.28	78.03	78.45	5.84	7.33	6.83
10	302.00	300.50	301.00	91.17	85.71	85.07	85.29	5.99	6.69	6.45
11	308.00	311.50	312.00	96.75	88.33	89.88	90.10	8.70	7.10	6.87
12	325.50	322.50	323.00	101.41	96.12	94.78	95.01	5.21	6.53	6.31
13	343.50	337.50	338.00	108.76	104.37	101.61	101.84	4.03	6.57	6.36
14	357.50	353.00	353.50	116.61	110.95	108.84	109.07	4.85	6.67	6.46
15	374.00	361.00	367.00	123.91	118.88	112.63	115.51	4.06	9.10	6.78
16	389.00	-	379.00	129.07	126.25	-	121.34	2.18	-	5.99
17	401.00	-	392.00	136.26	132.26	-	127.76	2.94	-	6.23
18	415.50	-	404.00	142.54	139.65	-	133.80	2.03	-	6.13
19	426.00	-	418.00	150.01	145.08	-	140.96	3.28	-	6.04
20	435.50	-	431.00	156.62	150.08	-	147.72	4.17	-	5.68

Como se ve en la tabla anterior, existe una diferencia importante entre los valores de los tirantes medidos, esto debido principalmente a la turbulencia que generaba la pantalla al estar tan cerca de la entrada al aforador.

También se observa que las diferencias porcentuales del gasto calculado con el Parshall y del observado en el electromagnético para cada uno de los tirantes es muy grande; por encima del 10 % para gastos bajos. Lo anterior debido a la cercanía de la pantalla con la entrada al aforador. A medida que el caudal aumenta estas diferencias van disminuyendo. De igual forma se aprecia, que para el tirante medido a la entrada del Parshall la diferencia porcentual entre este gasto y el caudal de referencia es la más baja.

En la siguiente figura se muestran las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el gasto calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el caudal obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

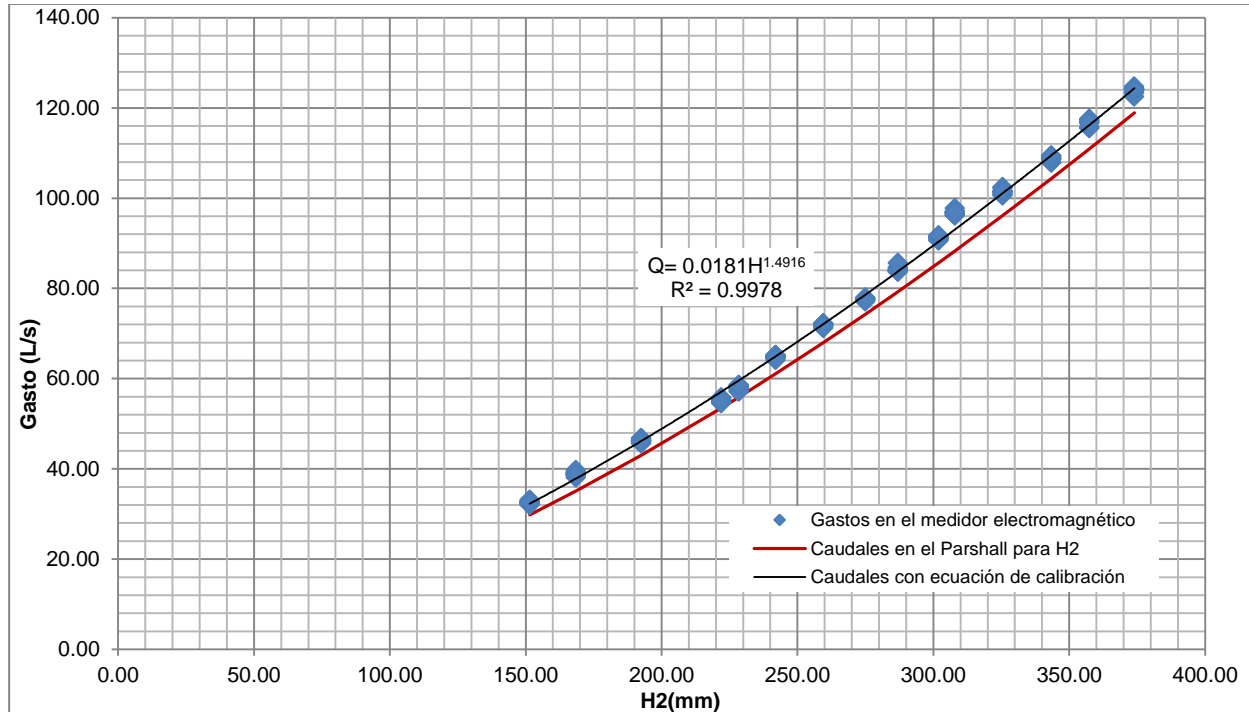


Figura 82. Variación de los caudales colocando la pantalla a 0.75 m.

De la gráfica anterior, se puede observar que las curvas no se interceptan prácticamente en ningún punto. Se puede ver que las gráficas obtenidas en el Parshall y con la ecuación de calibración son paralelas entre sí.

En la figura 83 y 84 se presenta la ubicación de la pantalla en planta y perfil para esta prueba.



Figura 83. Colocación de la pantalla a 0.75 m antes del aforador, vista en planta.



Figura 84. Colocación de la pantalla a 0.75 m antes del aforador, vista de perfil.

Durante el desarrollo de esta prueba se presentó un flujo turbulento para gastos altos y bajos respectivamente. Debido a lo anterior, el valor del tirante hidráulico osciló demasiado por lo que hubo necesidad de realizar dos mediciones para posteriormente obtener un promedio. De igual forma, se presentaron vórtices (ver figura 85) al pasar el flujo por los costados de la pantalla, éstos no se disiparon al entrar al modelo, lo que provocó una fluctuación importante en los tirantes. Por consecuencia, las líneas de corriente eran multidireccionales.



Figura 85. Formación de vórtices al interceptar el flujo en la pantalla ubicada a 0.75 m.

8.5.2 Pantalla a 1.53 m

La segunda posición en la que se colocó la pantalla fue a 1.53 m antes de la entrada al modelo. Posteriormente, se fijó la pantalla en el canal para que no se moviera durante el desarrollo de la prueba. Concluido lo anterior, se procesaron los datos obtenidos en el laboratorio y se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Resultados de la prueba colocando la pantalla a 1.53 m

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	143.50	144.00	145.50	30.19	27.45	27.60	28.05	9.06	8.56	7.10
2	168.00	167.50	168.00	37.76	34.94	34.79	34.95	7.46	7.87	7.45
3	185.50	185.00	185.50	44.01	40.66	40.50	40.67	7.61	7.98	7.59
4	202.00	203.50	204.50	50.27	46.32	46.86	47.21	7.85	6.79	6.09
5	220.50	222.00	222.50	57.51	52.97	53.53	53.72	7.89	6.92	6.60
6	238.50	238.50	240.00	63.83	59.73	59.74	60.31	6.43	6.41	5.51
7	255.00	255.50	256.00	70.24	66.16	66.37	66.57	5.80	5.51	5.22
8	272.50	272.50	272.50	77.47	73.24	73.25	73.25	5.46	5.45	5.45
9	285.00	283.50	285.00	82.64	78.44	77.82	78.45	5.08	5.83	5.07
10	295.00	295.50	296.50	88.00	82.69	82.92	83.34	6.04	5.78	5.29
11	309.50	310.50	311.00	94.71	88.99	89.44	89.66	6.04	5.56	5.33
12	322.00	321.50	321.50	99.49	94.54	94.33	94.33	4.97	5.18	5.18
13	338.50	339.00	339.00	107.94	102.06	102.30	102.30	5.45	5.22	5.22
14	351.50	352.50	353.00	114.37	108.11	108.60	108.84	5.47	5.04	4.84
15	372.00	370.00	370.00	122.63	117.91	116.96	116.96	3.85	4.63	4.63
16	387.00	-	386.00	130.39	125.26	-	124.78	3.93	-	4.30
17	405.00	-	409.00	137.02	134.28	-	136.34	2.00	-	0.50
18	415.50	-	409.00	142.14	139.65	-	136.34	1.75	-	4.08
19	427.50	-	423.00	150.15	145.86	-	143.54	2.85	-	4.40
20	443.00	-	438.00	157.98	154.06	-	151.40	2.48	-	4.16

Como se muestra en la tabla anterior, la diferencia entre los tirantes medidos es mucho menor que en la prueba anterior. Lo anterior debido a que la turbulencia a la entrada al modelo fue menos intensa que en la prueba pasada.

Se observa también que las diferencias porcentuales del gasto calculado con el Parshall para cada uno de los tirantes es muy grande; por encima del 9 % para caudales bajos. A medida que el caudal aumenta estas diferencias van disminuyendo hasta un 4.63 %. De igual forma se muestra, que para el tirante medido en la garganta del Parshall la diferencia porcentual entre este gasto y el caudal de referencia es la más baja.

En la figura 86 se muestran las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el gasto calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el caudal obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

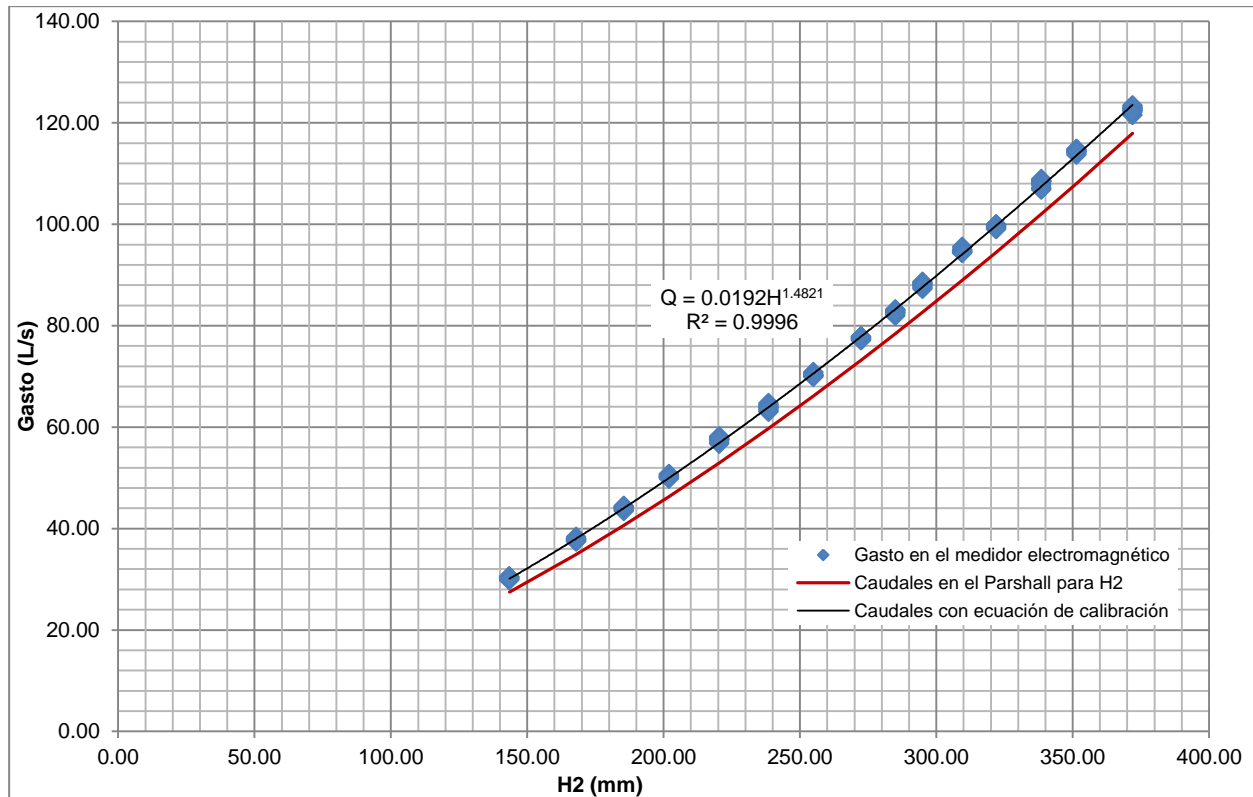


Figura 86. Variación de los caudales colocando la pantalla a 1.53 m.

Como se puede ver, el comportamiento de las curvas es muy similar al caso anterior, se aprecia que las gráficas obtenidas en el Parshall y con la ecuación de calibración son paralelas entre sí.

En las siguientes figuras se aprecia la ubicación de la pantalla en planta y perfil para esta prueba.



Figura 87. Colocación de la pantalla a 1.53 m antes del modelo, vista en planta.



Figura 88. Colocación de la pantalla a 1.53 m antes del modelo, vista de perfil.

Al igual que en el caso anterior, para esta prueba se presentó un flujo turbulento para caudales altos y bajos respectivamente. Debido a lo anterior, el valor del tirante hidráulico osciló demasiado por lo que hubo necesidad de realizar dos mediciones para después calcular un promedio. De igual forma, se presentaron vórtices al pasar el flujo por los lados de la pantalla, éstos no se disiparon al entrar al dispositivo, lo que ocasionó una fluctuación importante en los tirantes. Por consecuencia, las líneas de corriente eran multidireccionales. Lo anterior se aprecia en la figura 89.



Figura 89. Formación de vórtices al interceptar el flujo en la pantalla ubicada a 1.53 m.

8.5.3 Pantalla a 2.28 m

Para esta prueba se colocó la pantalla a 2.28 m antes de la entrada al aforador. Posteriormente, se fijó la pantalla en el canal para que no se moviera durante la prueba. Concluido lo anterior, se procesaron los datos medidos en el laboratorio y se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 21 mostrada a continuación.

Tabla 21. Resultados de la prueba colocando la pantalla a 2.28 m

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	135.00	138.50	140.00	28.75	25.01	26.01	26.44	13.03	9.54	8.04
2	157.50	157.00	157.50	34.26	31.66	31.51	31.66	7.60	8.04	7.59
3	176.00	175.50	177.00	40.01	37.52	37.36	37.85	6.23	6.62	5.40
4	197.00	196.50	198.00	47.68	44.58	44.41	44.93	6.50	6.85	5.76
5	217.00	216.50	218.00	55.26	51.69	51.51	52.06	6.46	6.78	5.79
6	233.00	234.50	235.00	62.02	57.63	58.21	58.40	7.07	6.14	5.84
7	248.50	248.50	249.50	68.05	63.60	63.61	64.00	6.54	6.52	5.95
8	264.50	263.50	265.00	73.94	69.97	69.58	70.19	5.37	5.90	5.08
9	283.00	282.00	282.00	82.04	77.60	77.19	77.19	5.41	5.91	5.91
10	300.50	299.50	300.00	89.47	85.06	84.64	84.85	4.93	5.40	5.16
11	312.50	312.50	312.50	95.87	90.31	90.32	90.32	5.80	5.79	5.79
12	329.00	328.50	328.00	102.44	97.71	97.49	97.27	4.62	4.83	5.05
13	347.50	344.00	344.00	109.79	106.24	104.62	104.62	3.24	4.71	4.71
14	355.00	355.00	356.00	115.45	109.77	109.78	110.26	4.92	4.91	4.50
15	370.50	368.00	369.00	121.33	117.18	115.99	116.47	3.42	4.40	4.00
16	385.50	-	384.00	128.82	124.52	-	123.80	3.34	-	3.90
17	399.00	-	398.00	135.99	131.25	-	130.77	3.48	-	3.84
18	413.00	-	412.50	142.79	138.36	-	138.13	3.10	-	3.27
19	428.50	-	426.50	150.53	146.39	-	145.36	2.75	-	3.43
20	442.00	-	440.00	157.18	153.52	-	152.46	2.33	-	3.00

Como se muestra en la tabla 21, para esta prueba la diferencia entre los tirantes medidos es mínima. Lo anterior debido a que la turbulencia a la entrada al modelo fue menos intensa que en pruebas pasadas. Las diferencias porcentuales de los gastos calculados en el Parshall comparados con el gasto de referencia llegan hasta el 13 % para el tirante medido en la garganta del modelo. Para caudales bajos esta diferencia disminuye considerablemente.

De igual forma se muestra, que para el tirante medido en el pozo de lectura la diferencia porcentual entre este gasto y el caudal de referencia es la más baja.

En la figura 90 mostrada a continuación se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

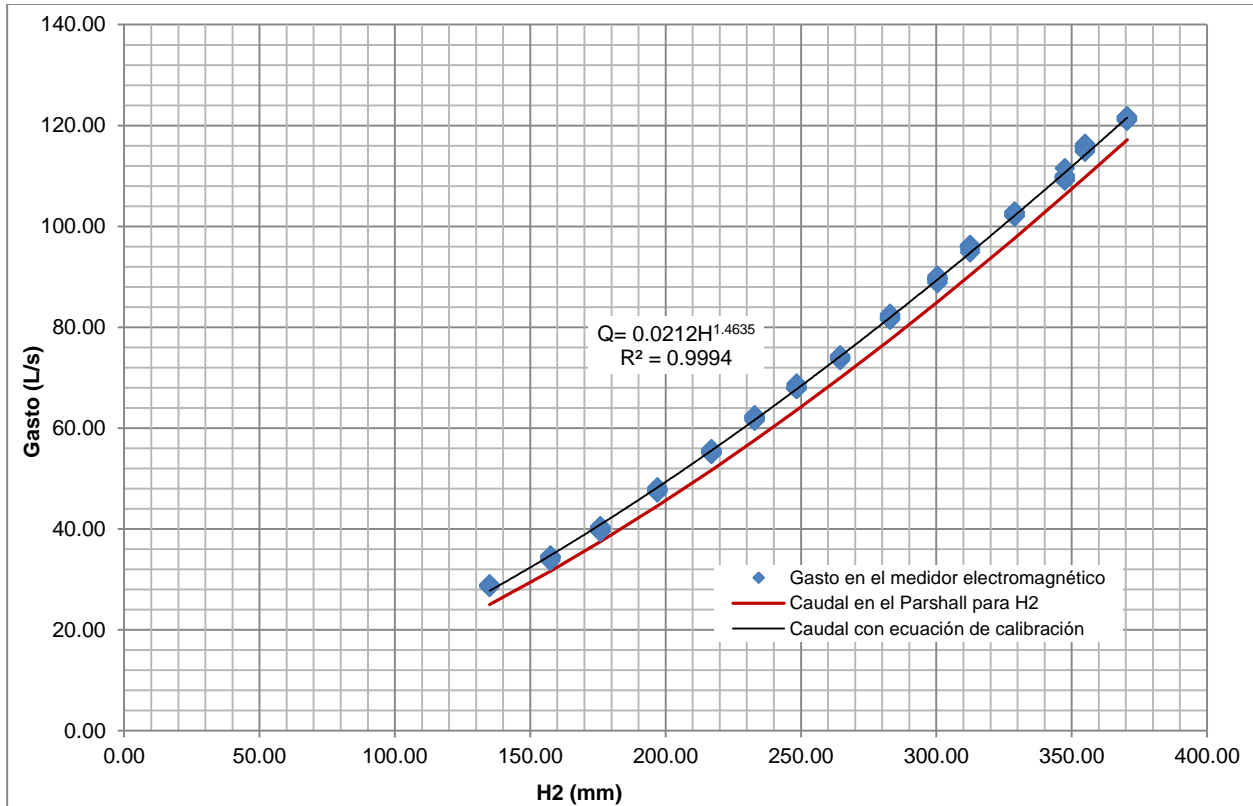


Figura 90. Variación de los caudales colocando la pantalla a 2.28 m.

Como se puede observar, el comportamiento de las curvas es muy similar a los dos casos anteriores, se aprecia que las gráficas obtenidas en el Parshall y con la ecuación de calibración son paralelas entre sí.

En la figura 91 y 92 se muestra la ubicación de la pantalla en planta y perfil para esta prueba.

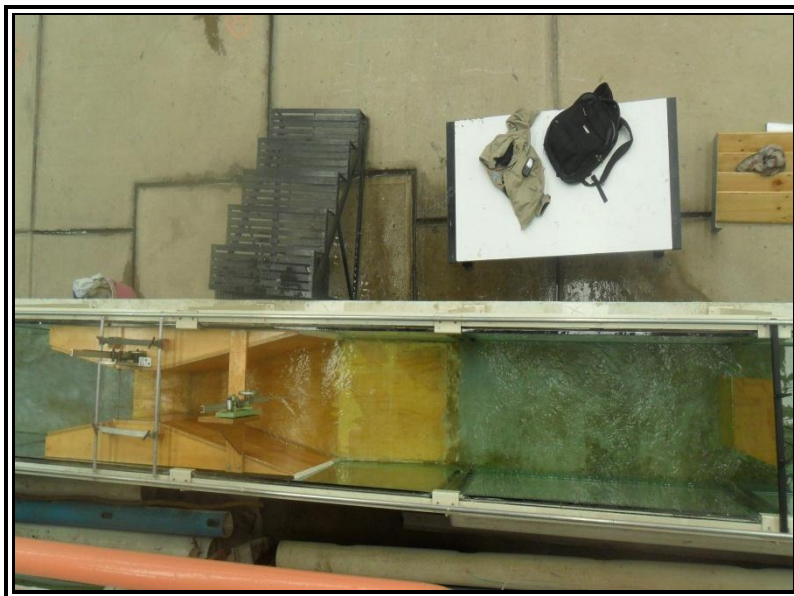


Figura 91. Colocación de la pantalla a 2.28 m antes del dispositivo, vista en planta.



Figura 92. Colocación de la pantalla a 2.28 m antes del dispositivo, vista de perfil.

Durante esta prueba se observó que para gastos altos se presentaba un flujo turbulento, y por consecuencia las líneas de corriente eran multidireccionales. Justo cuando el flujo chocó con la pantalla se generaron vórtices (ver figura 93) que fueron perdiendo intensidad a medida que se aproximaban la entrada al aforador. Debido a lo anterior, el valor del tirante hidráulico osciló demasiado por lo que hubo necesidad de realizar dos mediciones para después calcular un promedio.



Figura 93. Formación de vórtices al interceptar el flujo en la pantalla ubicada a 2.28 m.

8.5.4 Pantalla a 3.00 m

Para esta prueba se ubicó la pantalla a 3.00 m antes de la entrada al modelo. Posteriormente, se fijó la pantalla en el canal para que no se moviera durante la prueba. Terminado lo anterior, se procesaron los datos medidos en el laboratorio y se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 22 mostrada a continuación.

Tabla 22. Resultados de la prueba colocando la pantalla a 3.00 m

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	158.50	156.50	158.50	35.93	31.96	31.35	31.97	11.04	12.74	11.02
2	179.50	178.50	180.50	43.14	38.67	38.34	39.00	10.37	11.12	9.59
3	203.00	200.50	200.50	50.27	46.68	45.81	45.81	7.15	8.88	8.88
4	217.50	215.50	216.50	56.39	51.87	51.15	51.51	8.01	9.29	8.65
5	234.00	232.50	232.50	62.68	58.01	57.45	57.45	7.45	8.34	8.34
6	252.50	249.50	250.50	70.90	65.17	64.00	64.40	8.08	9.73	9.17
7	266.00	265.00	265.50	77.08	70.58	70.19	70.39	8.43	8.94	8.68
8	281.50	279.00	280.50	82.75	76.97	75.94	76.56	6.99	8.23	7.48
9	301.00	297.00	297.00	89.87	85.28	83.56	83.56	5.11	7.02	7.02
10	315.00	312.50	312.50	96.48	91.42	90.32	90.32	5.25	6.38	6.38
11	329.50	327.00	326.50	103.45	97.93	96.81	96.59	5.33	6.41	6.63
12	343.00	342.50	342.50	111.06	104.14	103.92	103.92	6.23	6.43	6.43
13	357.50	355.00	355.00	117.05	110.95	109.78	109.78	5.21	6.21	6.21
14	372.00	368.00	368.50	123.07	117.91	115.99	116.23	4.19	5.75	5.56
15	387.50	-	384.00	130.70	125.51	-	123.80	3.97	-	5.28
16	400.00	-	398.00	137.78	131.76	-	130.77	4.37	-	5.09
17	412.00	-	411.50	143.89	137.85	-	137.62	4.20	-	4.36
18	426.50	-	424.00	150.89	145.34	-	144.06	3.68	-	4.52
19	438.00	-	435.00	155.77	151.38	-	149.82	2.82	-	3.82
20	450.00	-	446.00	162.34	157.80	-	155.66	2.80	-	4.12

Como se aprecia en la tabla anterior, para esta prueba la diferencia entre los tirantes medidos es mínima. Lo anterior debido a que la turbulencia a la entrada al modelo fue menos intensa que en pruebas pasadas, esto debido a la lejanía de la pantalla con la entrada al modelo. Las diferencias porcentuales de los gastos calculados en el Parshall comparados con el gasto de referencia llegan hasta el 12.74 % para el tirante medido a la entrada del aforador. Para caudales bajos esta diferencia disminuye como en las demás pruebas.

Se observa, que para el tirante medido en la garganta del Parshall la diferencia porcentual entre este gasto y el caudal de referencia es la más baja.

En la figura 94 se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

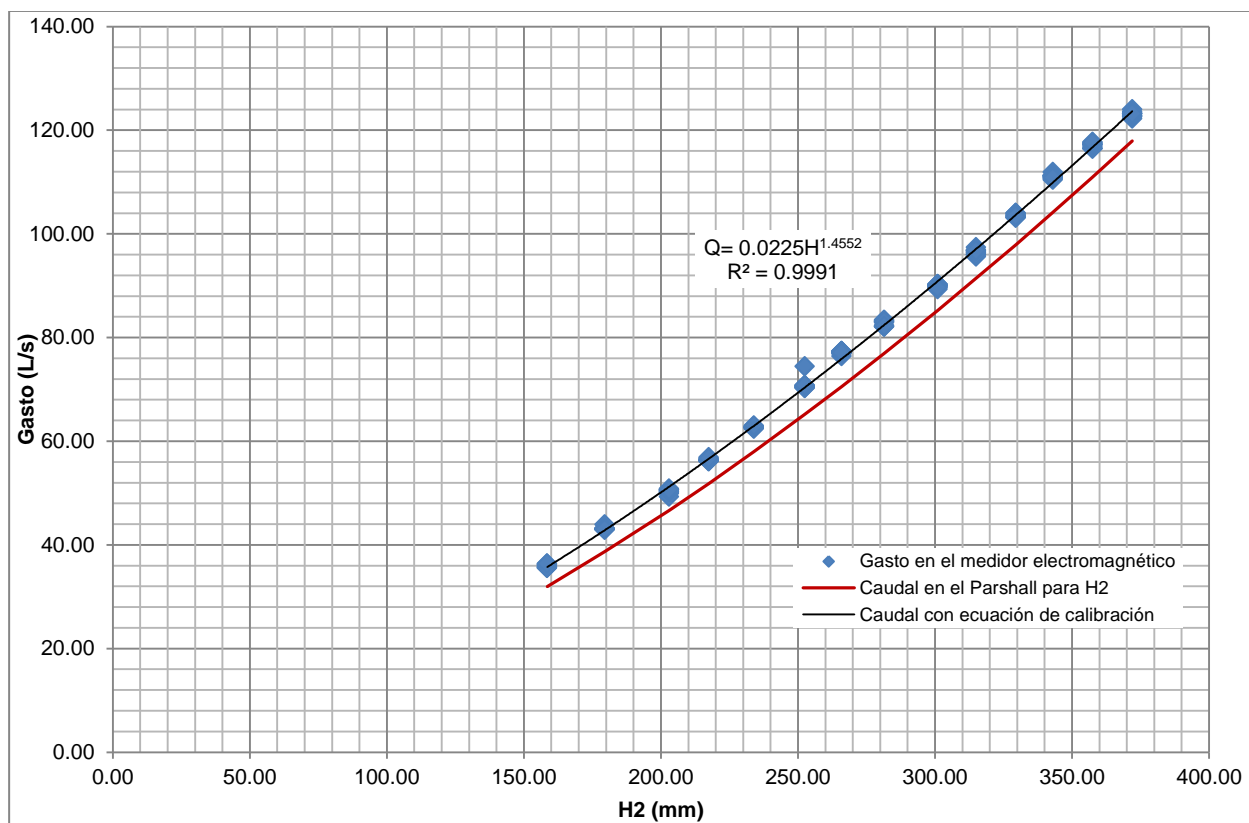


Figura 94. Variación de los caudales colocando la pantalla a 3.00 m.

Como se aprecia, el comportamiento de las curvas es muy similar a los tres casos anteriores, se aprecia que las gráficas obtenidas en el Parshall y con la ecuación de calibración son paralelas entre sí.

En las figuras mostradas a continuación se ve la ubicación de la pantalla en planta y perfil para esta prueba.



Figura 95. Colocación de la pantalla a 3.00 m antes del Parshall, vista en planta.



Figura 96. Colocación de la pantalla a 3.00 m antes del Parshall, vista de perfil.

En esta prueba, al igual que en las anteriores, se observó que para caudales altos se presentaba un flujo turbulento, y por consecuencia las líneas de corriente eran multidireccionales. Cuando el flujo chocó con la pantalla se generaron vórtices (ver figura 97) que fueron perdiendo intensidad a medida que se aproximaban a la entrada al dispositivo. Debido a lo anterior, el valor del tirante hidráulico osciló demasiado por lo que hubo necesidad de realizar dos mediciones para después calcular un promedio.



Figura 97. Formación de vórtices al interceptar el flujo en la pantalla ubicada a 3.00 m.

Por último en la figura 98 presentada a continuación se aprecia la diferencia porcentual de cada una de las posiciones de la pantalla respecto a la ecuación de la ASTM.

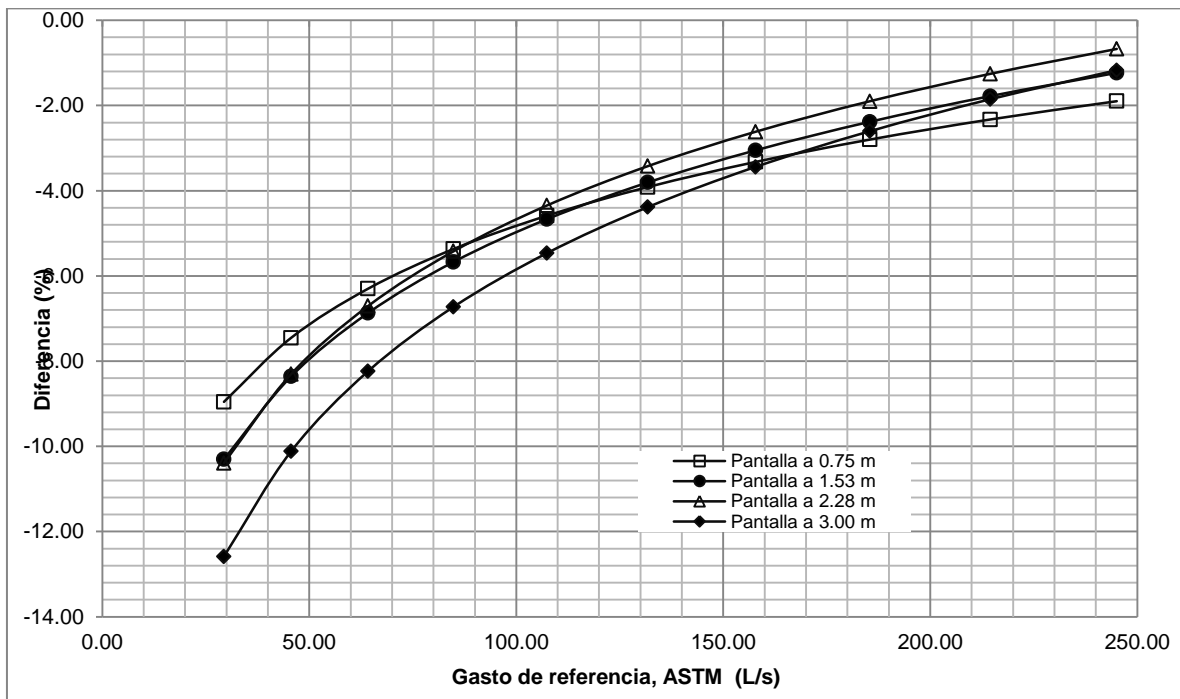


Figura 98. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes ubicaciones de la pantalla.

Como se aprecia en la figura anterior, la pantalla ubicada a 2.28 m es la que tiene una diferencia menor respecto al gasto obtenido con la ecuación de la ASTM. Mientras que la posición de la pantalla ubicada a 3 m es la que más difiere de las cuatro, contrario a lo que podría pensarse.

8.6 Resultados de las pruebas con un desviador aguas arriba del Parshall

Para la ejecución de estas pruebas se colocó un desviador de flujo aguas arriba del aforador a diferentes distancias de la entrada al modelo: 0.75 m, 1.53 m, 2.28 m y 3.00 m. Al igual que la prueba anterior, el objetivo fue observar que sucede con la precisión en la medición en el Parshall al colocar este obstáculo. Cada una de las pruebas se efectuó conforme al diseño experimental visto en el capítulo 6. A continuación se presentan los resultados correspondientes.

8.6.1 Desviador a 0.75 m

La primera ubicación en la que se colocó el desviador de flujo fue a 0.75 m antes de la entrada al aforador. Posteriormente, fijamos el desviador en el canal para que no se moviera durante la prueba. Concluido lo anterior, se procesaron las mediciones y se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 23. Resultados de la prueba colocando un desviador a 0.75 m

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	148.50	148.50	149.50	31.49	28.93	28.93	29.23	8.13	8.11	7.17
2	168.00	167.00	168.00	37.18	34.94	34.63	34.95	6.02	6.86	6.01
3	186.00	186.50	187.00	44.18	40.83	41.00	41.17	7.58	7.19	6.81
4	205.50	205.50	207.00	51.22	47.56	47.56	48.10	7.15	7.14	6.10
5	224.00	224.00	224.00	58.59	54.26	54.27	54.27	7.39	7.37	7.37
6	240.50	238.50	239.50	64.67	60.50	59.74	60.12	6.45	7.63	7.04
7	255.00	254.00	253.50	70.89	66.16	65.78	65.58	6.67	7.21	7.49
8	267.00	266.00	268.00	76.03	70.99	70.59	71.40	6.63	7.15	6.08
9	281.00	279.50	280.00	82.25	76.76	76.15	76.35	6.67	7.42	7.17
10	295.00	294.00	294.50	88.82	82.69	82.27	82.49	6.90	7.37	7.13
11	311.50	309.50	310.00	95.64	89.87	89.00	89.22	6.03	6.94	6.71
12	323.50	323.50	323.00	101.89	95.22	95.23	95.01	6.55	6.53	6.75
13	340.00	338.00	337.50	108.57	102.75	101.84	101.61	5.36	6.20	6.41
14	350.50	349.00	348.00	114.03	107.64	106.96	106.49	5.60	6.20	6.61
15	366.00	364.50	364.00	121.07	115.01	114.31	114.07	5.00	5.58	5.78
16	382.50	-	379.50	128.66	123.04	-	121.58	4.37	-	5.50
17	396.00	-	395.00	136.23	129.75	-	129.26	4.76	-	5.11
18	410.00	-	406.00	141.52	136.83	-	134.81	3.31	-	4.74
19	425.00	-	420.50	149.87	144.56	-	142.25	3.54	-	5.09
20	439.00	-	435.00	157.67	151.93	-	149.82	3.64	-	4.98

Como se aprecia en la tabla anterior, los tirantes medidos presentan cierta diferencia. Lo anterior, debido a que la turbulencia provocada por la cercanía del desviador con la entrada al aforador es muy alta. Las diferencias porcentuales de los gastos calculados en el Parshall comparados con el gasto de referencia llegan hasta el 8.13 % para el tirante medido en la garganta del aforador. Para caudales bajos, esta diferencia va disminuyendo paulatinamente.

Se observa, que para el tirante medido en la garganta del Parshall la diferencia porcentual entre este gasto y el caudal de referencia es la más baja.

En la figura 99 mostrada a continuación se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

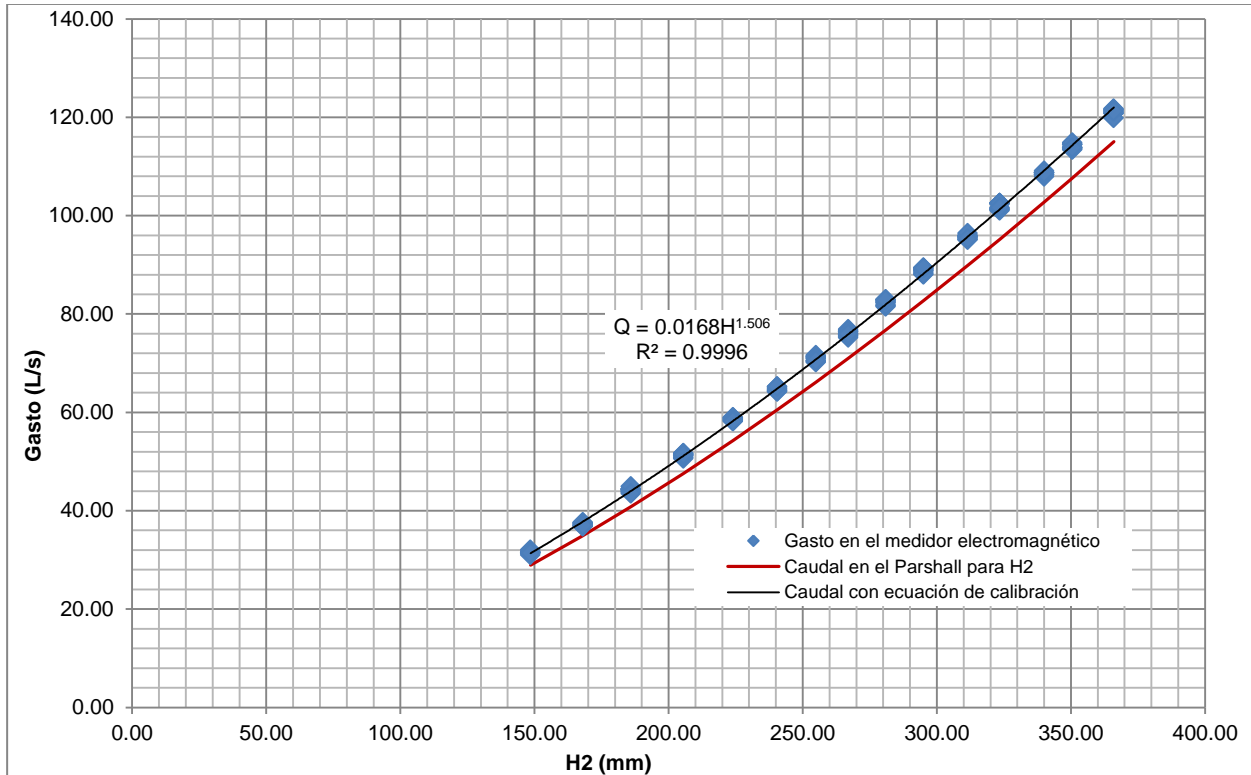


Figura 99. Variación de los caudales colocando un desviador a 0.75 m antes del aforador.

Como se puede apreciar, las curvas de la ASTM y de la ecuación de calibración presentan la misma tendencia y son prácticamente paralelas entre sí. Al comparar los gastos obtenidos con el medidor electromagnético y el Parshall se puede observar que este último está midiendo por debajo de lo que debería.

En la figura 100 y 101 se muestra la ubicación del desviador en planta y perfil para esta prueba.

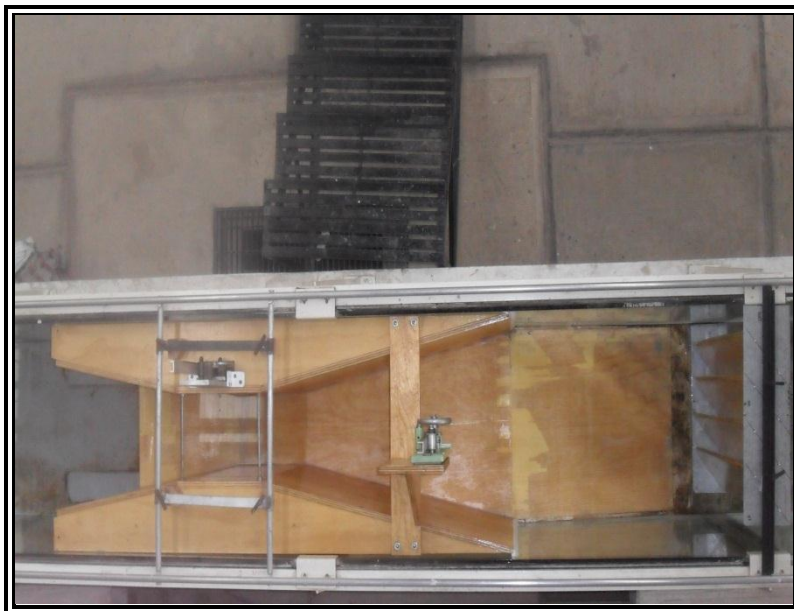


Figura 100. Colocación del desviador a 0.75 m antes del Parshall, vista en planta.



Figura 101. Colocación del desviador a 0.75 m antes del Parshall, vista de perfil.

Durante el desarrollo de esta prueba, se pudo observar que el desviador al estar colocado tan cerca de la entrada al aforador generaba una gran turbulencia al flujo, lo que provocó que la medición de los tirantes se dificultara un poco, por lo que fue necesario tomar dos lecturas en los limnómetros colocados a la entrada y en la garganta del modelo respectivamente. Cuando el flujo aguas arriba hacia contacto con el desviador se generaron vórtices (ver figura 102) de gran intensidad que prácticamente continuaban hasta la entrada al modelo lo que afectó considerablemente a la medición de los tirantes.

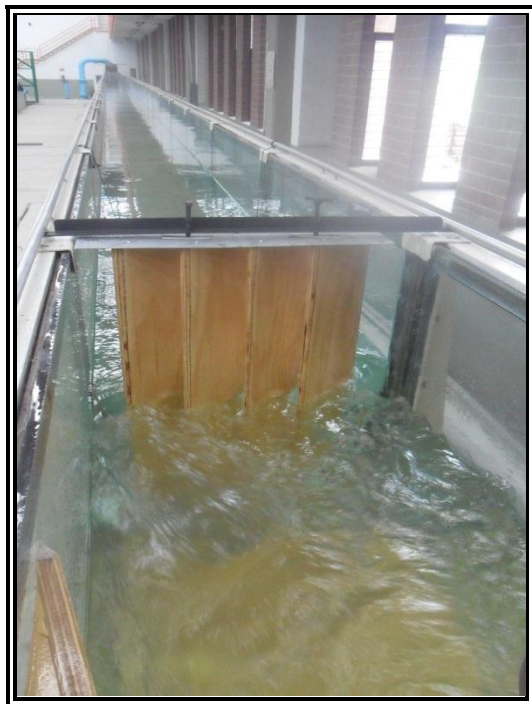


Figura 102. Generación de vórtices al interceptar el flujo en el desviador ubicado a 0.75 m antes de la entrada al modelo.

8.6.2 Desviador a 1.53 m

La segunda posición en la que se colocó el desviador de flujo fue a 1.53 m antes de la entrada al modelo. Posteriormente, fijamos el desviador en el canal para que no tuviera movimiento durante la prueba. Terminado lo anterior, se procesaron las mediciones y se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 24.

Tabla 24. Resultados de la prueba colocando un desviador a 1.53 m

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	141.50	141.00	143.00	29.24	26.87	26.73	27.31	8.10	8.59	6.60
2	165.00	165.50	165.50	36.71	33.99	34.15	34.15	7.41	6.96	6.96
3	182.00	180.50	182.00	41.73	39.49	39.00	39.50	5.36	6.54	5.35
4	200.50	200.00	201.00	48.24	45.80	45.63	45.98	5.06	5.41	4.68
5	219.00	219.50	220.00	56.34	52.42	52.61	52.79	6.96	6.62	6.29
6	235.50	235.50	236.00	61.83	58.58	58.59	58.78	5.25	5.24	4.93
7	253.00	252.50	253.00	69.96	65.37	65.18	65.38	6.56	6.83	6.54
8	269.00	268.00	269.00	76.17	71.80	71.40	71.81	5.73	6.26	5.72
9	282.00	279.50	281.00	82.22	77.18	76.15	76.77	6.13	7.39	6.63
10	296.00	295.50	296.50	88.14	83.12	82.92	83.34	5.70	5.93	5.44
11	314.00	313.50	314.00	96.17	90.97	90.77	90.99	5.40	5.62	5.39
12	329.50	328.00	328.50	103.22	97.93	97.27	97.49	5.12	5.77	5.55
13	343.00	342.50	343.00	110.13	104.14	103.92	104.16	5.44	5.64	5.43
14	359.00	351.50	357.00	116.91	111.66	108.13	110.73	4.49	7.51	5.29
15	371.00	369.00	370.00	123.17	117.42	116.47	116.96	4.66	5.44	5.04
16	385.50	-	383.00	129.76	124.52	-	123.30	4.04	-	4.98
17	400.00	-	398.00	136.75	131.76	-	130.77	3.65	-	4.37
18	412.00	-	410.00	142.51	137.85	-	136.85	3.27	-	3.97
19	425.50	-	422.00	149.00	144.82	-	143.02	2.80	-	4.01
20	439.00	-	435.00	156.52	151.93	-	149.82	2.93	-	4.28

De la tabla anterior se aprecia que los tirantes medidos presentan una pequeña diferencia. Lo anterior, debido a que la turbulencia provocada por la cercanía del desviador con la entrada al aforador. Las diferencias porcentuales de los gastos calculados en el Parshall comparados con el gasto de referencia llegan hasta el 8.59 % para el tirante a la entrada del aforador. Para caudales bajos, esta diferencia va disminuyendo paulatinamente.

Se aprecia, que para el tirante medido en la garganta del Parshall la diferencia porcentual entre este gasto y el caudal de referencia es la más baja.

En la figura 103 presentada a continuación se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

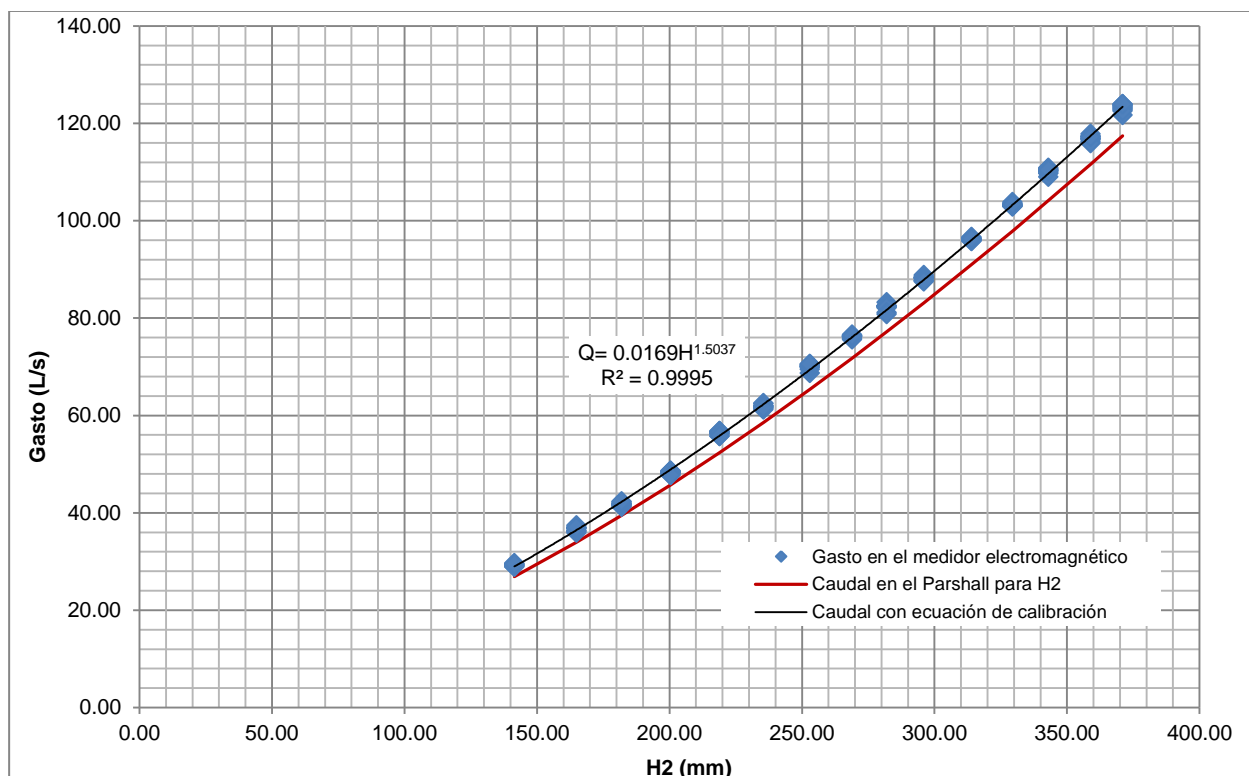


Figura 103. Variación de los caudales colocando un desviador a 1.53 m antes del aforador.

Como se puede apreciar, las curvas de la ASTM y de la ecuación de calibración presentan la misma tendencia y son prácticamente paralelas entre sí. Al comparar los gastos obtenidos con el medidor electromagnético y el Parshall se puede observar que este último está midiendo por debajo de lo que debería.

En la figura 104 y 105 se muestra la ubicación del desviador en planta y perfil para esta prueba.



Figura 104. Colocación del desviador a 1.53 m antes del dispositivo, vista en planta.



Figura 105. Colocación del desviador a 1.53 m antes del dispositivo, vista de perfil.

En esta prueba, se pudo ver que el desviador al estar ubicado cerca del aforador generaba una gran turbulencia al flujo, lo que provocó que la medición de los tirantes se dificultara, por lo que fue necesario tomar dos lecturas en los limnímetros colocados a la entrada y en la garganta del modelo respectivamente. Cuando el flujo aguas arriba chocaba con el desviador se produjeron vórtices (ver figura 106) de gran intensidad que continuaban hasta la entrada al aforador lo que afectó considerablemente a la medición de los tirantes.

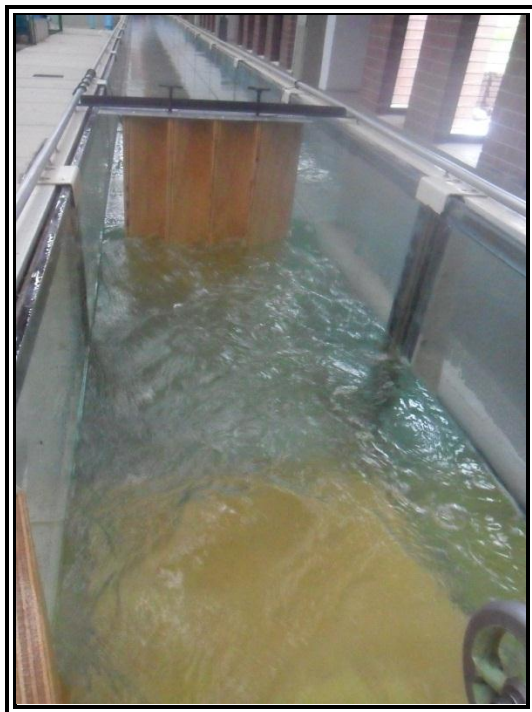


Figura 106. Generación de vórtices al interceptar el flujo en el desviador ubicado a 1.53 m antes de la entrada al modelo.

8.6.3 Desviador a 2.28 m

En esta prueba se colocó el desviador de flujo a 2.28 m antes de la entrada al modelo. Posteriormente, fijamos el desviador en el canal para que no tuviera movimiento durante la prueba. Concluido lo anterior, se procesaron las mediciones y se obtuvieron los resultados que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 25. Resultados de la prueba colocando un desviador a 2.28 m

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	143.00	140.00	144.00	29.54	27.31	26.44	27.60	7.56	10.50	6.55
2	171.00	165.50	165.00	36.07	35.90	34.15	34.00	0.47	5.31	5.75
3	186.00	186.50	188.00	43.79	40.83	41.00	41.51	6.76	6.36	5.21
4	208.50	208.50	210.00	51.79	48.62	48.63	49.17	6.11	6.10	5.06
5	226.50	226.50	228.00	58.46	55.19	55.20	55.76	5.59	5.58	4.62
6	241.50	239.50	240.00	64.58	60.88	60.12	60.31	5.73	6.91	6.61
7	252.00	254.00	255.00	70.47	64.98	65.78	66.17	7.79	6.66	6.10
8	272.50	272.00	273.00	78.27	73.24	73.04	73.45	6.43	6.68	6.15
9	289.00	287.50	289.00	84.55	80.13	79.51	80.14	5.23	5.97	5.21
10	305.50	304.00	305.00	91.76	87.23	86.59	87.03	4.93	5.63	5.16
11	320.00	318.50	318.00	97.92	93.65	92.99	92.77	4.36	5.03	5.26
12	334.00	332.00	332.00	104.65	99.99	99.09	99.09	4.45	5.31	5.31
13	343.00	343.50	344.00	110.23	104.14	104.39	104.62	5.52	5.30	5.09
14	362.00	359.00	360.00	117.90	113.09	111.68	112.16	4.08	5.28	4.87
15	375.50	372.50	374.00	125.11	119.61	118.17	118.90	4.40	5.55	4.97
16	390.00	-	387.00	131.22	126.75	-	125.28	3.41	-	4.53
17	403.00	-	400.00	137.33	133.27	-	131.78	2.96	-	4.04
18	416.00	-	413.00	144.74	139.90	-	138.38	3.34	-	4.39
19	428.50	-	425.00	150.55	146.39	-	144.58	2.77	-	3.96
20	443.50	-	439.00	158.70	154.32	-	151.93	2.76	-	4.26

En la tabla 25 se muestra que los tirantes medidos presentan una diferencia significativa en algunos gastos. Lo anterior, debido a que la turbulencia provocada por el desviador con la entrada al aforador era muy alta. Las diferencias porcentuales de los gastos calculados en el Parshall comparados con el gasto de referencia llegan hasta el 10.50 % para el tirante medido a la entrada del aforador. Para gastos bajos, esta diferencia va disminuyendo considerablemente.

Se muestra también, que para el tirante medido en la garganta del Parshall la diferencia porcentual entre este gasto y el caudal de referencia es la más baja.

En la siguiente figura se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

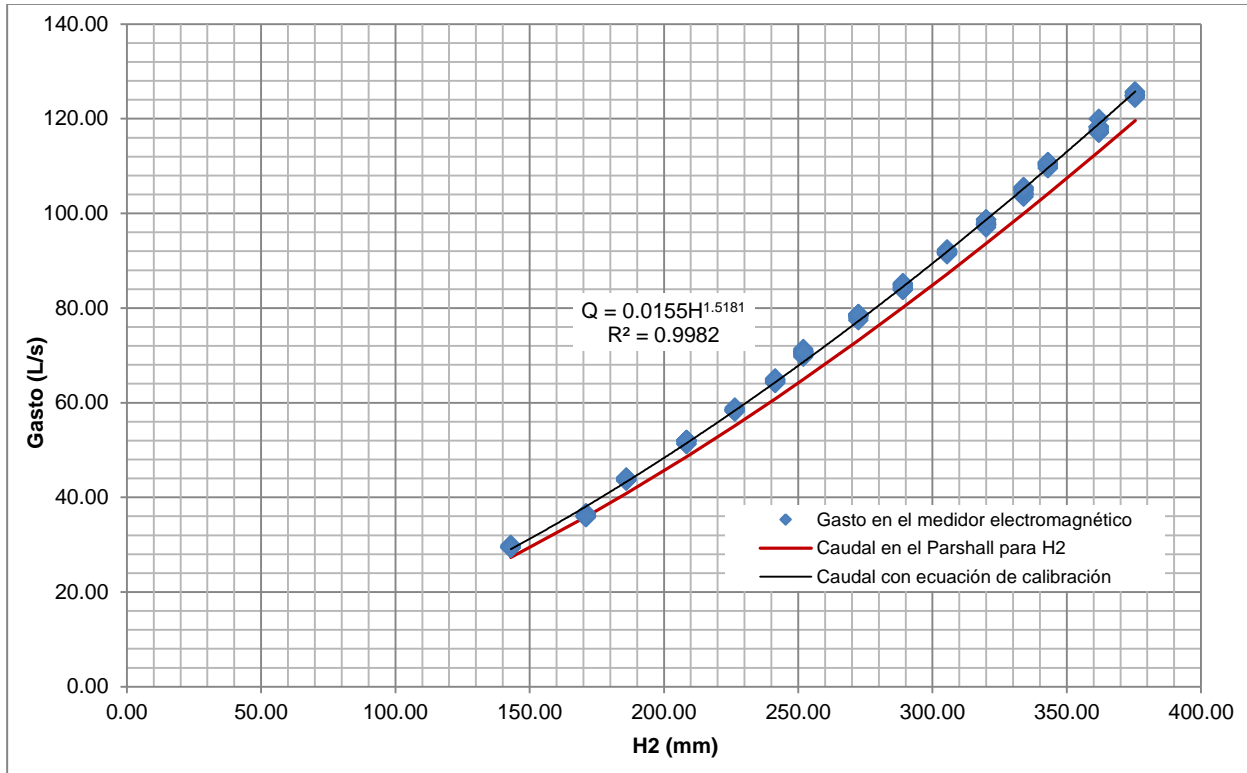


Figura 107. Variación de los caudales colocando un desviador a 2.28 m antes del aforador.

De la figura anterior se puede apreciar que las curvas de la ASTM y de la ecuación de calibración presentan la misma tendencia y son prácticamente paralelas para gastos por encima de 90 L/s. Al comparar los gastos obtenidos con el medidor electromagnético y el Parshall se puede observar que este último está midiendo por debajo de lo que debería.

En las siguientes figuras se muestra la ubicación del desviador en planta y perfil para esta prueba.



Figura 108. Colocación del desviador a 2.28 m antes del modelo, vista en planta.



Figura 109. Colocación del desviador a 2.28 m antes del modelo, vista de perfil.

Durante esta prueba, se pudo observar que el desviador al estar ubicado un poco más lejos de la entrada al aforador, provocó que la turbulencia generada llegara a la entrada al modelo con menor intensidad que en las pruebas anteriores, lo que ocasionó que la variación de los tirantes disminuyera notablemente, aun así fue necesario tomar dos lecturas en los limnímetros colocados a la entrada y en la garganta del modelo respectivamente. Cuando el flujo aguas arriba hacia contacto con el desviador se produjeron vórtices (ver figura 110) de gran intensidad que fueron disminuyendo conforme se acercaba a la entrada al aforador.

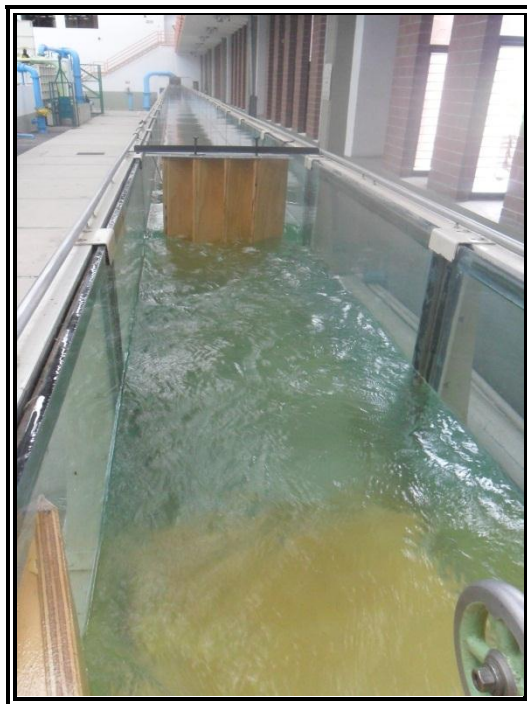


Figura 110. Generación de vórtices al interceptar el flujo en el desviador ubicado a 2.28 m antes de la entrada al modelo.

8.6.4 Desviador a 3.00 m

La última posición en la que se colocó el desviador de flujo fue a 3.00 m aguas arriba de la entrada al modelo. Después, fijamos el desviador en el canal para que no tuviera movimiento durante la prueba. Terminado lo anterior, se procesaron las mediciones y se obtuvieron los resultados expuestos en la tabla 26.

Tabla 26. Resultados de la prueba colocando un desviador a 3.00 m

n	H2 (mm)	H1 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H2	H1	H _{pozo}	H2	H1	H _{pozo}
1	153.50	154.00	156.00	32.61	30.43	30.59	31.20	6.67	6.19	4.32
2	179.00	172.50	181.00	41.41	38.50	36.39	39.17	7.02	12.13	5.41
3	198.00	198.50	198.00	48.34	44.93	45.11	44.93	7.06	6.69	7.05
4	220.50	215.50	218.00	55.03	52.97	51.15	52.06	3.74	7.05	5.39
5	234.00	233.00	235.00	61.79	58.01	57.64	58.40	6.11	6.71	5.49
6	249.00	249.00	250.00	68.33	63.80	63.81	64.20	6.63	6.62	6.05
7	266.00	265.00	267.00	74.95	70.58	70.19	71.00	5.83	6.36	5.27
8	280.00	278.00	279.00	80.47	76.34	75.52	75.94	5.13	6.15	5.63
9	295.00	293.00	294.50	86.93	82.69	81.84	82.49	4.88	5.85	5.11
10	307.00	304.50	306.50	92.59	87.89	86.81	87.68	5.08	6.24	5.30
11	321.00	319.00	320.00	98.58	94.10	93.21	93.66	4.55	5.44	4.99
12	335.00	334.00	335.00	105.44	100.45	100.00	100.46	4.74	5.16	4.72
13	348.50	347.00	348.00	111.94	106.71	106.02	106.49	4.68	5.29	4.87
14	364.00	361.50	362.00	118.43	114.05	112.87	113.11	3.70	4.69	4.49
15	378.00	372.00	376.00	125.23	120.83	117.93	119.87	3.51	5.83	4.28
16	393.00	-	390.00	132.07	128.24	-	126.77	2.90	-	4.01
17	406.50	-	404.00	139.63	135.05	-	133.80	3.28	-	4.18
18	418.00	-	417.00	145.68	140.93	-	140.44	3.26	-	3.60
19	433.50	-	430.00	153.43	149.01	-	147.19	2.88	-	4.06
20	444.50	-	442.00	159.94	154.86	-	153.52	3.18	-	4.01

De la tabla anterior, se aprecia que los tirantes medidos presentan una pequeña diferencia para algunos gastos, mientras que para otros, la diferencia es significativa. Lo anterior, debido a la turbulencia provocada por el desviador. Las diferencias porcentuales de los gastos calculados en el Parshall comparados con el gasto de referencia llegan hasta el 6.67 % para el tirante medido en la garganta del aforador.

Para caudales bajos, esta diferencia va disminuyendo paulatinamente. Se aprecia también que para esta posición del desviador, las diferencias en general son menores que en las posiciones anteriores.

También se muestra, que para el tirante medido en la garganta del Parshall la diferencia porcentual entre este gasto y el caudal de referencia es la más baja.

En la figura 111 se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H2 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

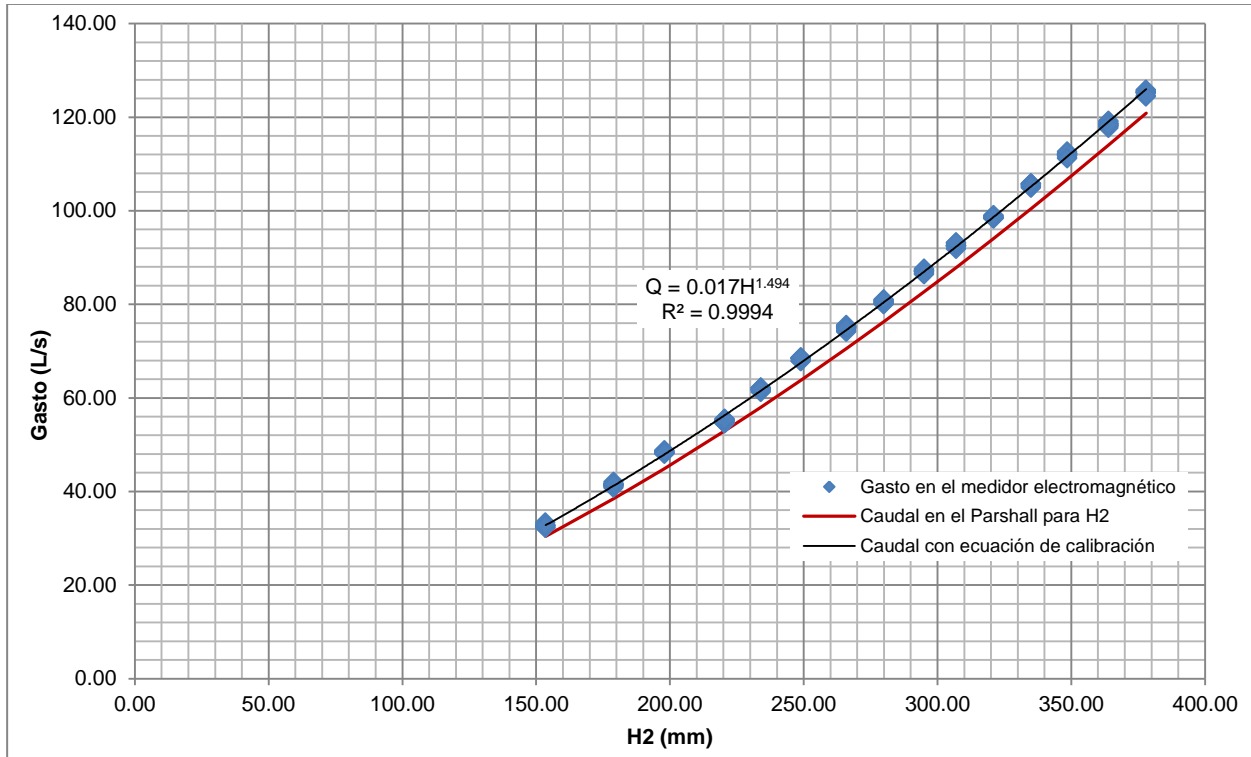


Figura 111. Variación de los caudales colocando un desviador a 3.00 m antes del aforador.

De la figura anterior se puede apreciar que las curvas de la ASTM y de la ecuación de calibración presentan la misma tendencia y son prácticamente paralelas. Al comparar los gastos obtenidos con el medidor electromagnético y el Parshall se puede observar que este último está midiendo por debajo de lo que debería.

En las siguientes figuras se muestra la ubicación del desviador en planta y perfil para esta prueba.



Figura 112. Colocación del desviador a 3.00 m antes del aforador, vista en planta.

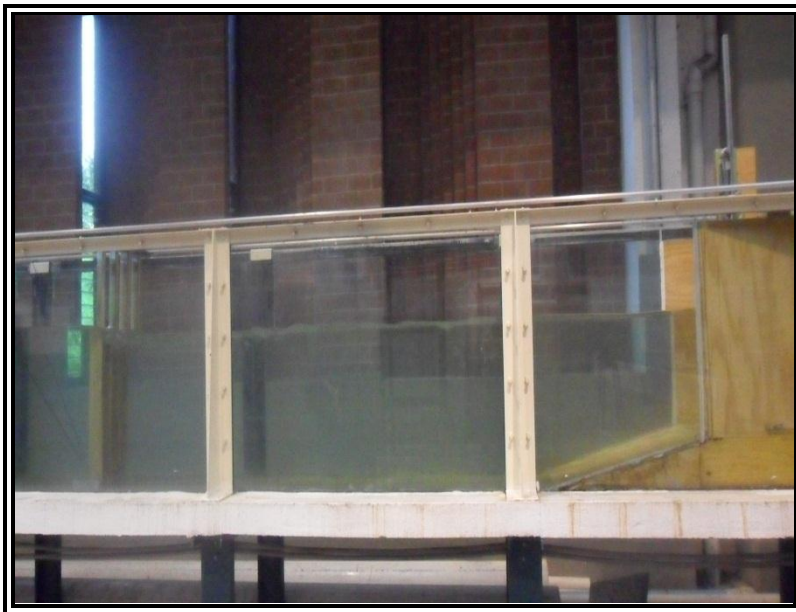


Figura 113. Colocación del desviador a 2.28 m antes del aforador, vista de perfil.

En el desarrollo esta prueba, se pudo observar que el desviador al estar ubicado a 3 m de la entrada al aforador, no afectaba la medición en el mismo, por lo que no producía variación de los tirantes en el modelo. Cuando el flujo aguas arriba hacia contacto con el desviador se produjeron vórtices (ver figura 114) de gran intensidad que a medida que el flujo continuaba su trayectoria estos fueron disipándose, de tal manera que a la entrada al dispositivo ya no existían vórtices circulando. Las líneas de corriente al pasar por el desviador no eran unidireccionales pero conforme se acercaban a la entrada del Parshall, el flujo se fue estabilizando.



Figura 114. Disipación de vórtices en el desviador ubicado a 3.00 m antes de la entrada al modelo.

Por último, en la figura 115 se muestra la diferencia porcentual de cada gasto calculado para cada posición del desviador respecto a la ecuación de la ASTM.

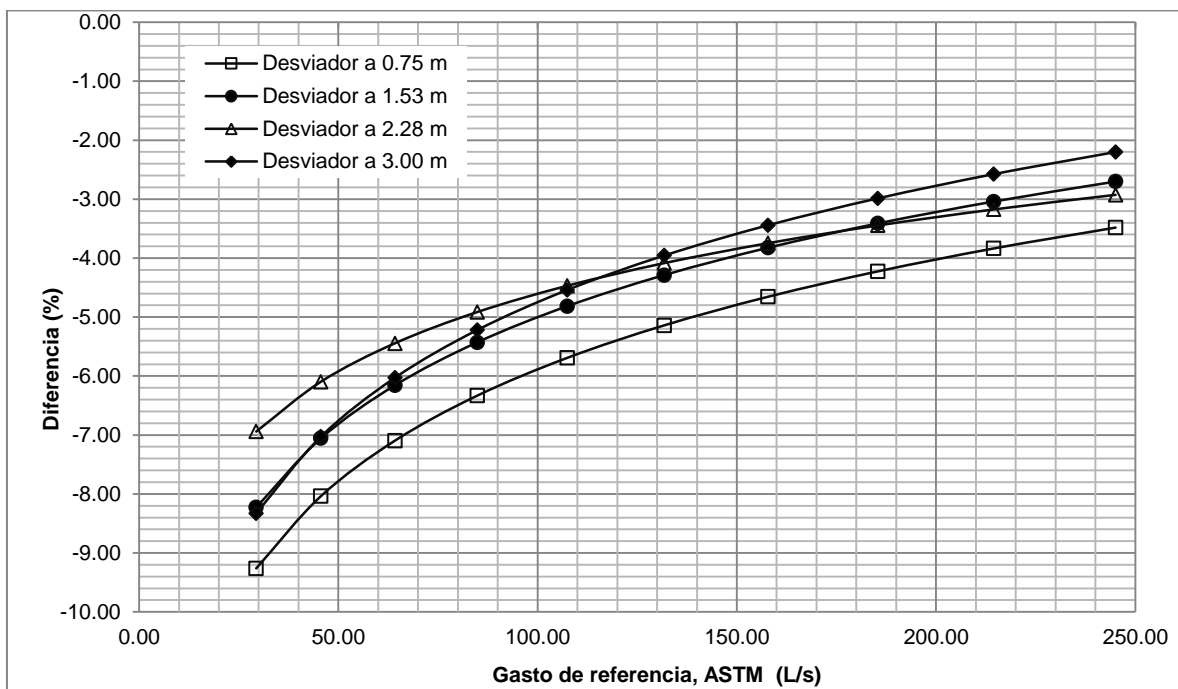


Figura 115. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes posiciones del desviador.

En la figura anterior se muestra que los gastos calculados cuando el desviador está colocado a distancias mayores antes de la entrada al aforador, presentan menores diferencias respecto al gasto de referencia de la ASTM. En cambio, cuando el desviador se encuentra más cerca del aforador, las diferencias porcentuales incrementan considerablemente.

8.7 Resultados de las pruebas con pendientes diferentes

Estas pruebas se llevaron a cabo en el canal de pendiente variable. Para ello, se ajustó el canal a cinco pendientes diferentes: $S=-0.0060$, $S=0$, $S=0.0003$, $S=0.0102$ y $S=0.0192$. El objetivo de esta prueba fue observar que sucede con la precisión en la medición en el Parshall al someterlo a diferentes inclinaciones. Cada una de las pruebas se realizó conforme al diseño experimental visto en el capítulo 6. A continuación se presentan los resultados correspondientes. La pendiente del canal para cada prueba se ajustó el mecanismo presentado en la figura 116.

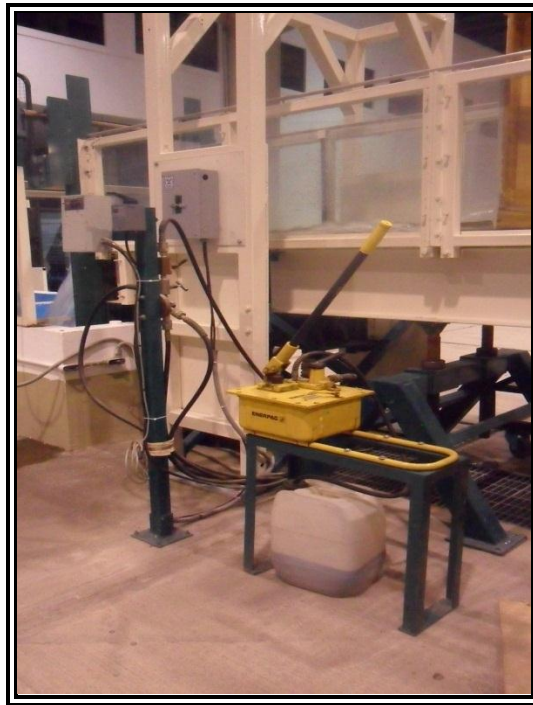


Figura 116. Mecanismos para ajustar la pendiente del canal.

8.7.1 Pendiente $S = - 0.0060$

En esta prueba, la elevación del canal fue ascendiendo de aguas arriba hacia aguas abajo, es decir, en el sentido del flujo, presentándose un desnivel de 10.8 cm. La pendiente del canal se ajustó a una pendiente ascendente de $S=-0.0060$. El objetivo de esta prueba fue ver la precisión en la medición en el Parshall si se tiene una pendiente negativa. En la siguiente figura se muestra ésta inclinación.



Figura 117. Canal de pendiente variable con $S = -0.0060$.

En la tabla 27 mostrada a continuación, se aprecian los resultados obtenidos para esta prueba.

Tabla 27. Resultados de la prueba con una pendiente $S=-0.0060$

n	H1 (mm)	H2 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H1	H2	H _{pozo}	H1	H2	H _{pozo}
1	131.50	127.00	129.00	20.49	24.02	22.78	23.33	17.23	11.16	13.85
2	156.00	151.00	153.50	25.36	31.20	29.68	30.44	23.01	17.05	20.03
3	176.50	172.00	173.50	30.22	37.68	36.23	36.71	24.69	19.88	21.48
4	197.00	193.50	194.50	35.10	44.58	43.38	43.72	27.01	23.59	24.57
5	217.50	213.50	215.00	40.43	51.87	50.43	50.97	28.30	24.73	26.07
6	236.50	232.00	233.00	45.42	58.96	57.26	57.64	29.82	26.08	26.91
7	252.00	247.50	249.00	49.86	64.98	63.22	63.81	30.32	26.79	27.97
8	270.50	265.50	267.00	55.02	72.42	70.39	71.00	31.62	27.93	29.04
9	290.50	285.00	286.00	60.81	80.77	78.45	78.87	32.82	29.01	29.70
10	306.00	300.00	300.00	65.38	87.45	84.85	84.85	33.76	29.79	29.79

De la tabla anterior, se puede apreciar que existe una diferencia importante entre los valores medidos de los tirantes hidráulicos, esto debido a la inclinación del canal. Para H1 se tuvieron los valores más altos, mientras que para H2 los más bajos. A medida que el caudal aumenta, la diferencia entre los gastos calculados en el aforador y el registrado en el medidor electromagnético aumenta. Se puede apreciar, que las diferencias porcentuales son muy altas, de 33.76 % en el tirante medido a la entrada al Parshall.

En la figura 118 se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H1 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

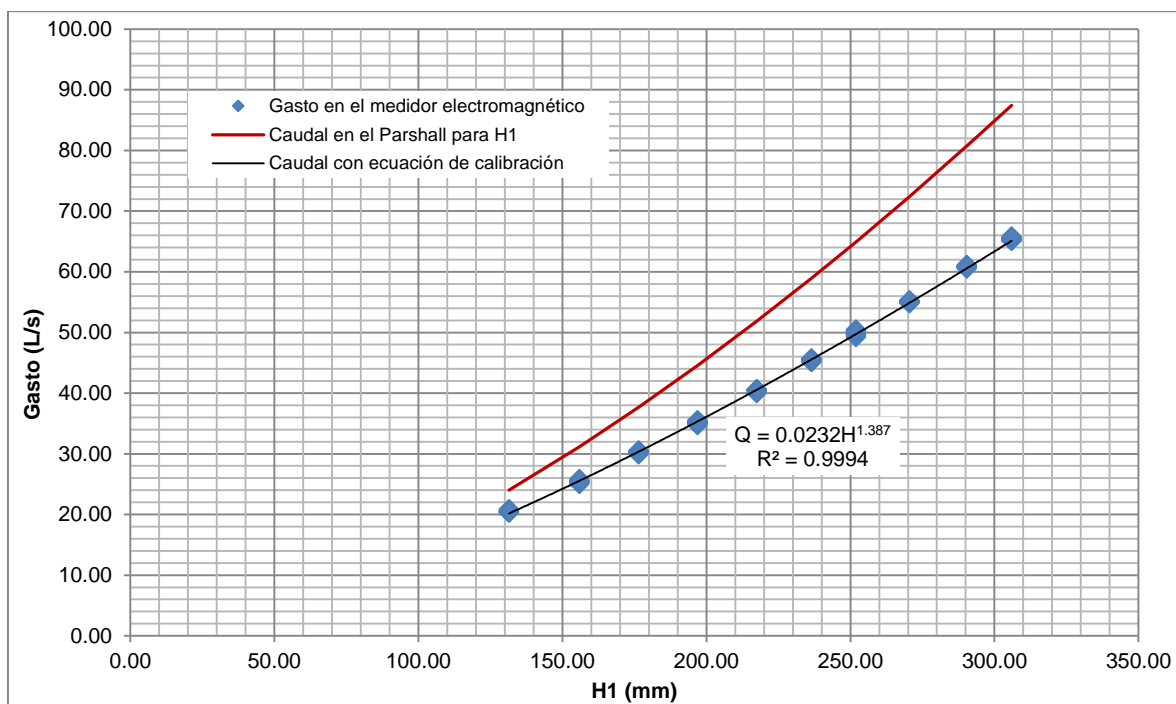


Figura 118. Variación de los caudales con una pendiente $S=-0.0060$.

De la gráfica anterior, se aprecia que la curva de calibración y la curva de la ASTM son muy diferentes, ya que no coinciden en ningún punto. El gasto calculado en el aforador está por encima de los caudales registrados en el medidor electromagnético.

En el desarrollo de esta prueba se observó un flujo lento, la velocidad del agua fue muy baja, las líneas de corriente fueron paralelas a la plantilla y en general se presentó un flujo tranquilo durante toda la prueba. En la figura siguiente se aprecia lo mencionado anteriormente.

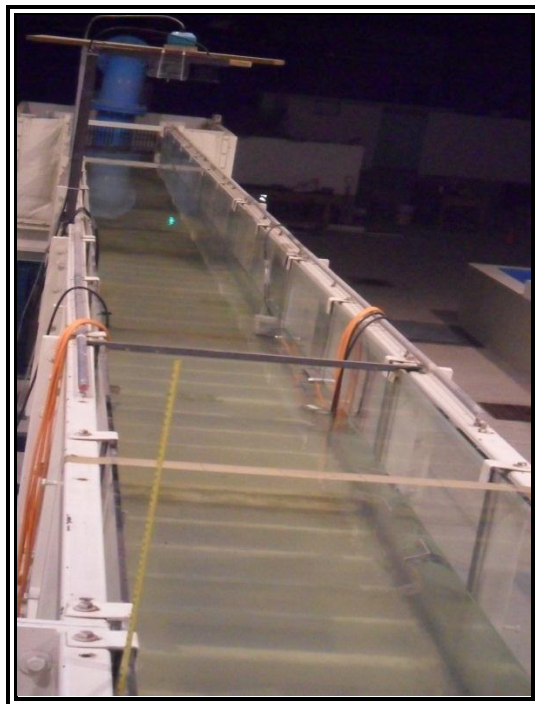


Figura 119. Condiciones hidráulicas presentadas con $S = - 0.0060$.

8.7.2 Pendiente $S = 0$

Para esta prueba, el canal de pendiente variable se encontraba en posición horizontal, por lo que la pendiente fue nula (ver figura 120). Al igual que la prueba anterior, el objetivo fue ver la precisión en la medición en el Parshall si se tiene una pendiente nula. En la siguiente figura se muestra esta posición del canal.



Figura 120. Canal de pendiente variable con $S = 0$.

En la tabla 28, se aprecian los resultados obtenidos para esta prueba.

Tabla 28. Resultados de la prueba con una pendiente $S=0$

n	H1 (mm)	H2 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H1	H2	H _{pozo}	H1	H2	H _{pozo}
1	136.00	135.50	135.50	20.54	25.29	25.15	25.15	23.12	22.45	22.45
2	156.00	156.00	156.50	25.01	31.20	31.20	31.35	24.73	24.75	25.36
3	174.00	178.50	179.00	30.06	36.87	38.34	38.51	22.65	27.56	28.10
4	197.50	198.50	199.00	35.22	44.75	45.11	45.28	27.07	28.08	28.57
5	218.00	216.50	218.00	39.79	52.05	51.51	52.06	30.82	29.47	30.84
6	236.00	235.50	237.00	45.03	58.77	58.59	59.16	30.52	30.11	31.38
7	255.00	255.00	255.50	50.43	66.16	66.17	66.37	31.20	31.22	31.61
8	272.50	272.00	273.00	55.05	73.24	73.04	73.45	33.04	32.68	33.43
9	290.50	290.50	291.00	60.43	80.77	80.78	80.99	33.65	33.67	34.02
10	305.50	304.50	304.00	64.76	87.23	86.81	86.59	34.70	34.05	33.71

Con base en la tabla anterior, se puede notar que para algunos gastos existe una diferencia en los valores medidos de los tirantes hidráulicos. A medida que el gasto aumenta, la diferencia entre los gastos calculados en el aforador y el registrado en el medidor electromagnético aumenta. Se puede apreciar, que las diferencias porcentuales son muy altas, de 34.70 % en el tirante medido a la entrada al Parshall.

En la figura mostrada enseguida se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H1 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

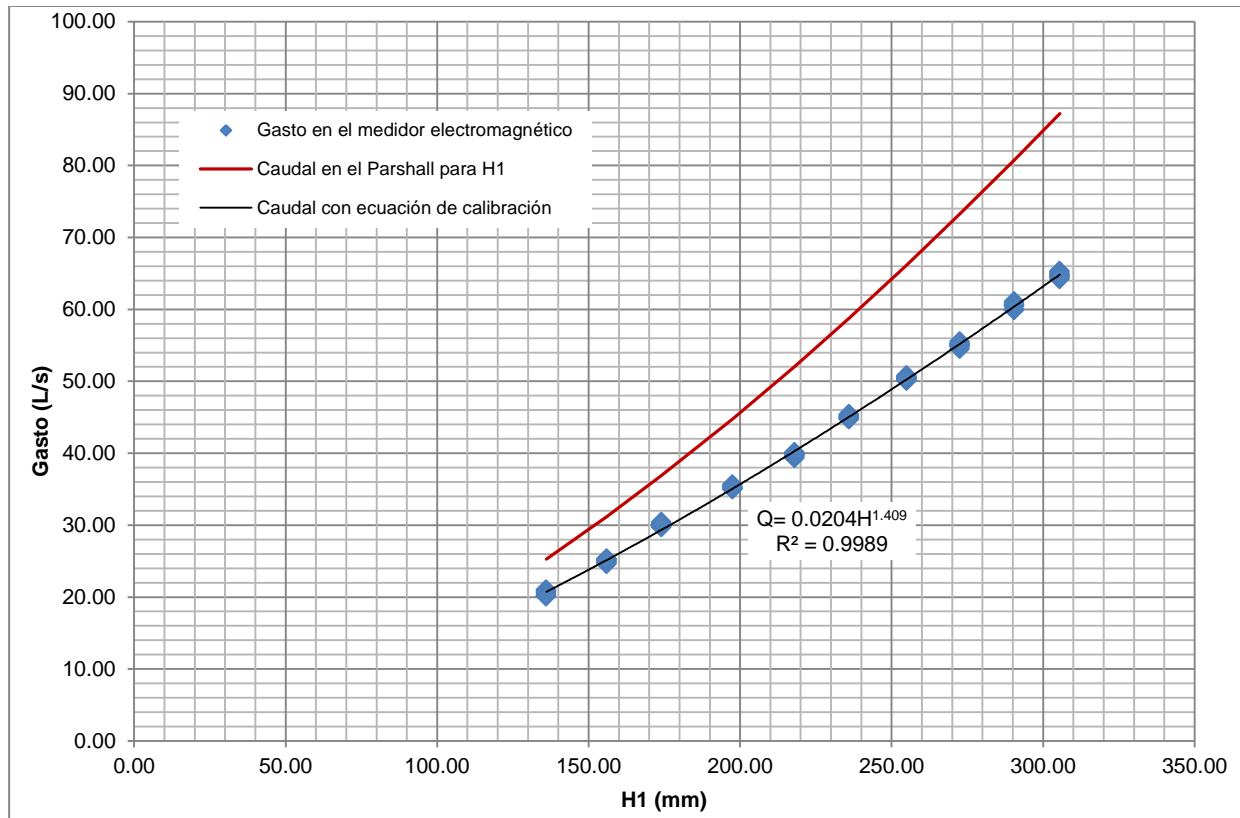


Figura 121. Variación de los caudales con una pendiente S=0.

De la gráfica anterior y al igual que en el caso anterior, se aprecia que la curva de calibración y la curva de la ASTM son muy diferentes, ya que no coinciden en ningún punto. El gasto calculado en el aforador está por encima de los caudales registrados en el medidor electromagnético.

Durante esta prueba se observó un flujo lento antes de la entrada al modelo, la velocidad del agua fue muy baja, las líneas de corriente fueron paralelas a la plantilla y en general se presentó un flujo lento aguas arriba del Parshall. Una vez que el flujo entro al Parshall se presentó cierto grado de turbulencia (ver figura 122), aunque esta fue mínima. Los tirantes se pudieron medir sin ningún problema, se procesó la información y se obtuvieron los resultados respectivos.



Figura 122. Generación de una pequeña turbulencia a la entrada al Parshall para $S=0$.

8.7.3 Pendiente $S = 0.0003$

Para esta prueba, la elevación del canal fue descendiendo de aguas arriba hacia aguas abajo, es decir, en el sentido del flujo, presentándose un desnivel de 6 mm. La pendiente del canal se ajustó a una pendiente descendente de $S=0.0003$, se eligió este valor ya que es una pendiente que se presenta comúnmente en canales de riego. Al igual que en pruebas anteriores, el objetivo fue ver la precisión en la medición en el Parshall bajo estas condiciones. En la figura 123 se muestra ésta inclinación.

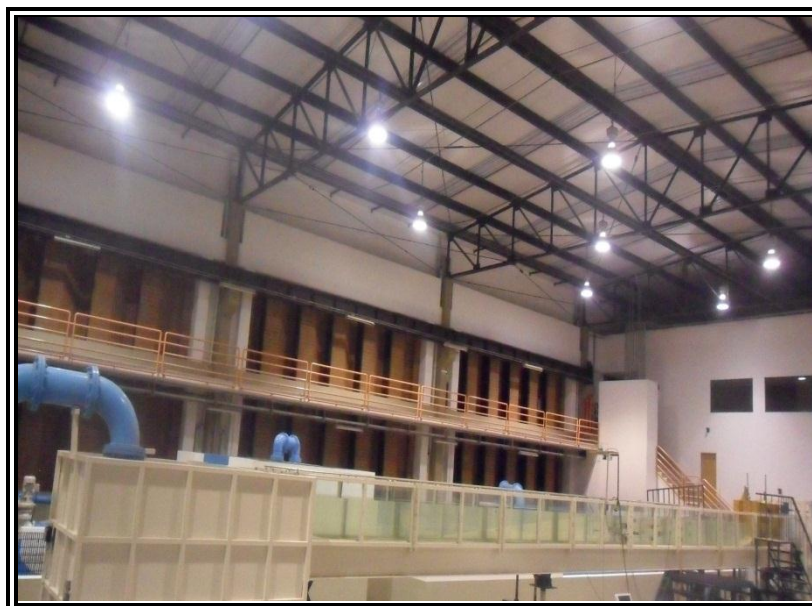


Figura 123. Canal de pendiente variable con $S = 0.0003$.

En tabla siguiente, se presentan los resultados obtenidos para esta prueba.

Tabla 29. Resultados de la prueba con una pendiente $S=0.0003$

n	H1 (mm)	H2 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H1	H2	H _{pozo}	H1	H2	H _{pozo}
1	137.50	138.00	139.00	20.50	25.72	25.86	26.15	25.45	26.17	27.57
2	159.50	160.00	160.50	25.13	32.27	32.43	32.59	28.43	29.06	29.68
3	181.00	182.50	182.00	30.44	39.16	39.67	39.50	28.65	30.31	29.76
4	203.00	201.50	203.00	35.28	46.68	46.16	46.68	32.30	30.83	32.32
5	221.50	220.50	221.00	39.95	53.34	52.98	53.16	33.51	32.61	33.07
6	239.00	238.50	240.00	45.07	59.92	59.74	60.31	32.95	32.54	33.82
7	257.00	256.50	257.00	50.03	66.96	66.77	66.97	33.84	33.46	33.86
8	273.50	273.50	275.00	55.01	73.65	73.66	74.28	33.88	33.90	35.03
9	290.00	290.50	291.00	60.10	80.55	80.78	80.99	34.03	34.41	34.76
10	308.00	307.50	306.00	65.44	88.33	88.12	87.47	34.98	34.66	33.66

Con ayuda de la tabla anterior, se puede ver que para algunos gastos existe una diferencia en los valores medidos de los tirantes hidráulicos. A medida que el gasto aumenta, la diferencia entre los gastos calculados en el aforador y el registrado en el medidor electromagnético aumenta. Se puede apreciar, que las diferencias porcentuales son muy altas, de 34.98 % en el tirante medido a la entrada al Parshall.

En la figura 124 mostrada a continuación, se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H1 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

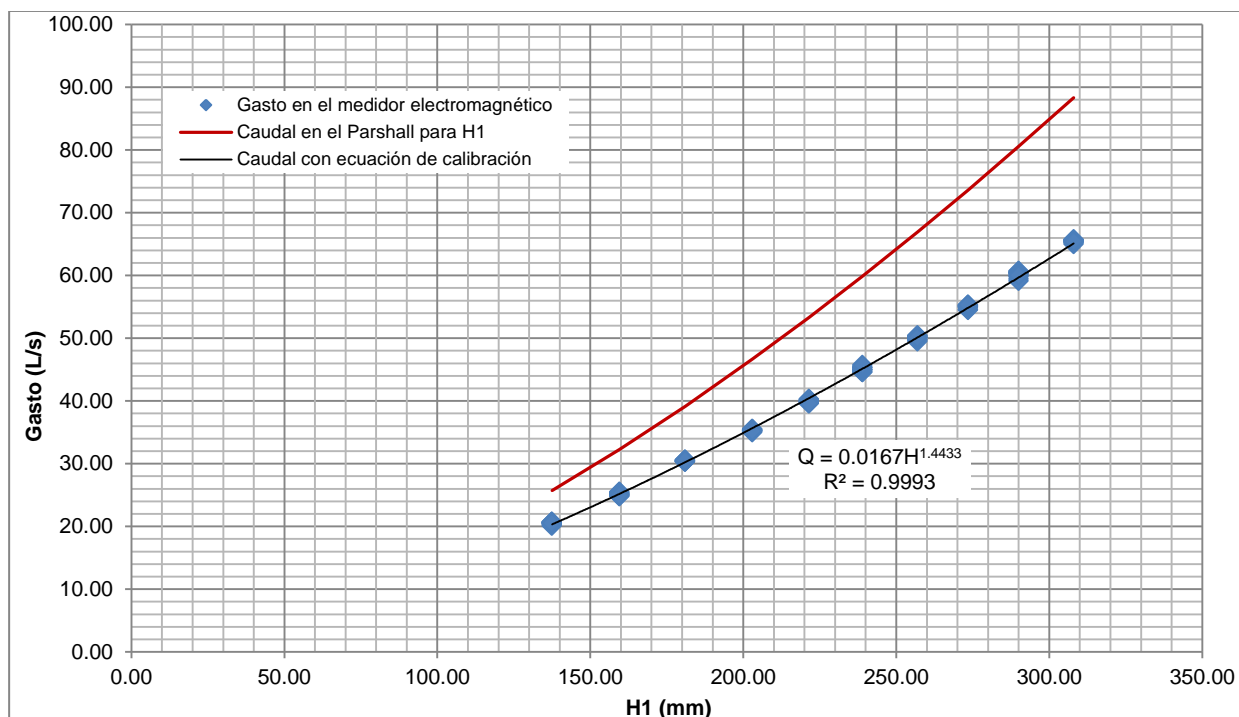


Figura 124. Variación de los caudales con una pendiente S=0.0003.

De la gráfica de arriba y al igual que en el caso anterior, se muestra que la curva de calibración y la curva de la ASTM son muy diferentes, ya que no coinciden en ningún punto. El gasto calculado en el aforador está por encima de los caudales registrados en el medidor electromagnético.

En el desarrollo de esta prueba se observó un flujo lento, la velocidad del agua fue baja, las líneas de corriente fueron paralelas a la plantilla y en general se presentó un flujo tranquilo durante toda la prueba. En la figura 125 se presenta lo mencionado anteriormente. Los tirantes se pudieron medir sin ningún problema, se procesó la información y se obtuvieron los resultados respectivos.



Figura 125. Condiciones hidráulicas presentadas con $S = 0.0003$.

8.7.4 Pendiente $S = 0.0102$

En esta prueba, la elevación del canal fue descendiendo de aguas arriba hacia aguas abajo, es decir, en el sentido del flujo, presentándose un desnivel de 18.4 cm. La pendiente del canal se ajustó a una pendiente descendente de $S=0.0102$. El objetivo de esta prueba fue ver la precisión en la medición en el Parshall si se tiene una pendiente positiva. En la siguiente figura se muestra dicha inclinación.

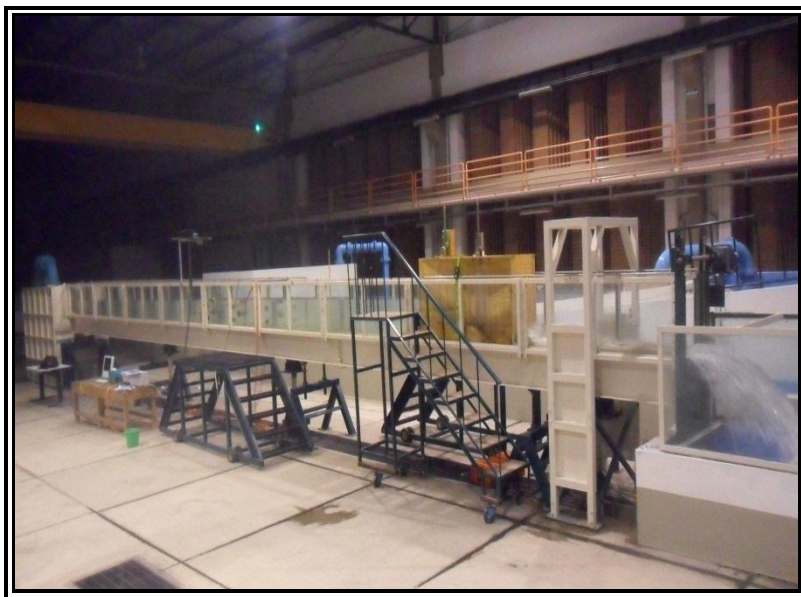


Figura 126. Canal de pendiente variable con $S = 0.0102$.

En tabla 30, se presentan los resultados obtenidos para esta prueba.

Tabla 30. Resultados de la prueba con una pendiente $S=0.0102$

n	H1 (mm)	H2 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H1	H2	H _{pozo}	H1	H2	H _{pozo}
1	127.50	135.50	136.00	20.44	22.91	25.15	25.29	12.09	23.05	23.74
2	151.00	158.50	159.00	25.11	29.68	31.97	32.12	18.20	27.32	27.93
3	173.00	180.50	181.00	30.24	36.55	39.00	39.17	20.85	28.98	29.52
4	192.00	200.00	200.50	35.09	42.86	45.63	45.81	22.15	30.04	30.54
5	212.50	219.50	220.00	40.02	50.06	52.61	52.79	25.08	31.46	31.92
6	231.00	238.50	238.00	45.10	56.88	59.74	59.54	26.12	32.45	32.03
7	249.00	256.50	256.00	50.09	63.80	66.77	66.57	27.37	33.30	32.90
8	265.50	273.50	273.00	55.25	70.38	73.66	73.45	27.38	33.32	32.95
9	282.50	290.00	290.00	60.21	77.39	80.57	80.57	28.53	33.81	33.81
10	299.50	306.00	306.50	65.03	84.63	87.47	87.68	30.13	34.50	34.84

De la tabla anterior, se puede apreciar que existe una diferencia importante entre los valores medidos de los tirantes hidráulicos. Para H1 se tuvieron valores muy bajos, mientras que para H_{pozo} los más altos. A medida que el caudal aumenta, la diferencia entre los gastos calculados en el aforador y el registrado en el medidor electromagnético aumenta. Se puede apreciar, que las diferencias porcentuales son muy altas, de 34.84 % en el tirante medido en el pozo de lectura.

En la figura 127 se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H1 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

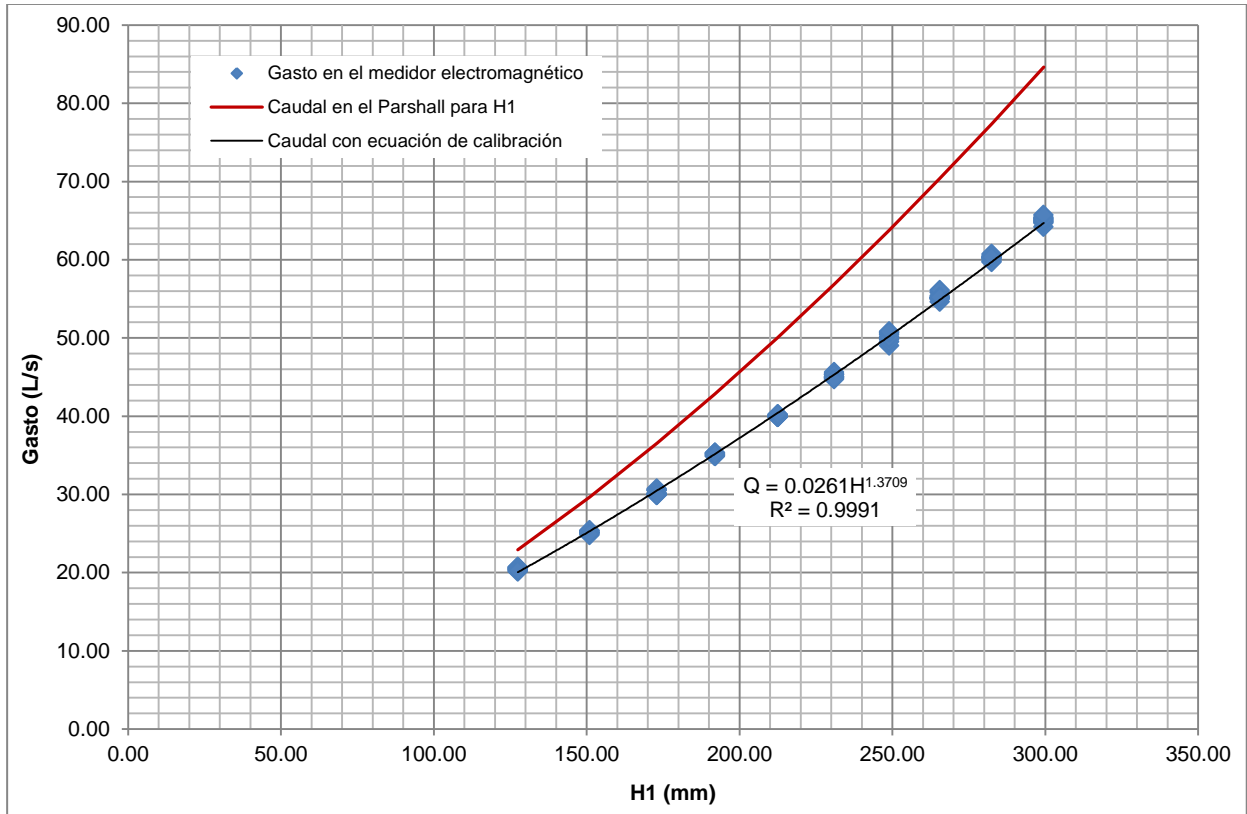


Figura 127. Variación de los caudales con una pendiente S=0.0102.

De la gráfica de arriba y al igual que en casos anteriores, se muestra que la curva de calibración y la curva de la ASTM son muy diferentes, ya que no coinciden en ningún punto. El gasto calculado en el aforador está por encima de los caudales registrados en el medidor electromagnético.

Durante esta prueba se observó cierta turbulencia, la velocidad del agua fue considerable, las líneas de corriente no fueron paralelas a la plantilla del canal y en general se presentó un flujo turbulento durante la prueba. Se midieron los tirantes, se procesó la información y se obtuvieron los resultados respectivos. En la figura 128 se presenta lo mencionado anteriormente.



Figura 128. Condiciones hidráulicas presentadas con $S = 0.0102$.

8.7.5 Pendiente $S = 0.0192$

Para esta prueba, la elevación del canal fue descendiendo en el sentido del flujo, presentándose un desnivel de 34.8 cm. La pendiente del canal fue descendente de $S=0.0192$. Es la pendiente máxima descendente a la que se pudo llegar. El objetivo de esta prueba fue ver la precisión en la medición en el Parshall si se tiene una pendiente positiva. En la figura 129 se muestra dicha inclinación.



Figura 129. Canal de pendiente variable con $S = 0.0192$.

En tabla 31, se presentan los resultados obtenidos para esta prueba.

Tabla 31. Resultados de la prueba con una pendiente $S=0.0192$

n	H1 (mm)	H2 (mm)	H _{pozo} (mm)	Q _{electro} (L/s)	Q _{parshall} (L/s)			Diferencias (%)		
					H1	H2	H _{pozo}	H1	H2	H _{pozo}
1	127.50	142.00	142.00	21.34	22.91	27.02	27.02	7.36	26.62	26.62
2	152.50	162.50	168.00	26.99	30.13	33.21	34.95	11.64	23.05	29.48
3	179.50	194.50	195.00	33.23	38.67	43.72	43.90	16.36	31.58	32.10
4	202.50	216.50	217.00	39.02	46.50	51.51	51.70	19.17	32.02	32.49
5	226.00	241.50	241.00	45.61	55.01	60.89	60.70	20.60	33.50	33.08
6	246.50	260.50	261.00	51.13	62.82	68.37	68.57	22.86	33.72	34.11
7	264.00	279.00	280.00	56.77	69.77	75.94	76.35	22.90	33.76	34.50
8	288.00	301.50	300.00	63.35	79.71	85.50	84.85	25.82	34.97	33.95
9	307.00	320.50	320.00	69.33	87.89	93.89	93.66	26.77	35.42	35.10
10	323.00	337.50	335.00	75.03	94.99	101.61	100.46	26.61	35.43	33.90

De la tabla anterior, se puede apreciar que existe una diferencia importante entre los valores medidos de los tirantes. Para H1 se tuvieron valores muy bajos, mientras que para H_{pozo} los más altos. A medida que el caudal aumenta, la diferencia entre los gastos calculados en el aforador y el registrado en el medidor electromagnético aumenta. Se puede apreciar, que las diferencias porcentuales son muy altas, de 35.43 % en el tirante medido en la garganta del modelo.

En la figura 130 se observan las curvas de los gastos del medidor electromagnético, el caudal calculado con la ecuación de la ASTM para el tirante H1 y el gasto obtenido empleando la ecuación de calibración o de ajuste.

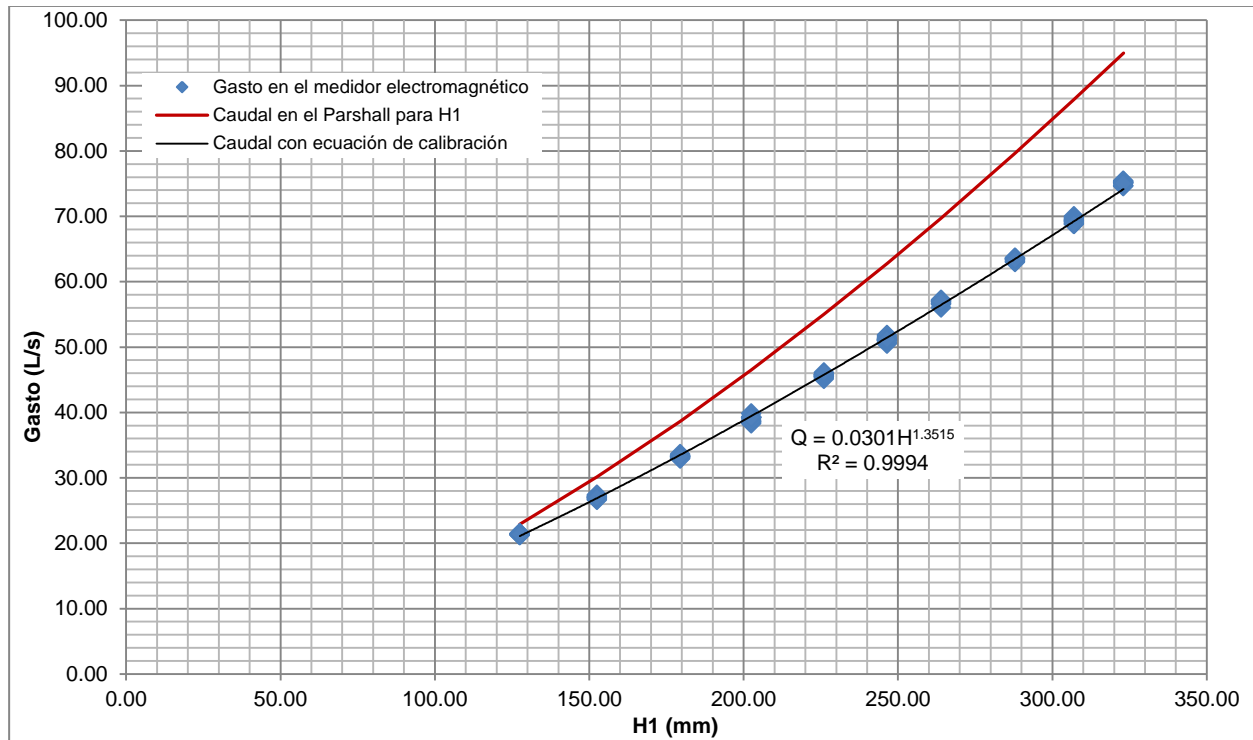


Figura 130. Variación de los caudales con una pendiente $S=0.0192$.

De la gráfica anterior y al igual que en los casos anteriores, se muestra que la curva de calibración y la curva de la ASTM son muy diferentes, ya que no coinciden en ningún punto. El gasto calculado en el aforador está por encima de los caudales registrados en el medidor electromagnético.

Durante esta prueba se observó gran turbulencia a lo largo de toda la prueba, la velocidad del agua fue muy alta, las líneas de corriente no fueron paralelas a la plantilla del canal, se formó un salto hidráulico estacionario y en general se presentó un flujo turbulento durante la prueba. Se midieron dos tirantes en los limnímetros para después obtener un promedio, se procesó la información y se obtuvieron los resultados correspondientes. Lo anterior se aprecia en la figuras 131 y 132 presentadas a continuación.

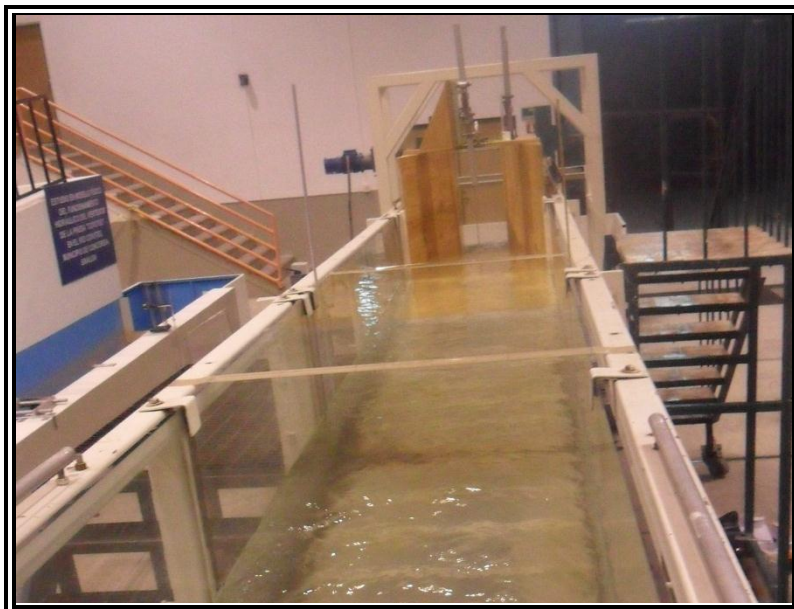


Figura 131. Condiciones hidráulicas presentadas con $S = 0.0192$.



Figura 132. Formación de un salto hidráulico estacionario aguas arriba del aforador.

Finalmente, en la figura 133 presentada a continuación, se aprecia la diferencia porcentual de cada gasto calculado para cada una de las pendientes respecto a la ecuación de la ASTM.

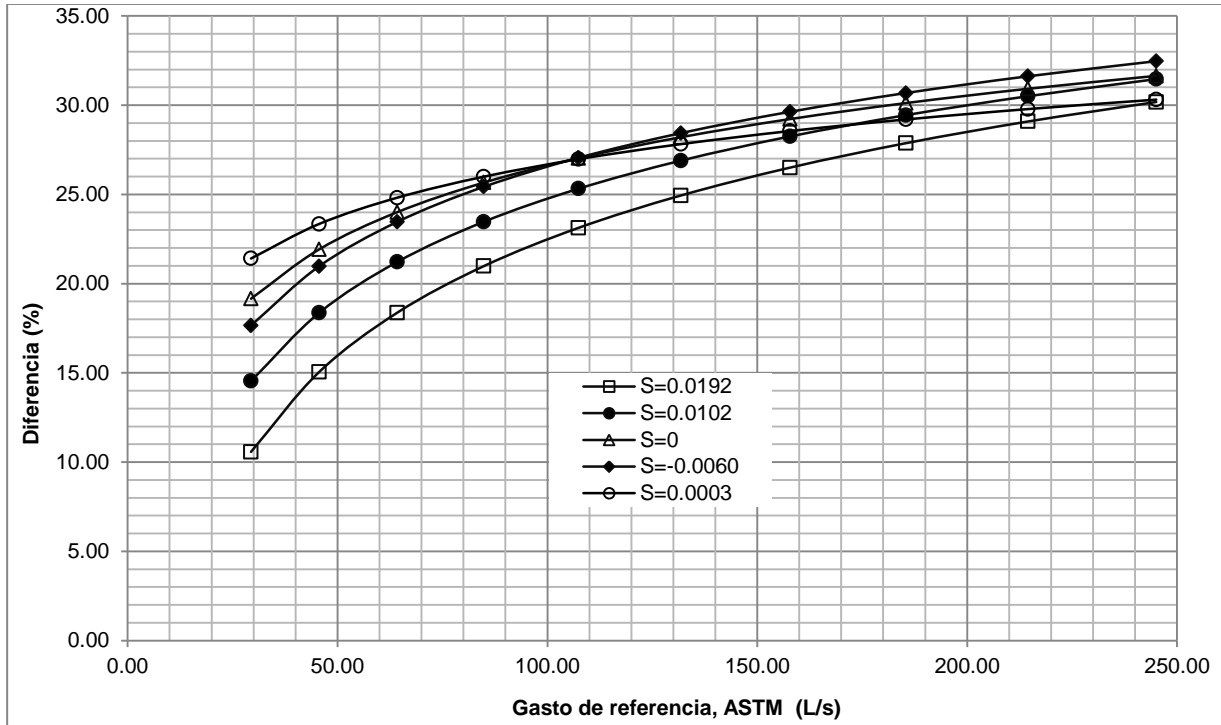


Figura 133. Diferencia respecto a la ecuación de la ASTM para diferentes pendientes.

Como se aprecia en la figura anterior, para las pendientes más altas se tiene una diferencia menor respecto al gasto obtenido con la ecuación de la ASTM. Mientras que para la pendiente que más se presenta en canales de riego, se observa una mayor diferencia respecto al gasto de referencia.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La conclusión más importante es la misma que la ya dada por los investigadores de la Universidad Michoacana: “Es más importante calibrar el aforador Parshall que cumplir con la norma”.

En cada una de las pruebas realizadas en el laboratorio se tienen condiciones físicas e hidráulicas diferentes, por tal motivo, se recomienda calibrar el aforador para cada situación que se presente, ya que con ello se obtendrán mejores mediciones.

Para las pruebas realizadas con diferentes rugosidades, las máximas diferencias porcentuales entre el gasto de referencia y el caudal calculado en el aforador Parshall se presentaron para una superficie lisa, contrario a lo que se esperaba.

Para las pruebas con la pantalla ocurrió algo similar al caso anterior, pues las diferencias máximas se presentaron cuando la pantalla estaba ubicada más lejos (3.00 m) de la entrada al dispositivo de pruebas. En el caso de las pruebas realizadas en el desviador de flujo ocurrió lo contrario, las diferencias máximas se presentan cuando éste se encuentra más cerca de la entrada al aforador y a medida que se va alejando, las diferencias fueron disminuyendo.

Para el caso de las pruebas realizadas con diferentes pendientes, se obtuvieron diferencias muy altas respecto al gasto de referencia, aún no se sabe la razón de tal variación. Lo que sí se puede observar es que para pendientes ascendentes altas, las diferencias porcentuales son menores, lo mismo ocurre para pendientes ascendentes bajas.

Es importante mencionar que las conclusiones citadas anteriormente, no necesariamente se van a presentar en cualquier aforador sin importar el tamaño del mismo y las condiciones físicas e hidráulicas. Por ello, los resultados obtenidos en este trabajo son para este caso en particular.

Referencias

- ASTM. Standard D 1941 – 91 Standard Test Method for Open Channel Flow Measurement of Water with Parshall Flume. American National Standard, Nueva York, 2001,
- ISO. Standard 9826 Measurement of liquid flow in open channels – Parshall and SANIIRI flumes. International Organization for Standardization. Suiza. 1992.
- Sotelo, Ávila G. Hidráulica General, Volumen 1, Fundamentos, Editorial Limusa, Vigésimo primera reimpresión, México, 1999, 561 pp.
- Aguilar Chávez A., Mejía Astudillo V. G., Pedroza González E., “Revisión del funcionamiento de un aforador Parshall y comparación de gastos en tuberías en la empresa PROQUINA S.A. de C.V.”, Reporte, Subcoordinación de Obras y Equipos Hidráulicos, Coordinación de Tecnología Hidráulica, México, 2004.
- Aguilar Chávez A., Pedroza González E., “Revisión del funcionamiento de dos aforadores Parshall en la cervecería Modelo”, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, enero de 2003.
- Aguilar Chávez A., Pedroza González E., “Revisión del funcionamiento de dos aforadores Parshall”, Informe que se presenta para la empresa COLGATE, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, enero de 2005.
- Pedroza G. E. Canal Parshall, Serie autodidáctica de medición, Coordinación de Tecnología Hidráulica (IMTA), Subdirección General de Administración del Agua (CNA), México, diciembre de 2001.
- Manual de diseño de estructuras de aforo, Leslie Skertchky y Molina, IMTA, 1988.

Anexos

En este apartado se anexa el formato para la verificación de aforadores Parshall empleado por el IMTA a empresas que solicitan el servicio.



PROCEDIMIENTO DE VERIFICACIÓN DEL AFORADOR PARSHALL



Fecha:	Elaboró:
--------	----------

Información del Aforador	
Ubicación:	
Propietario o usuario:	Colgate
Marca del aforador:	
Marca del Totalizador:	
Tipo de sensor de nivel:	

A. Medidas en aforador sin flujo

A. 1 Medidas del aforador																																																																								
Objetivo	Medición de todas las partes del medidor identificando el ancho de la garganta y verificación de las medidas del aforador con las estándar.																																																																							
Forma de realización	Medir con el flexómetro las medidas del aforador.																																																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Parte</th> <th colspan="3">Medidas</th> </tr> <tr> <th>Estándar</th> <th>Real</th> <th>Diferencia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>W</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>A</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2/3 A</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>B</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>C</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>D</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>E</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>T</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>G</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>K</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>M</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>N</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>R</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>X</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Y</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>S</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Parte	Medidas			Estándar	Real	Diferencia	W				A				2/3 A				B				C				D				E				T				G				K				M				N				R				X				Y				S			
	Parte		Medidas																																																																					
		Estándar	Real	Diferencia																																																																				
	W																																																																							
	A																																																																							
	2/3 A																																																																							
	B																																																																							
	C																																																																							
	D																																																																							
	E																																																																							
	T																																																																							
	G																																																																							
	K																																																																							
	M																																																																							
	N																																																																							
	R																																																																							
X																																																																								
Y																																																																								
S																																																																								

A.2 Cero de la escala		
Objetivo	Revisión de nivel de referencia de las escalas.	
Forma de realización	<p>Por medio del flexómetro medir desde la superficie hasta el fondo con una regla tipo nivel y posteriormente comparar con lecturas dadas por el registro contra las medidas con el flexómetro (Núm. B.1)</p>	

A.3 Canal de llegada		
Objetivo	Revisar que el canal sea recto, uniforme y con pendiente constante en una longitud de 5 veces el ancho de la superficie libre para el gasto máximo.	
Forma de realización	Medir el ancho de la superficie libre del canal y verificar la longitud recta.	
Ancho de la superficie libre (A_s):	Longitud requerida $5 A_s =$	
Longitud medida:	Cumple (Si/No):	

A.4 Alineación del canal de llegada		
Objetivo	Alineación de los ejes con la dirección del flujo en el canal de llegada.	
Forma de realización	Colocar un hilo (tipo reventón) de acuerdo al croquis. Si el aforador está alineado las distancias $D/2$ y $W/2$ deberán ser iguales entre ellas.	

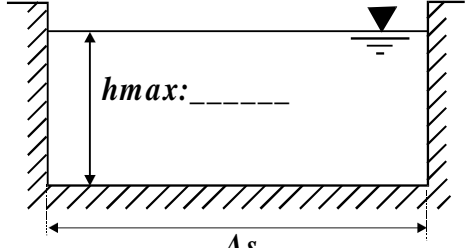
A.5 Construcción y material del aforador		
Objetivo	Revisión de la rigidez, sujeción y acabado de la superficie del aforador.	
Forma de realización	<p>El material del medidor debe ser rígido e impermeable y suficientemente anclado para resistir avenidas que dañen las paredes o provoquen erosión aguas abajo.</p>	<p>Las superficies del aforador, particularmente las de las secciones del entrada y garganta, deben ser lisas.</p>
	<p>Materiales permitidos en los aforadores: concreto con acabado de cemento fino u otro material pero igualmente con acabado fino.</p>	
	Cumple (Si/No):	Cumple (Si/No):
		Cumple (Si/No):

A.6 Medidas del ancho de garganta							
Objetivo	Realizar una serie de mediciones en diferentes partes de la garganta.						
Forma de realización	Medir con flexómetro en 20 puntos de la garganta distribuidos uniformemente en lo ancho y alto de la misma.						
Número	W	Número	W	Número	W	Número	W
1		6		11		16	
2		7		12		17	
3		8		13		18	
4		9		14		19	
5		10		15		20	

A.7 Coeficiente de la ecuación del Aforador		
Ancho de la garganta W :	Coeficientes reales en el Aforador	
Ecuación correspondiente: $Q=C ha^n$	C =	,n=
Donde: C =	, n=	
Cumple Si/No:		

B. Medidas en aforador con flujo.

B.1 Lecturas del Registro electrónico												
Objetivo	Revisión del funcionamiento del registro electrónico.											
Forma de realización	Verificar las lecturas del medidor de nivel contra medidas hechas directamente con el flexómetro.											
Núm	H ₁	H ₂	Q	Núm	H ₁	H ₂	Q	Núm	H ₁	H ₂	Q	
1				8				15				
2				9				16				
3				10				17				
4				11				18				
5				12				19				
6				13				20				
7				14								
H ₁ : Mediciones directas con el flexómetro; H ₂ : Lectura en el registro electrónico; Q: Gastos reportados por el medidor.												

B.2 Número de Froude		
Objetivo	Cálculo del número de Froude.	
Forma de realización	El número de Froude debe ser menor a 0.7. Use la siguiente expresión para lo que se necesita medir h_{max} y Q_{max} (Ver Croquis).	
	$Fr = \frac{Q_{max}}{A \sqrt{gh_{max}}}$ <p>Donde: Q_{max} gasto máximo A=As* h_{max} sección transversal del canal h_{max} máximo tirante</p>	 <p>Q = _____</p>

B.3 Distribución de Velocidades en el canal de llegada					
Objetivo	Verificar simetría y distribución de las velocidades de llegada				
Forma de realización	Soltar el flotador 5 veces, verificar que la trayectoria sea recta y medir el tiempo de llegada.				
<p>The diagram illustrates a Parshall flume channel. It is divided into two sections, 'Sección 1' and 'Sección 2', by vertical dashed lines. The distance between these two sections is labeled 'L'. A float, represented by a black dot, is shown at the start of 'Sección 1'. A dashed arrow indicates the path of the float towards 'Sección 2'. The channel width is labeled 'As', and the water depth is labeled 'As/2'. The total length of the channel is labeled '5.As'.</p>			Núm	L	Tiempo
			1		
			2		
			3		
			4		
			5		

Observaciones: