

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CANALETA PARSHALL PARA EL
LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE
CENTRAL

CARLOS DANIEL APONTE CASTILLO

PROYECTO DE GRADO

DIRECTOR

ING. JORGE HUMBERTO BENAVIDES SANTAMARIA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ 2019

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
1. ANTECEDENTES	11
2. PROBLEMA Y FORMULACIÓN.....	14
3. OBJETIVOS	15
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
4. LIMITACIÓN O ALCANCE	16
4.1 ALCANCE:.....	16
4.2 VIABILIDAD	16
4.3 TIEMPO:.....	16
4.4 ESPACIO:.....	16
5. JUSTIFICACIÓN	18
6. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	19
7. MARCO TEORICO O DE REFERENCIA.....	20
7.1 CUALIDADES DE LA CANALETA PARSHALL	20
7.2 CARACTERISTICAS DEL FLUJO EN LA CANALETA PARSHALL.....	20
7.3 PARTES DE LA CANALETA PARSHALL	22
7.4 DIMENSIONES DE LA CANALETA PARSHALL	24
7.5 CONDICIONES DE INSTALACIÓN DE UNA CANALETA PARSHALL COMO AFORADOR	26
7.6 DESCARGA LIBRE O DESCARGA SUMERGIDA	27
7.7 CALCULO DEL CAUDAL	28
7.8 RELACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA CON LA DENSIDAD Y LA VISCOSIDAD	28
7.9 CONDICIONES DE FLUJO EN LA CANALETA PARSHALL COMO DISPOSITIVO DE AFORO	30
8. METODOLOGÍA	31
8.1 FASE DE DISEÑO.....	31
8.1.1Calculo de dimensiones de cada sección	31
8.1.2 Sistema de abastecimiento y recirculación	33
8.1.3 Caudal máximo de la canaleta	33
8.1.4 Condiciones hidráulicas dentro de la canaleta Parshall	33

8.2 FASE DE CONSTRUCCIÓN	38
8.2.1 Materiales usados.....	39
8.2.2 Proceso constructivo	39
8.2.3 Práctica de laboratorio con la canaleta Parshall.....	42
8.3 MEZCLA RAPIDA	52
9. RESULTADOS.....	52
9.1 Cálculos de las condiciones hidráulicas en canaleta Parshall de 2 pulgadas.	55
9.2 DE CONSTRUCCIÓN	59
10. CONCLUSIONES	61
11. RECOMENDACIONES	64
GLOSARIO	65
BIBLIOGRAFÍA	67

TABA DE TABLAS

Tabla 1 Valores típicos de las dimensiones de una canaleta Parshall en cm a partir del ancho de garganta.	25
Tabla 2 Valores del exponente n y del coeficiente K	26
Tabla 3 Ancho de garganta y Sumergencia para el aforo.	30
Tabla 4 . Medidas Canaleta Parshal	32
Tabla 5 Datos iniciales tomados en la canaleta Parshall.....	43
Tabla 6 Caudales determinados para cada altura en la canaleta Parshall.....	44
Tabla 7 Logaritmo de caudales y altura del agua.....	45
Tabla 8 Logaritmo de caudales y altura del agua.....	49
Tabla 9 Porcentaje de error en función del caudal real y el caudal calibrado.....	51

TABLA DE IMÁGENES

Imagen 1 Resalto Hidráulico	22
Imagen 2 Secciones Básicas de una Canaleta Parshall	23
Imagen 3 Dimensiones de una Canaleta Parshall	24
Imagen 4 Condiciones Teóricas del Agua en Distintas Temperaturas.....	29
Imagen 5 Esquema de una Canaleta Parshall.....	42
Imagen 6 Plano en Vista de Planta de la Canaleta Parshall	53
Imagen 7 Plano en Vista de Perfil de la Canaleta Parshall	54

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Corte y Doblado de las Secciones de la Canaleta Parshall	40
Ilustración 2 Soldadura y Armado de la Estructura de la Canaleta.....	40
Ilustración 3 Pulido y Acabados de la Canaleta.....	41
Ilustración 4 Adecuación de los Puntos de Aforo en la Canaleta.	41
Ilustración 5 Estructura Metálica Finalizada.	42
Ilustración 6 Dispositivo de Canaleta Parshall Instalado y Entregado.....	60

TABLA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Log. Caudal vs Log. Ha Bomba 0,6 hp.....	46
Gráfica 2 Log. Caudal vs Log. Ha Bomba 1 hp.....	47
Gráfica 3 Log. Caudal vs Log Ha Bomba 0,6 hp Valores Sustituidos.....	48
Gráfica 4 Log. Caudal vs Log Ha Bomba 1 hp Valores Sustituidos.....	48

INTRODUCCIÓN

La canaleta Parshall es una estructura hidráulica utilizada comúnmente para la medición del caudal en canales abiertos y para la mezcla rápida de sustancias. Muy usada en plantas de potabilización de agua, plantas de tratamiento de aguas residuales y distritos de riego. Fue inventada por Ralph L. Parshall en 1920, quien estableció sus dimensiones a partir de ecuaciones que ajustan el diseño a los requisitos de quien las aplica. Entre las ventajas de su uso está la conversión de energía de posición en energía de velocidad, pérdidas mínimas de energía y que no permite la sedimentación como si pasa con otras estructuras de medición (Chow, 2003).

Su diseño contiene una contracción del flujo y una elevación de su base, de tal manera que dentro o cerca de ella se produzca flujo crítico. Posteriormente el descenso en el nivel de su base produce flujo supercrítico y ocasiona un resalto hidráulico en su parte más baja, donde el flujo pasa a subcrítico. Las alturas del flujo que se miden para calcular el caudal se conocen como H_a y H_b que se ubican antes y después de la cresta de flujo respectivamente. Así mismo, el área donde se ocasiona el flujo supercrítico es la misma donde se suelen añadir sustancias que se mezclan en el resalto hidráulico (Molina, 1988; Monroy, 2010).

Por sus características y alta eficiencia la canaleta Parshall ha servido en distintos campos de la ingeniería, especialmente la ingeniería civil donde el aforo de proyectos hídricos es fundamental, sobre todo en canales de agua natural o artificial. Por esto la construcción de

prototipos de laboratorio ha permitido observar y evaluar el comportamiento de estas estructuras frente a distintas variables que se reflejan en situaciones reales, con lo que se aumenta su vida útil y se fortalece el aprendizaje en hidráulica e hidráulica de canales (Monroy, 2010).

En ese sentido las universidades más reconocidas del país han utilizado la canaleta Parshall como herramienta de aprendizaje en su formación de ingenieros, principalmente en el área de obras civiles. Por ejemplo, la Universidad Nacional y la Universidad Javeriana cuentan con prototipos de canaleta Parshall construidas en acrílico, a las cuales se les suministra un caudal por medio de un sistema de bombas y por un motor eléctrico. Las medidas estandarizadas de los modelos permiten comparar su funcionamiento con situaciones reales de flujo.

Sin embargo, la Universidad Santo Tomás en su Sede Central no cuenta con un modelo didáctico de canaleta Parshall para sus ensayos de laboratorio, lo que no permite visualizar a sus estudiantes de ingeniería los conocimientos teóricos aprendidos en las asignaturas con temas de hidráulica e impide a los docentes materializar sus explicaciones y ejemplos. Así las cosas, y dejando en evidencia la anterior problemática, el presente proyecto tienen como objetivo diseñar y construir una canaleta Parshall para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás -Sede Central- que sea didáctica, se adapte a las condiciones físicas y técnicas del laboratorio, y que supla tanto las necesidades como expectativas de la universidad. Para el cumplimiento del objetivo en mención, el proyecto se estructuró en tres fases:

1) Diseño, 2) Construcción y 3) evaluación experimental del dispositivo. Todo descrito en el presente documento, su fundamento científico, medidas, materiales y resultados obtenidos.

1. ANTECEDENTES

La canaleta Parshall fue inventada con el fin de satisfacer el control del caudal en zonas de riego donde el volumen de agua era determinante para los cultivos. Su primer diseño recibió el nombre de Medidor Venturí, usado en la Estación Agrícola Experimental de Colorado en 1920 y posterior a unas modificaciones se conoció como Medidor Venturí Mejorado. En 1930 el Comité de Riegos de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles junto con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos lo nombró Conducto Medidor Parshall (Cortes y Gonzalez 2004; Hudson 1997).

Ralp Parshall se basó en los estudios de Venturi, Chezy, Manning y Bakhmeteff, quienes formularon expresiones y teorías importantes en la comprensión del comportamiento de los fluidos, para obtener su diseño y medidas finales. De esta manera se puede decir que el canal Parshall o canaleta Parshall es una adaptación del principio de Venturi en hidrodinámica de canales abiertos, donde se aplica un estrechamiento de la sección y un levantamiento del fondo del canal (Monroy, 2010). En él se causa una aceleración al flujo forzando un cambio de régimen de subcrítico a supercrítico, lo que conlleva inevitablemente al régimen crítico.

Por lo anterior, la canaleta Parshall es una estructura usada cada vez más para la enseñanza de las teorías de hidráulica en universidades, ya que en ella se pueden evidenciar los principios físicos descritos por Venturi y demás mencionados. La Universidad Nacional de

Colombia resulta ser ejemplo de ello, en cuanto tiene un dispositivo de canaleta Parshall en sus instalaciones, con el que plantea la metodología de sus prácticas de laboratorio (Zuñiga, 2005).

A pesar de que la Universidad Santo Tomás no cuente con un dispositivo de canaleta Parshall actualmente, su laboratorio de hidráulica (Usado por la Facultad de Ingeniería Civil, Mecánica, Ambiental, Industrial y otras sedes) posee otros equipos de funcionamiento mecánico y eléctrico para la pedagogía de las clases, como lo son: el banco, golpe de ariete, tablero de pérdidas, equipo de medición de flujo, equipo de pérdida de energía, venturímetro, rueda Pelton, y el equipo de canal de flujo.

En estas condiciones, el equipo de canal de flujo es utilizado para simular las condiciones de una canaleta Parshall. Tal equipo se encuentra construido en acrílico, hierro y PVC; posee un tanque gravimétrico, una bomba hidráulica con capacidad de 4 lt/seg y tubería, de manera que el agua se recircula en el canal. Con él y cuatro placas metálicas se analiza la dinámica del agua en los canales, su comportamiento en los cambios de pendiente y de anchura (Cortes y González, 2004). Sin embargo, un canal con barreras no es el dispositivo más eficiente para el análisis de una canaleta Parshall, así como sus tipos de flujo, resalto hidráulico o cualidades de aforo (Edmundo, 2001).

En el año 2004 Cortes A. y González A. plantearon un proyecto como opción de grado ante la Facultad de Ingeniería Civil, titulado *“Diseño y elaboración de una canaleta Parshall para*

el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás” (Cortes y González, 2004). Con el objetivo de satisfacer esa necesidad, del que se obtuvo como resultado una canaleta Parshall en acero y fibra de vidrio, de 2.10 metros de longitud, con un caudal de diseño de 4 lt/seg ajustado a la capacidad de la bomba eléctrica tomada del sistema de recirculación del canal de flujo mencionado anteriormente. Tal dispositivo fue el que apoyo las explicaciones en clase hasta el año 2011.

2. PROBLEMA Y FORMULACIÓN

El dispositivo de canaleta Parshall diseñado y construido por Cortes A. y Gonzalez A. el 2004 para la universidad Santo Tomás presento errores de funcionamiento siete años después de haber sido construido, su sistema de bombeo perdió eficiencia, su estructura presento fisuras y se evidencio deterioro general del dispositivo. Por esta razón fue desmantelado y desechado, dejando al laboratorio de hidráulica sin un medio pedagógico eficiente para la enseñanza de los principios de una canaleta Parshall (Bárcenas, 2015).

Frente a esa situación, este proyecto propone el diseño y construcción de un nuevo dispositivo de canaleta Parshall, que posea mejores condiciones, con un diseño innovador para el laboratorio, que resulte más didáctico y eficiente.

El autor presenta este proyecto como opción de grado para obtener el título de ingeniero civil en la Universidad Santo Tomás. La metodología utilizada para su desarrollo se basó en la información contenida en el libro *Manual de Hidráulica* de J. M. De Azevedo y Guillermo Acosta (Azevedo, Fernandez y Araujo, 2015) y su diseño fue apoyado por los parámetros expuestos en el *Manual de Medición de Agua* creado por el U.S. Departament of the interior (Water Resources, 1976).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un dispositivo de canaleta Parshall para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás Sede Central, que hidráulicamente funcione satisfactoriamente como una herramienta en los procesos pedagógicos del área de aguas y saneamiento.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Desarrollar un modelo que permita realizar práctica de laboratorio para cálculo de aforo de caudales.
- Desarrollar un modelo que permita realizar prácticas de laboratorios para mezcla.
- Desarrollar una guía de laboratorios para la canaleta Parshall como aforador y como mezclador.
- Elaborar un manual de operación y mantenimiento del montaje de la canaleta Parshall.

4. LIMITACIÓN O ALCANCE

El desarrollo de este proyecto se hace a partir de las siguientes limitaciones y alcances:

4.1 ALCANCE: Se diseñará, construirá y entregará un dispositivo de canaleta Parshall a la Universidad Santo Tomás para su laboratorio de hidráulica, en óptimas condiciones, de fácil manejo y con las instrucciones respectivas de su funcionamiento.

4.2 VIABILIDAD: El diseño del dispositivo requerirá acceso a las bases de datos y los equipos de cómputo de la universidad, a los cuales los estudiantes tienen fácil acceso. La construcción por su complejidad, se desarrollará en un taller de soldadura que cuenta con las características necesarias para la elaboración del dispositivo; taller con el que se ha tenido previo acuerdo.

4.3 TIEMPO: El tiempo transcurrido entre el diseño y entrega del dispositivo de canaleta Parshall no será mayor a dos años, pues este es el tiempo máximo que exige la Facultad de Ingeniería Civil para que los estudiantes que culminaron sus asignaturas presenten su proyecto de grado.

4.4 ESPACIO: El dispositivo estará instalado dentro de las instalaciones del laboratorio de hidráulica de la universidad, a uno de sus costados, de manera que se ubique cerca de una toma de agua y no obstaculice el paso de las personas o el desarrollo de otras actividades.

4.5 ASPECTOS FINANCIEROS: Los costos económicos de este proyecto obedecen a la compra de los materiales estructurales y el pago por la mano de obra para su fabricación en taller de soldadura. El total no será superior a \$3.000.000.

5. JUSTIFICACIÓN

La entrega de un dispositivo de canaleta Parshall didáctico y de fácil manejo al laboratorio de hidráulica de la universidad, permitirá exponer las condiciones de funcionamiento de este tipo de estructuras de aforo y evidenciar las características hidráulicas de su flujo. Se convertirá en una herramienta principal de aprendizaje en la mecánica de los fluidos, dispersión de energía hidráulica, medición de caudales y visualización y/o diseño de obras civiles. Con esto se reforzarán los conocimientos teóricos adquiridos en clase y se aumentara la competitividad de los estudiantes Tomasinos de ingeniería, con respecto a otras universidades del país.

6. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD	Marzo			Abril			Mayo			Junio			Julio			Agosto			Septiembre			Octubre			Noviembre															
	Semana			Semana			Semana			Semana			Semana			Semana			Semana			Semana			Semana															
	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22	29	5	12	19	26	
Recopilación de información																																								
Selección de los parametros de diseño																																								
Diseño de la canaleta																																								
Construcción de la canaleta																																								
Evaluación del dispositivo																																								
Diseño de la practica de laboratorio																																								
Construcción del documento escrito																																								
Entrega del dispositivo terminado																																								
Entrega del documento escrito																																								

Fuente: El autor

7. MARCO TEORICO O DE REFERENCIA

7.1 CUALIDADES DE LA CANALETA PARSHALL

La canaleta Parshall es utilizada generalmente para la medición del flujo de líquidos en canales abiertos. La textura lisa de su superficie interior evita obstrucciones al flujo por acumulación de sedimentos, lo que la hace más eficiente para las mediciones en comparación de otras estructuras, como los vertederos (Water Resources, 1976). Adicionalmente presenta gran eficiencia, pues se requiere una sola medida de carga para determinar el caudal.

7.2 CARACTERISTICAS DEL FLUJO EN LA CANALETA PARSHALL

Para el estudio de la mecánica de los fluidos mediante análisis dimensional o modelación, se han definido números adimensionales para la comprensión de algunos fenómenos ocurridos en el agua. Con base a esto, es posible distinguir el flujo en un canal a partir de tres tipos: Flujo Subcrítico, Flujo Critico y Flujo Supercrítico.

- **Flujo Subcrítico:** En este tipo de flujo las fuerzas inerciales son sobrepasadas por las gravitacionales; presenta velocidades y pendientes bajas, y la profundidad de la lámina de agua son mayores que las que presentan los demás tipos de flujo. En el flujo subcrítico el aumento en la energía se representa por el aumento en la profundidad de la lámina de agua. El número de Froude en este estado es menor a 1.

- **Flujo Crítico:** Dentro de este tipo de flujo ocurre una sinergia de fuerzas inerciales y gravitacionales que lo hacen inestable. El valor que toma depende únicamente de la geometría del canal y de la velocidad de descarga. En teoría es un estado intermedio y cambiante entre los otros dos tipos de flujo. Es un estado en que la energía específica es mínima para un caudal determinado, la corriente es inestable y está sujeta a fluctuaciones de la profundidad del agua (Cadena, Saltos y Villalta, 2018). Para este tipo de flujo el número de Froude es igual a 1.

- **Flujo Supercrítico:** En este tipo de flujo las fuerzas inerciales son mayores que las gravitacionales. El flujo presenta velocidades y pendientes altas, además de profundidades más pequeñas. El número de Froude en este estado es mayor a 1. Este flujo se caracteriza por la formación de resaltos hidráulicos (Cadena, Saltos y Villalta, 2018)

Para calcular el número de Froude y determinar el estado en que se encuentra el flujo se usa la siguiente relación:

$$F = \frac{v}{\sqrt{g DH}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

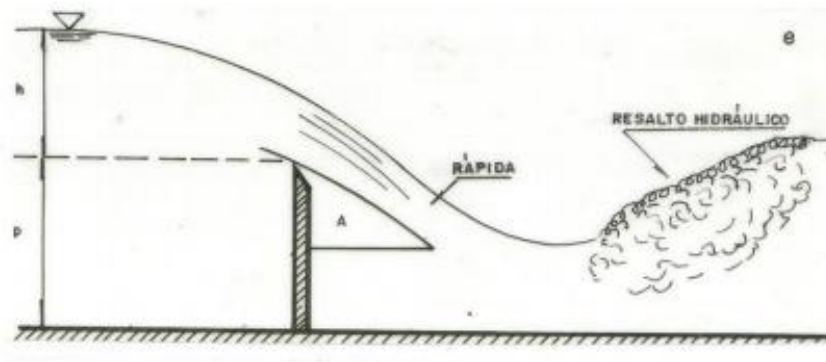
v: Velocidad

g: Gravedad

DH: Profundidad Hidráulica.

Resalto Hidráulico: Es el fenómeno hidráulico por el que una corriente líquida de gran velocidad en flujo supercrítico, bajo ciertas condiciones (área, pendiente, etc), pasa a un flujo subcrítico con una brusca elevación de la superficie libre. En él las pérdidas de energía son mayores a medida que la altura del salto es mayor. Se caracteriza por ser una zona donde se produce una macro turbulencia y un arrastre de aire hacia el interior de la masa líquida, razón por lo que suele ser usado para procesos de mezclado o aireación de los fluidos. En la imagen 1 se representa la vista lateral de un resalto hidráulico dentro de una canaleta Parshall (Ramiro, 1997).

Imagen 1 Resalto Hidráulico



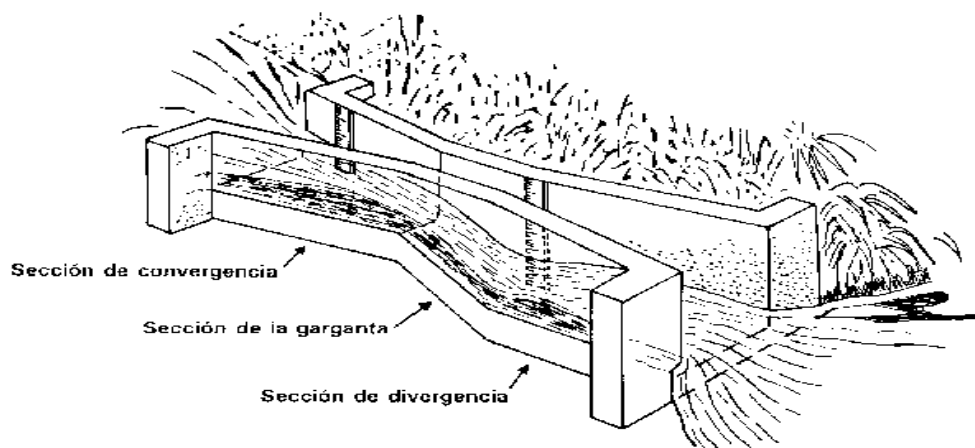
Fuente: Biblioteca Universidad Nacional Manual de practicas de laboratorio de hidraulica [Imagen]. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/12697/31/3353962.2005.Parte%206.pdf>

7.3 PARTES DE LA CANALETA PARSHALL

La geometría básica de la canaleta Parshall consta de 3 secciones principales (Figura 1).

- **Sección de convergencia:** Es el inicio de la estructura, su base presenta una pendiente de cero y su ancho entre paredes va disminuyendo hasta la garganta (Pizarro y Murillo, 1992).
- **Sección de la garganta:** La garganta presenta un ancho igual en todos sus puntos, sus paredes están paralelas una de la otra y su base tiene una disminución de 3:8 en su pendiente (3 verticales y 8 horizontales) (Pizarro y Murillo, 1992).
- **Sección de divergencia:** Es el final de la estructura, su base presenta una pendiente en aumento de 1:6 (1 vertical y 6 horizontal) y su ancho de paredes aumenta desde la garganta al ancho inicial del canal (Pizarro y Murillo, 1992).

Imagen 2 Secciones Básicas de una Canaleta Parshall

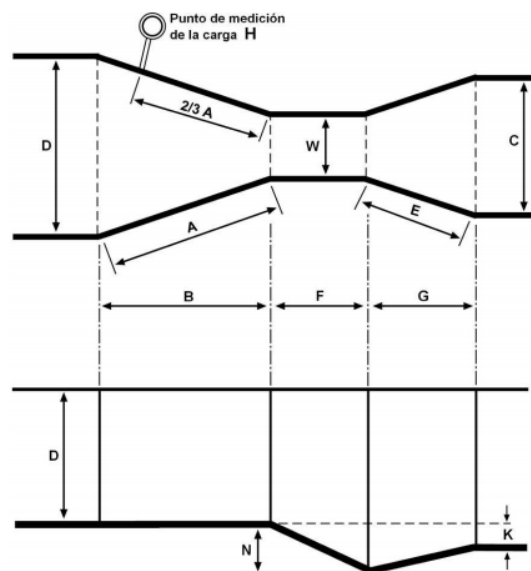


Fuente: https://carlosquispeanccasi.files.wordpress.com/2011/12/hidraulica_ruiz.pdf

7.4 DIMENSIONES DE LA CANALETA PARSHALL

A partir de diferentes practicas experimentales J.M. De Acevedo y Acosta G. establecen en su manual de hidráulica, las dimensiones para la construcción de una canaleta Parshall teniendo como base el ancho de la garganta.

Imagen 3 Dimensiones de una Canaleta Parshall

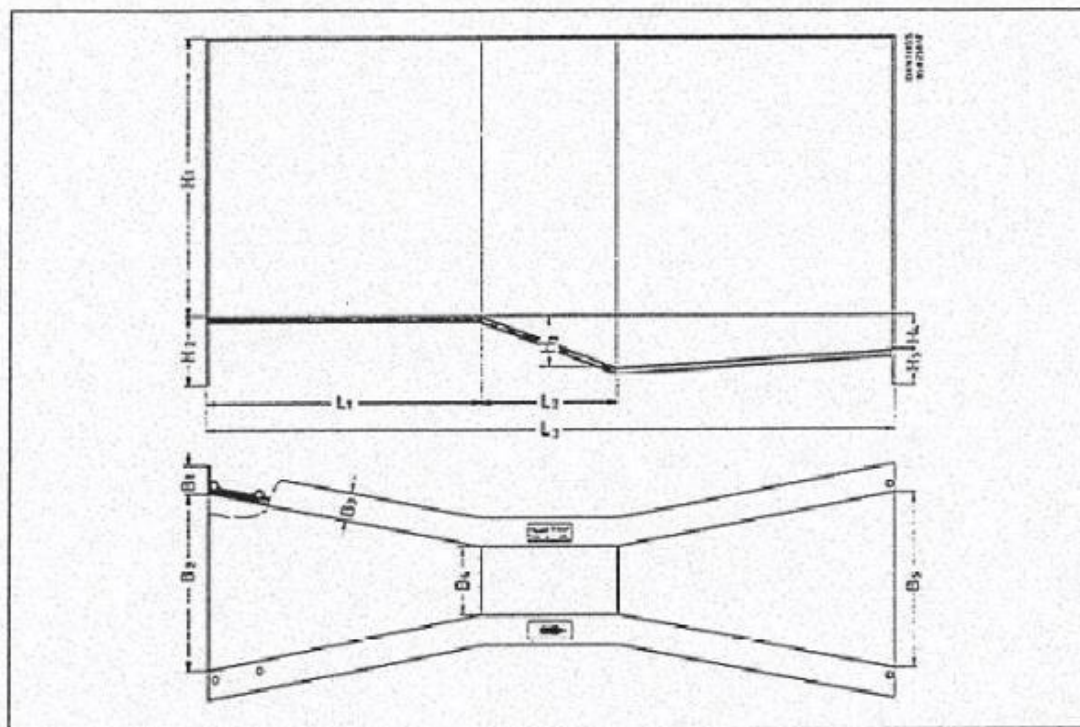


https://carlosquispeanccasi.files.wordpress.com/2011/12/hidraulica_ruiz.pdf

Los valores de las dimensiones para cada ancho de garganta estipulado en el manual de hidráulica se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Valores típicos de las dimensiones de una canaleta Parshall en cm a partir del ancho de garganta.

	W	A	B	C	D	E	F	G	K	N
1"	2.5	36.3	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9
3"	7.6	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7
6"	15.2	62.1	61.0	39.4	40.3	45.7	30.5	61.0	7.6	11.4
9"	22.9	88.0	86.4	38.0	57.5	61.0	30.5	45.7	7.6	11.4
1'	30.5	137.2	134.4	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
1 1/2'	45.7	144.9	142.0	76.2	102.6	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
2'	61.0	152.5	149.6	91.5	120.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
3'	91.5	167.7	164.5	122.0	157.2	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
4'	122.0	183.0	179.5	152.5	193.8	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
5'	152.5	198.3	194.1	183.0	230.3	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
6'	183.0	213.5	209.0	213.5	266.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
7'	213.5	228.8	224.0	244.0	303.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
8'	244.0	244.0	239.2	274.5	340.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
10'	305.0	274.5	427.0	366.0	475.9	122.0	91.5	183.0	15.3	34.3



Size	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	L ₁	L ₂	L ₃
2"	410	58	43	22	36	60	214	60	50.8	135	406	114	774
3"	610	75	57	25	50	60	259	60	75.2	178	457	152	914
6"	610	155	114	76	79	60	397	60	152.4	394	610	305	1525
9"	762	143	114	76	67	60	575	60	228.6	381	864	305	1626
12"	914	270	292	76	194	60	845	60	304.8	610	1343	610	2867

Fuente: Ingenieros Asociados de Control S.L (S.f) Ilustración Dimensiones Canal Parshall [Imagen]. Recuperado de <https://iac-sl.es/sites/default/files/Ccanales.PDF>

A partir del ancho de la garganta en una canaleta Parshall, según Azevedo y Guillermo

Acosta se establecen las constantes para el caudal de diseño respectivo (Tabla 2).

Tabla 2 Valores del exponente n y del coeficiente K.

Unidades Métricas		
W	N	K
3	1.547	0.176
6	1.580	0.381
9	1.530	0.535
1	1.522	0.690
1 ½	1.538	1.054

Fuente: Azevedo, Fernández y Araujo, 2015.

7.5 CONDICIONES DE INSTALACIÓN DE UNA CANALETA PARSHALL COMO AFORADOR

Las condiciones de instalación de este tipo de aforador son:

- El flujo aguas arriba debe ser tranquilo, con una velocidad uniforme.
- El fondo del aforador debe ser nivelado tanto longitudinalmente como transversalmente.
- Se debe tomar en consideración la posible sumergencia que ocurra aguas abajo, a la salida del aforador, el cual puede ser causado por el incremento del flujo a través de este.
- Cabe mencionar que de acuerdo al tipo de flujo que pasará a través del aforador se podrá elegir el dispositivo para medir el tirante (Pedroza y Angel, 2012).

7.6 DESCARGA LIBRE O DESCARGA SUMERGIDA

La canaleta Parshall puede funcionar con descarga libre o con descarga sumergida; en este último caso, se dice que la canaleta trabaja ahogada y se debe a la presencia de flujo subcrítico aguas abajo de la misma, el cual provocaría la formación de un resalto hidráulico entre la garganta y la zona de salida de la canaleta. Para distinguir cuando una canaleta opera con descarga libre o sumergida, se introduce el parámetro: Grado de Sumergencia, S , definido como:

$$S = \frac{H_b}{H_a} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

H_a = Profundidad del flujo en la sección (a), aguas arriba de la garganta.

H_b = Profundidad del flujo en la sección (g), situada justo al final de la garganta.

Si $H_b \ll H_a$ entonces S toma un valor relativamente bajo y se dice que la canaleta funciona con descarga libre. Al contrario, si H_b es menor pero comparable con H_a , esto es $H_b \approx H_a$, entonces S toma un valor relativamente alto, y se dice que la canaleta opera con descarga sumergida o ahogada [12] (Zuñiga, 2005).

7.7 CALCULO DEL CAUDAL

La ecuación fundamental para el cálculo del flujo de una canaleta Parshall es:

$$Q = C (Ha)^n \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

Q = Flujo o gasto del canal Parshall, para condiciones de descarga libre en: l / seg para Parshall de 25 mm (1”) a 229 mm (9”) m³ /seg para Parshall de 305 mm (12”) a 2 438 mm (96”)

C = Constante específica para cada tamaño de Parshall

Ha = Altura del flujo en el Parshall, medido en la sección convergente, en: mm para Parshall de 25 mm (1”) a 229 mm (9”) m para Parshall de 305 mm (12”) a 2 438 mm (96”)

n = constante específica para cada tamaño de Parshall

W = ancho de garganta del Canal Parshall en: mm para Parshall de 25 mm (1”) a 229 mm (9”) m para Parshall de 305 mm (12”) a 2 438 mm (96”)

Valores de C y n en la ecuación $Q = C (Ha)^n$ para diferentes anchos de garganta (W)

7.8 RELACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA CON LA DENSIDAD Y LA VISCOSIDAD

Las condiciones físicas del agua presentan teóricamente una relación entre ellas, la temperatura del agua determina su densidad y viscosidad, que varían según esta aumente o

disminuya (Azevedo, Fernandez y Araujo, 2015). En la Imagen 4 se muestra la tabla donde se relacionan estas condiciones.

Imagen 4 Condiciones Teóricas del Agua en Distintas Temperaturas

Temperatura [°C]	Densidad ¹ ρ [g/cm ³]	Viscosidad	
		Absoluta ² μ [g/cm.s]	Cinemática $\nu = \mu/\rho$ [cm ² /s]
0	0,99987	0,01792	0,01792
1	0,99993	0,01732	0,01732
2	0,99997	0,01674	0,01674
3	0,99999	0,01619	0,01619
4	1,00000	0,01568	0,01568
5	0,99999	0,01519	0,01519
6	0,99997	0,01473	0,01473
7	0,99993	0,01429	0,01429
8	0,99988	0,01387	0,01387
9	0,99981	0,01348	0,01348
10	0,99973	0,01310	0,01310
11	0,99963	0,01274	0,01274
12	0,99952	0,01239	0,01240
13	0,99940	0,01206	0,01206
14	0,99927	0,01175	0,01176
15	0,99913	0,01145	0,01146
16	0,99897	0,01116	0,01117
17	0,99880	0,01088	0,01089
18	0,99862	0,01060	0,01061
19	0,99843	0,01034	0,01036
20	0,99823	0,01009	0,01010
21	0,99802	0,00984	0,00986
22	0,99780	0,00961	0,00963
23	0,99757	0,00938	0,00940
24	0,99733	0,00916	0,00919
25	0,99707	0,00895	0,00897
26	0,99681	0,00875	0,00877
27	0,99654	0,00855	0,00858
28	0,99626	0,00836	0,00839
29	0,99597	0,00818	0,00821
30	0,99568	0,00800	0,00804

https://carlosquispeanccasi.files.wordpress.com/2011/12/hidraulica_ruiz.pdf.

7.9 CONDICIONES DE FLUJO EN LA CANALETA PARSHALL COMO DISPOSITIVO DE AFORO

Para que el resalto hidráulico en una canaleta Parshall sea utilizado con el fin de aforar un caudal, el diseño de la canaleta debe cumplir los siguientes requisitos:

1. No puede trabajar ahogado, significa que la relación H_b/H_a no puede superar los valores contenidos en la Tabla 3.
2. La relación W/H_a debe estar entre 0.4 y 0.8.
3. El número de Froude debe estar contenido entre los intervalos 1.7 – 2.5 o 4.5 – 9.0. Deben evitarse número entre 2.5 a 4.5 ya que producen un resalto inestable.

Tabla 3 Ancho de garganta y Sumergencia para el aforo.

Ancho de la garganta	Máxima Sumergencia H_b/H_a
2" a 9"	0.6
1' a 8'	0.7
10' a 50'	0.8

https://carlosquispeanccasi.files.wordpress.com/2011/12/hidraulica_ruiz.pdf

8. METODOLOGÍA

8.1 FASE DE DISEÑO

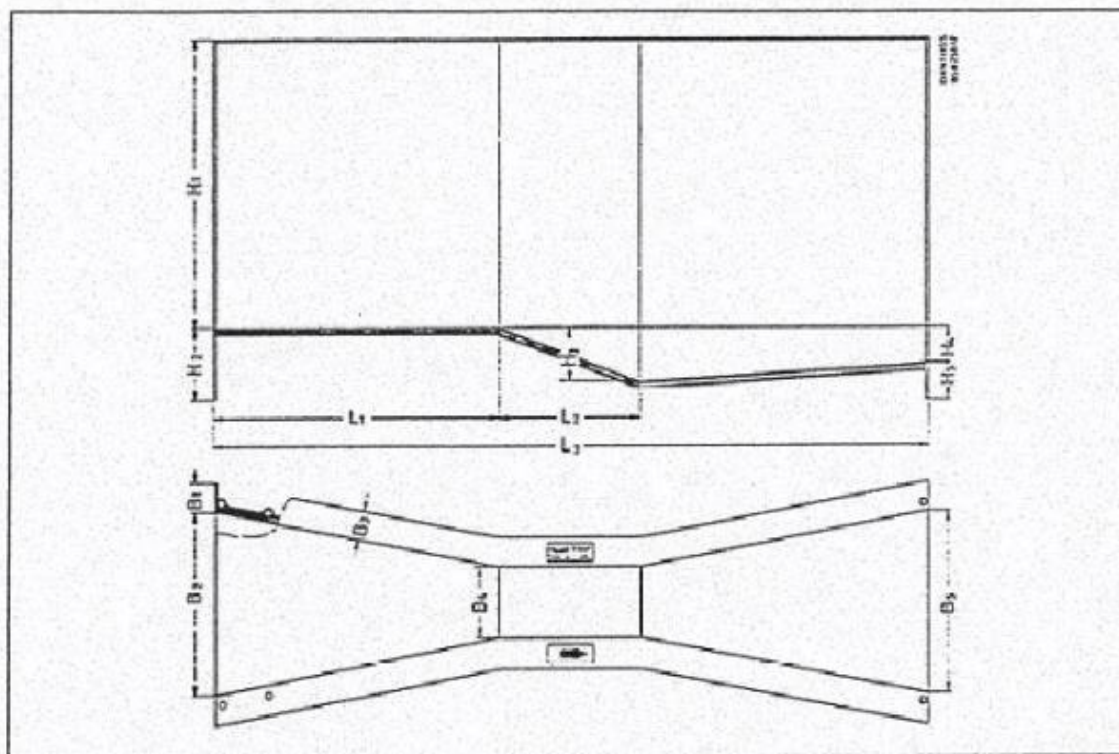
En esta fase se desarrolló todo lo relacionado al dimensionamiento del dispositivo, su geometría y características hidráulicas de funcionamiento. Por consiguiente, se describen los cálculos realizados para la obtención del diseño final y el comportamiento hidráulico en dichas condiciones.

8.1.1 Cálculo de dimensiones de cada sección

Se estableció un ancho de garganta de 2 pulgadas para la canaleta Parshall, ya que las condiciones que establecimos es que fuera de fácil manipulación por cualquier estudiante de la universidad. Debido a esto se revisó la bibliografía encontrada, y gracias a varios proveedores de estos dispositivos logramos encontrar la norma y las medidas.

Tabla 4 . Medidas Canaleta Parshall

Tamaño	Hmin(mm)	Qmin(m ³ /h)	Hmáx(mm)	Qmáx(m ³ /h)	K (m ³ /h)	n
1"	15,0	0,32	210	19	217,5	1,55
2"	20,0	1	393	100	425	1,548
3"	31,9	3	591	275	620	1,548
6"	32,7	6	609	600	1310	1,574
9"	30,6	9	753	1200	1851	1,528
12"(1')	30,5	12	885	2000	2407	1,519
1'6"(18")	30,0	17,3	760	2502	3802	1,538
2'	46,0	43,5	760	3360	5141	1,550
3'	46,0	63	760	5115	7863	1,566
4'	60,0	110	760	6894	10631	1,578



Size	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	L ₁	L ₂	L ₃
2"	410	58	43	22	36	60	214	60	50.8	135	406	114	774
3"	610	75	57	25	50	60	259	60	75.2	178	457	152	914
6"	610	155	114	76	79	60	397	60	152.4	384	610	305	1525
9"	762	143	114	76	67	60	575	60	228.6	381	864	305	1626
12"	914	270	292	76	194	60	845	60	304.8	610	1343	610	2867

Fuente: Ingenieros Asociados de Control S.L (S.f) Ilustración Dimensiones Canal Parshall [Imagen]. Recuperado de <https://iac-sl.es/sites/default/files/Ccanales.PDF>

8.1.2 Sistema de abastecimiento y recirculación

Para esta parte se selecciona los tanques de almacenamiento de aguas lluvias del laboratorio de hidráulica, en donde podemos encontrar que el tamaño es de (2x2x2) así podemos solventar

8.1.3 Caudal máximo de la canaleta

Para el cálculo máximo del caudal en la canaleta, se utiliza la *Ecuación 3*

$$Q = K ha^n$$

Q = Caudal

K = Coeficiente de la canaleta 2" (0.676 ft²)

n = 1.55

ha = Altura de la lámina de agua (ft)

Para tener la altura con el caudal

$$Q = K ha^n$$

$$Q(PCS) = 0.676 ha^{1.55}$$

$$Q = 0.4 \frac{L}{s} = 0.01412 PCS$$

$$0.01412 PCS = 0.676 ha^{1.55}$$

$$ha = \left(\frac{Q}{K}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$ha = \left(\frac{0.01412 PCS}{0.676}\right)^{\frac{1}{1.55}}$$

$$ha = 0.0824 ft \text{ (Altura a la entrada canaleta)}$$

$$ha = 0.025 m$$

8.1.4 Condiciones hidráulicas dentro de la canaleta Parshall

En cualquier parte de la canaleta Parshall, desde el inicio de la transición de entrada hasta la salida, se posee una sección rectangular. Por lo cual, se puede representar matemáticamente a partir de las siguientes expresiones (Pulido y Carrillo, 2016):

1. Cálculo de caudal (Q)

$$Q = K ha^n \quad \text{Ecuación 3}$$

$$ha = \left(\frac{Q}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación 4}$$

De acuerdo con la tabla 1 se escoge el ancho de la garganta W de 2" para el diseño de la canaleta Parshall y con base en la Tabla 1. Una vez definido el ancho de la garganta a través del caudal se calculan los elementos hidráulicos de la canaleta (Bermeo, Restrepo y García, 2010). Para el cálculo de la lámina de agua se despeja la Ecuación 2, posteriormente mediante el caudal ingresado en la zona de aforo y de constantes en función del diámetro de la garganta de la canaleta, se calcula la lámina de agua (Ecuación 1).

2. Zona de aforo

2.1 Velocidad en zona de aforo

$$Wa = \frac{2}{3}(D - W) + W \quad \text{Ecuación 5}$$

$$Va = \frac{Q}{Wa ha} \quad \text{Ecuación 6}$$

Mediante la ecuación 5, se calcula el ancho de la zona de aforo, el cual se usa en la ecuación 6 para realizar el cálculo de velocidad en la misma zona.

2.2 Energía en zona de aforo

$$E_1 = \frac{Va^2}{2g} + ha + N \quad \text{Ecuación 7}$$

En el cálculo de la energía en la entrada de la canaleta Parshall se debe aplicar la ecuación 7 en donde conocemos todos los valores a excepción de N, este valor se obtiene por la norma de la Tabla 1 para un diámetro de garganta de 2’’.

3. Zona de garganta (Antes del resalto)

3.1 Energía en la zona de garganta (Antes del resalto)

$$E_1 = E_2 \quad \text{Ecuación 8}$$

Aplicando Bernoulli de la sección 1 a la sección 2, y despreciando las pérdidas, se calcula energía en la zona de garganta antes del resalto mediante la Ecuación 8 (Mott, 2006).

3.2 Altura de la zona de garganta (Antes del resalto)

$$E_2 = \frac{Q^2}{2w^2h_2^2g} + h_2$$

$$Q = 2E_2w^2h_2^2g - 2w^2h_2^3g$$

$$2w^2gh_2^3 - 2E_2w^2gh_2^2 + Q^2 = 0 \quad \text{Ecuación 9}$$

Debido a que el flujo en la sección 2 debe tener régimen súper-crítico se toma la raíz menor al crítico que se obtiene al resolver la ecuación 9.

3.3 Velocidad en la zona de garganta (Antes del resalto)

$$V_2 = \frac{Q}{wh_2} \quad \text{Ecuación 10}$$

3.4 Sumergencia

$$hb = h_2 - N \quad \text{Ecuación 11}$$

$$S = \frac{hb}{ha} \quad \text{Ecuación 12}$$

Si la sumergencia de la canaleta expresada en la Ecuación 12 es superior a 0,7 se dice que la canaleta trabaja ahogada por ende no funciona como aforador. Por el contrario, si es menor, se dice que la canaleta trabaja con descarga libre y funciona como aforador

Se debe tener en cuenta que las canaletas parshall son apropiadas como aforadoras en canales abiertos, siempre y cuando operen con descarga libre. La medición de caudales con canaletas parshall, operando con descarga sumergida, es imprecisa, por lo cual no se recomienda su empleo en estas condiciones (Gutiérrez, 2008).

4. Zona de garganta (Después del resalto)

4.1 Numero de Froude en la zona garganta (Después del resalto)

$$F^2 = \frac{v_2^2}{gh_2} \quad \text{Ecuación 13}$$

4.2 Altura en la zona garganta (Después del resalto)

$$h_3 = \frac{h_2}{2} (\sqrt{1 + 8F^2} - 1) \quad \text{Ecuación 14}$$

Para un número de Froude dado del flujo próximo, la relación de la profundidad para propiciar el resalto hidráulico, a la profundidad inicial es dada por la Ecuación 14 (Bos, Replogle y Clemmens, 1986). De la misma forma mediante la Ecuación 14 se calcula la altura del agua después del resalto teniendo en cuenta la sección rectangular.

4.3 Velocidad en la zona de garganta (Después del resalto)

$$V_3 = \frac{Q}{wh_3} \quad \text{Ecuación 15}$$

5. Zona de divergencia

5.1 Altura de la zona de divergencia

$$h_4 = h_3 - N + K \quad \text{Ecuación 16}$$

5.1 Velocidad en la zona de divergencia

$$V_4 = \frac{Q}{wc} \quad \text{Ecuación 17}$$

Teniendo como base el caudal, el ancho de la garganta y la distancia de la zona de garganta después del resalto hasta la zona de divergencia se calcula la velocidad en la zona de divergencia a través de la Ecuación 17.

5.2 Energía en la zona de divergencia

$$E_4 = \frac{V_4^2}{2g} + h_4 \quad \text{Ecuación 18}$$

6. Tiempo

$$Vm = \frac{v_3 + v_4}{2} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$t = \frac{G'}{Vm} \quad \text{Ecuación 20}$$

Mediante la ecuación 19 se obtiene la velocidad promedio en la canaleta, la cual mediante la Ecuación 20 permite calcular el tiempo recorrido dentro de la canaleta Parshall.

7. Gradiente de velocidad (Temperatura= 18 °C)

$$\Delta h = E_1 - E_4 \quad \text{Ecuación 21}$$

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \Delta h}{\mu t}} \quad \text{Ecuación 22}$$

Una vez calculado el tiempo se calcula el gradiente hidráulico de la canaleta aplicando la ecuación 21, para poder aplicar las ecuaciones anteriores es necesario tener el valor de G que se haya en la Tabla 1 para canaletas de 2", así mismo se encuentra el valor de Δh que son las pérdidas de energía que produce la canaleta Parshall según el caudal.

Según las recomendaciones de diseño el gradiente hidráulico para la canaleta Parshall debe estar entre 1000 y 2000 para que tenga un funcionamiento óptimo (Comisión Nacional del Agua, 2007).

8.2 FASE DE CONSTRUCCIÓN

8.2.1 Materiales usados

Para el diseño y construcción de la canaleta Parshall fue necesario poseer o adquirir los

Siguientes materiales:

- Computador Windows 10
- Software AutoCAD versión 2019
- Lamina de acero inoxidable calibre 20 (2 x 2 m)
- Lamina de acrílico de 5 mm (0,2 x 1,17 m)
- Codos en acero (3)
- Soldadura TIG

8.2.2 Proceso constructivo

La construcción del dispositivo se realizó en el taller especializado en soldadura Colplat Ingeniera SAS. Se entregaron las medidas y los planos del diseño de la canaleta al establecimiento, quien se encargó del corte, pulido, doblado y soldadura de los materiales. En las fotos 1 a 5 se presenta el procedimiento y avance del proceso constructivo.

Una vez se obtuvieron los materiales, la primera etapa (Ilustración 1) fue el corte de los lados de cada sección, su doblado y adecuación según como lo indican los planos resultantes de la fase de diseño (Imagen 6 y 7).

Ilustración 1 Corte y Doblado de las Secciones de la Canaleta Parshall



Fuente: El autor.

La segunda etapa (Ilustración 2) fue el armado de las secciones en su posición correspondiente y el soldado de toda la estructura metálica.

Ilustración 2 Soldadura y Armado de la Estructura de la Canaleta.



Fuente: El autor.

La tercera etapa (Ilustración 3) fue el pulido, masillado y acabados de la estructura. En esta etapa se corrigieron las imperfecciones resultantes.

Ilustración 3 Pulido y Acabados de la Canaleta.



Fuente: El autor.

En la cuarta etapa (Ilustración 4) se hizo la instalación y adecuación de los codos metálicos como puntos de aforo y se lijó su interior para evitar obstrucciones.

Ilustración 4 Adecuación de los Puntos de Aforo en la Canaleta.



Fuente: El autor.

La quinta etapa (Ilustración 5) es la entrega de la estructura de la canaleta Parshall en acero inoxidable finalizada y lista para complementar con las demás partes del dispositivo.

Ilustración 5 Estructura Metálica Finalizada.

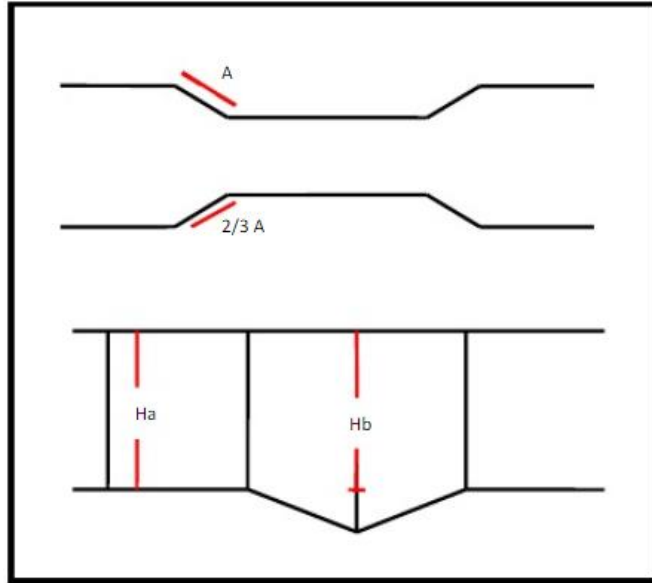


Fuente: El autor.

8.2.3 Práctica de laboratorio con la canaleta Parshall

Mediante la práctica de laboratorio en un sistema de canaleta Parshall, se desea medir los caudales por medio de una formula práctica y una formula experimental, hacer sus respectivas comparaciones y a su vez determinar el porcentaje de error en cada procedimiento.

Imagen 5 Esquema de una Canaleta Parshall



https://carlosquispeanccasi.files.wordpress.com/2011/12/hidraulica_ruiz.pdf

1. Una vez suministrada el agua requerida para sumergir toda la superficie de la canaleta, se toman diez lecturas en la escala, graduada en centímetros, del medidor Parshall, empezando por alturas pequeñas hasta llegar a las más altas, esperando un tiempo prudencial entre cada lectura para que la altura que indica la escala se estabilice y así obtener medidas precisas (Abarca, 2013). Para cada lectura se realizan dos aforos volumétricos en el tanque que se encuentra al final del canal hidrodinámico, utilizando un cronómetro para la toma de tiempos de llenado. Los datos medidos se consignan en la Tabla 5.

Tabla 5 Datos iniciales tomados en la canaleta Parshall

Altura 1 (cm)Bomba 0,6hp	Altura 2 (cm)Bomba 1Hp
---	---------------------------------------

6,3	10,2
6,5	10,5
6,9	10,9
7	11,1
7,2	11,7
7,4	12
6,9	12,4
6,8	12,2
7,1	12,7
7,3	12

Fuente: El Autor

1 Mediante la Ecuación 25, se determina el caudal para cada una de las dos lecturas tomadas en cada altura. Posteriormente se promedian los caudales de cada altura (Ecuación 26) para determinar el caudal real para cada altura de carga medida. Los datos medidos se consignan en la Tabla 5.

$$Q = \frac{V}{T} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$Qr = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad \text{Ecuación 26}$$

Tabla 6 Caudales determinados para cada altura en la canaleta Parshall

Altura 1 (cm)	Caudal 1 (l/s)	Altura 2 (cm)	Caudal 2 (l/s)	Caudal real (l/s)
6,3	1.6348	10,2	3.4467	2.5407
6,5	1.7158	10,5	3.6133	2.6646
6,9	1.8820	10,9	3.8376	2.8598
7	1.9244	11,1	3.9564	2.9404
7,2	2.0102	11,7	4.3024	3.1563

7,4	2.0973	12	4.4848	3.2910
6,9	1.8820	12,4	4.7292	3.3056
6,8	1.8400	12,2	4.6224	3.2312
7,1	1.9671	12,7	4.9303	3.4487
7,3	2.0536	12	4.5265	3.2900

Fuente: El autor.

2. Posteriormente, teniendo en cuenta la Ecuación 2, la cual posee el comportamiento de una ecuación de la recta se busca determinar los valores de K y n, en función de los caudales(Q) y la profundidad del agua(ha)(Quispe, 2015). En primera medida se saca logaritmo de Q y Ha como se ve en la ecuación 27(Tabla 7). Posteriormente en una hoja de Excel se realiza un grafica en la cual se posicionan los valores de los logaritmos de "Ha" en el eje "X" y los de los logaritmos de "Qr en el eje "Y".

$$\text{Log } Qr = \text{Log } K + n \text{ Log } H \quad \text{Ecuación 27}$$

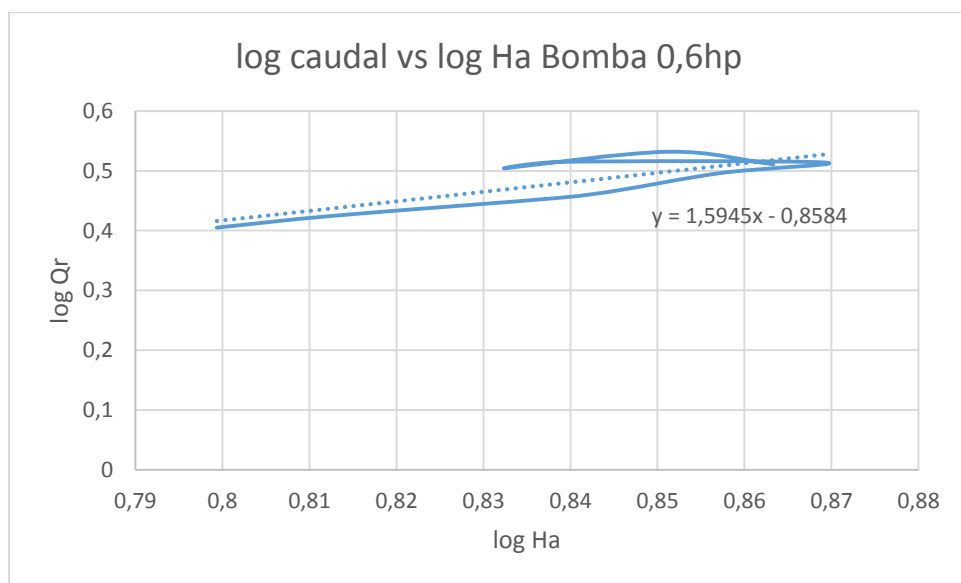
Tabla 7 Logaritmo de caudales y altura del agua

Altura (cm) Bomba 0,6 hp	Caudal real (l/s)	Log ha	Log Qr
6,3	2.5407	0.79934055	0.40495954
6,5	2.6603	0.81291336	0.42562977
6,9	2.8508	0.83884909	0.45633864
7	2.9265	0.84509804	0.46840805
7,2	3.1362	0.8573325	0.49917468
7,4	3.2649	0.86923172	0.51733028
6,9	3.2727	0.83884909	0.51925454
6,8	3.1937	0.83250891	0.50936078
7,1	3.4032	0.85125835	0.53765782
7,3	3.2431	0.86332286	0.51719886

Altura (cm) Bomba 1 hp	Caudal real (l/s)	Log ha	Log Qr
10,2	2.5407	1.00860017	0.40495954
10,5	2.6603	1.0211893	0.42562977
10,9	2.8508	1.0374265	0.45633864
11,1	2.9265	1.04532298	0.46840805
11,7	3.1362	1.06818586	0.49917468
12	3.2649	1.07918125	0.51733028
12,4	3.2727	1.09342169	0.51925454
12,2	3.1937	1.08635983	0.50936078
12,7	3.4032	1.10380372	0.53765782
12	3.2431	1.07918125	0.51719886

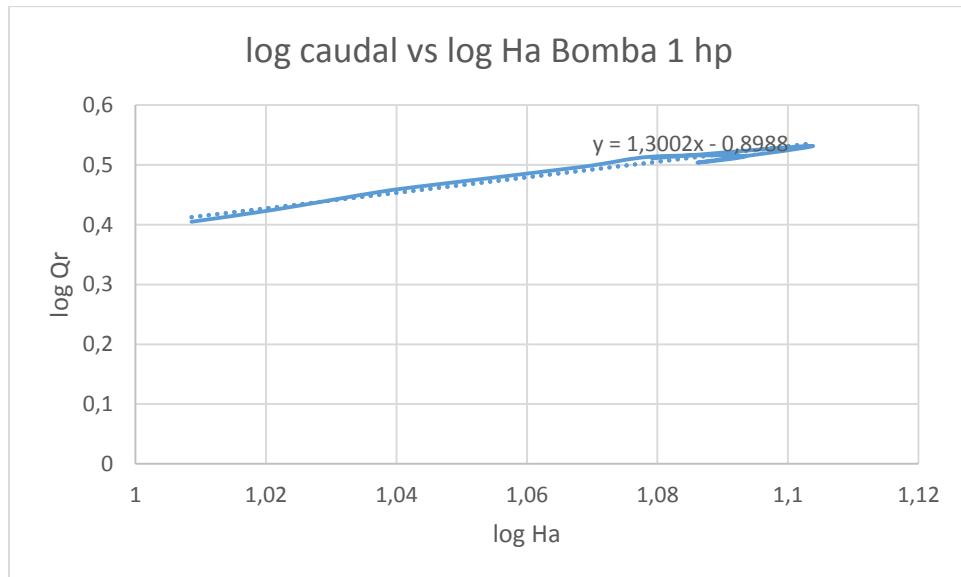
Fuente: El autor.

Gráfica 1 Log. Caudal vs Log. Ha Bomba 0,6 hp



Fuente: El autor

Gráfica 2 Log. Caudal vs Log. Ha Bomba 1 hp



Fuente: El autor

Una vez realizada la gráfica de logaritmos, en la hoja de Excel se genera una línea de tendencia y la ecuación para la línea de tendencia, dicha ecuación se sustituye como se ve en el siguiente ejemplo (Ecuación 28 y 29):

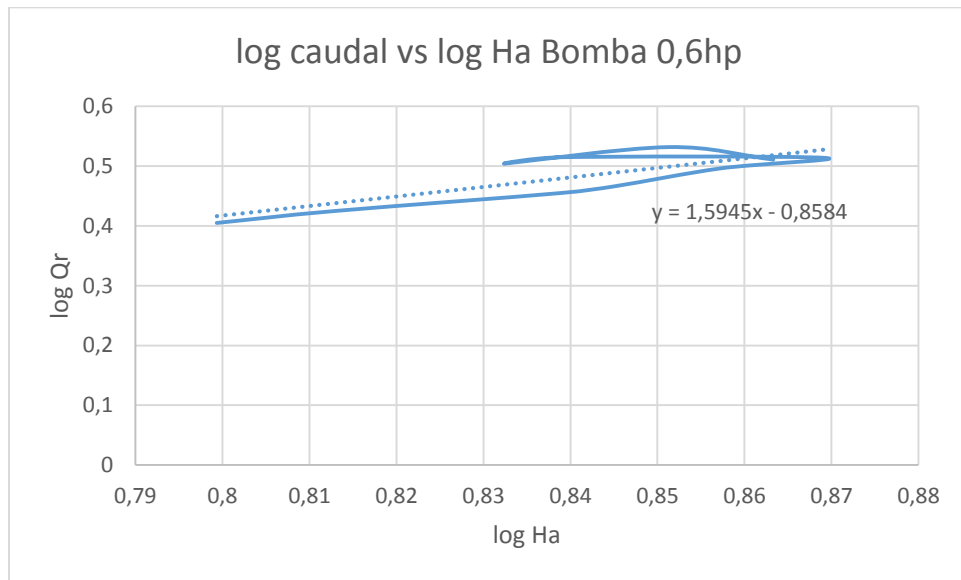
$$y = 1.5945x - 0.8584$$

Ecuación 28

$$\text{Log } Qr = 1.5945 \log ha - 0.8584$$

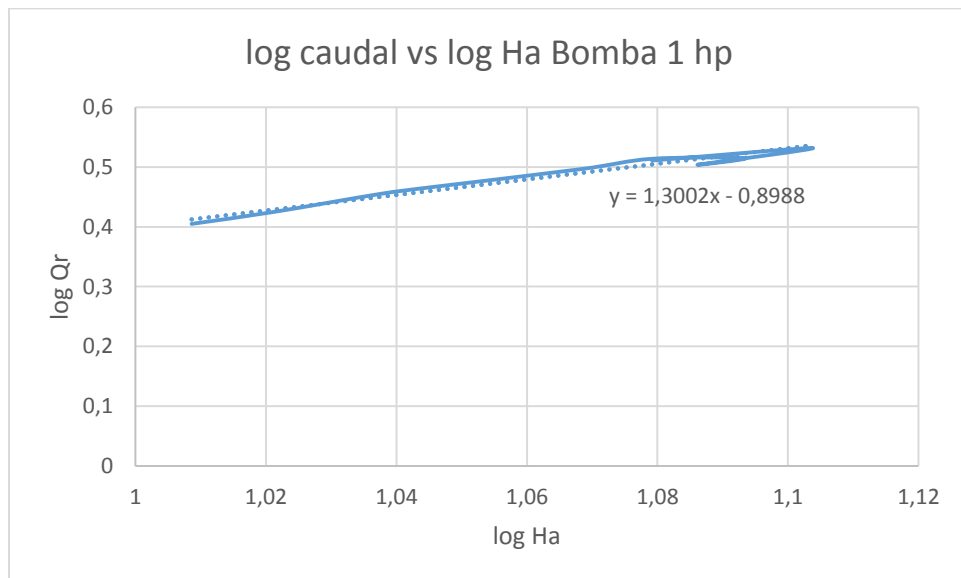
Ecuación 29

Gráfica 3 Log. Caudal vs Log Ha Bomba 0,6 hp Valores Sustituídos



Fuente: El autor

Gráfica 4 Log. Caudal vs Log Ha Bomba 1 hp Valores Sustituídos



Fuente: El autor

Partiendo de la ecuación se deduciría que el valor de $n = 1.5945$ y $n = 1.3002$ mientras que el valor de K se calcularía con la Ecuación 30

$$k = \log^{-1}(-0.8584) \quad \text{Ecuación 30}$$

$$k = \log^{-1}(-0.8988)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación general se obtiene la ecuación generada específica para el canal Parshall con garganta de 2 pulgadas.

3. Posteriormente, teniendo en cuenta la Ecuación 2, la cual posee el comportamiento de una ecuación de la recta se busca determinar los valores de K y n, en función de los caudales(Q) y la profundidad del agua(ha)(Quispe, 2015). En primera medida se saca logaritmo de Q y Ha como se ve en la ecuación 27(Tabla 7). Posteriormente en una hoja de Excel se realiza un grafica en la cual se posicionan los valores de los logaritmos de "Ha" en el eje "X" y los de los logaritmos de "Qr en el eje "Y".

$$\text{Log } Qr = \text{Log } K + n \text{ Log } H \quad \text{Ecuación 27}$$

Tabla 8 Logaritmo de caudales y altura del agua

Altura (cm)	Caudal real (l/s)	Log ha	Log Qr
6,3	2.5407	0.79934055	0.40495954
6,5	2.6603	0.81291336	0.42493799
6,9	2.8508	0.83884909	0.45497166
7	2.9265	0.84509804	0.46635523
7,2	3.1362	0.8573325	0.496406
7,4	3.2649	0.86923172	0.51387574
6,9	3.2727	0.83884909	0.51490807
6,8	3.1937	0.83250891	0.50429783
7,1	3.4032	0.85125835	0.5318841
7,3	3.2431	0.86332286	0.51095887

Fuente: El autor.

Una vez realizada la gráfica de logaritmos, en la hoja de Excel se genera una línea de tendencia y la ecuación para la línea de tendencia, dicha ecuación se sustituye como se ve en el siguiente ejemplo (Ecuación 28 y 29):

$$y = 1.3002x - 0.8988 \quad \text{Ecuación 28}$$

$$\text{Log } Qr = 1.3002 \log ha - 0.8988 \quad \text{Ecuación 29}$$

Partiendo de la ecuación se deduciría que el valor de $n = 1.3002$, mientras que el valor de K se calcularía con la Ecuación 30

$$k = \log^{-1}(-0.8988) = 0.1262 \quad \text{Ecuación 30}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación general se obtiene la ecuación generada específica para el canal Parshall con garganta de 2 pulgadas.

4. En función de comprobar la ecuación específica que se obtuvo para la práctica con el canal Parshall sea precisa, se grafican las alturas identificadas en la escala del medidor con los caudales reales determinados, generando una línea de tendencia que generara una ecuación para esta serie de datos. La ecuación generada se compara con la ecuación propuesta en el ejercicio anterior y se confirma si el procedimiento efectuado es confiable (Quispe, 2015; Estrada, 2017).

5. Seguidamente las alturas identificadas en la Tabla 8 se ingresan en la ecuación determinada en el tercer procedimiento para calcular los caudales calibrados (Q_c) y luego se comparan con los caudales reales, al mismo tiempo se calcula el porcentaje de error que existe entre cada uno de los caudales comparados (Ecuación 31).

$$\% \text{ Error} = \frac{Q_c - Q_r}{Q_c} \times 100 \quad \text{Ecuación 31}$$

Tabla 9 Porcentaje de error en función del caudal real y el caudal calibrado.

Altura (cm)	Caudal real Q_r (l/s)	Caudal generado con la ecuación del procedimiento 3 Q_c (l/s)	Error (%)
10,2	2.5407	2.5857	1.74
10,5	2.6603	2.6850	0.92
10,9	2.8508	2.8188	-1.14
11,1	2.9265	2.8862	-1.40
11,7	3.1362	3.0907	-1.47
12	3.2649	3.1941	-2.22
12,4	3.2727	3.3332	1.82
12,2	3.1937	3.2635	2.14
12,7	3.4032	3.4385	1.03
10,2	3.2431	3.1941	-1.53

Fuente: El autor.

Teniendo en cuenta los porcentajes de error generados, se determinara se afirmara si la ecuación determinada para la práctica de canaleta Parshall es confiable.

Por último se grafica el caudal real y los caudales calibrados en “x” y las alturas del agua medidas para la canaleta, con el fin de evidenciar si existe variación entre los caudales (Pulido y Carrillo, 2016; Hurtado, 2016)

8.3 MEZCLA RAPIDA

Para la mezcla rápida, se utilizó tinta y aglutinante, para observar de mejor manera el fenómeno, se indicaron tres puntos de aplicación para la práctica, pero técnicamente el aglutinante debe ser suministrado en el punto que se genera el resalto hidráulico, así por medio de la marca central podemos ver en qué punto se debe suministrar, de esta manera se puede ver como las partículas son perfectamente mezcladas por el resalto hidráulico.

9. RESULTADOS

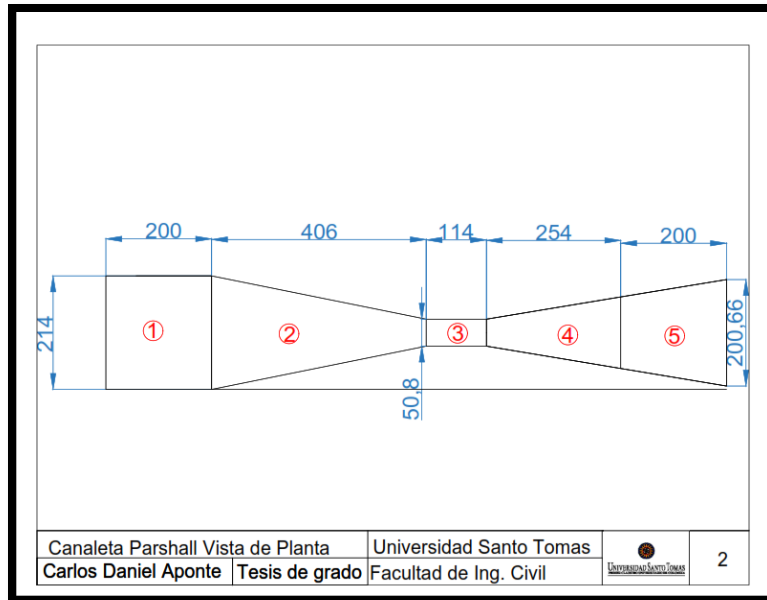
Las dimensiones calculadas para cada lado en la canaleta fueron evaluadas en un plano con el software AutoCAD Versión 2018, donde se pueden apreciar los modelos gráficos de su diseño.

La longitud de la canaleta es de 2194 mm, su ancho es de 337 mm y el grosor de sus paredes es de 60 mm. El ángulo en la sección de convergencia es de 169° y en la sección de

divergencia es 171° . En la Imagen 6 se puede apreciar el diseño con vista de planta donde se señalan las dimensiones de cada sección enumerada.

La sección 1 obedece a una cámara de aquietamiento en donde el flujo suministrado por la bomba se hace laminar al desbordarse por su abertura, esta presenta una inclinación de 14.03° previa al inicio de la sección 2. La sección 2 es la de convergencia, su longitud es de 406 mm y su anchura varia de 214 mm a 50,8 mm hasta la garganta. La sección 3 es la sección de la garganta, su longitud es de 114 mm, presenta una inclinación de $20,7^\circ$ y su ancho es de 50,8 mm hasta el inicio de la sección divergente. La sección 4 es la sección de divergencia, su longitud es de 254 mm y su anchura va de 50,8 mm a 134,64 mm, el inicio de la sección 5; adicionalmente presenta una inclinación de $4,7^\circ$. En la sección 5 la longitud es de 200 mm, no presenta inclinación y su ancho varia de 134,64 mm a 200,66 mm donde termina la estructura.

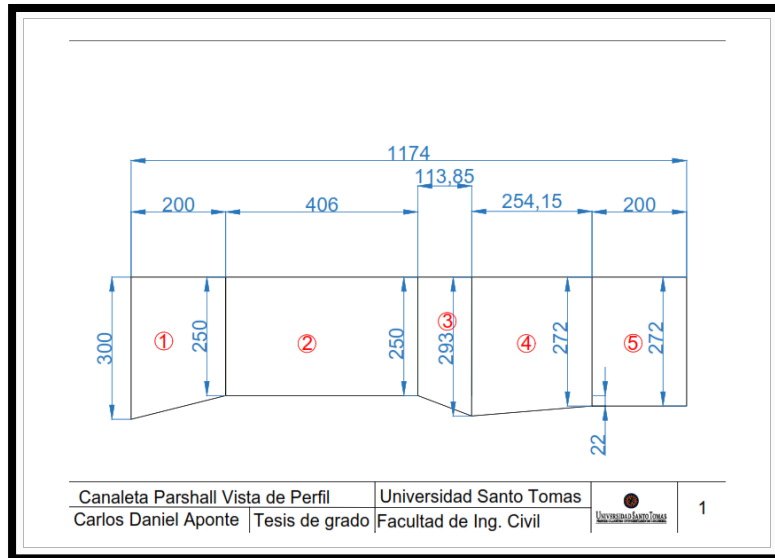
Imagen 6 Plano en Vista de Planta de la Canaleta Parshall



Fuente: El autor.

En la Imagen 7 se puede apreciar la vista de perfil de la estructura, donde se detallan sus alturas, longitudes y se evidencian sus cambios de pendiente.

Imagen 7 Plano en Vista de Perfil de la Canaleta Parshall



Fuente: El autor.

9.1 Cálculos de las condiciones hidráulicas en canaleta Parshall de 2 pulgadas.

1. Calculo de caudal (Q)

Para tener la altura con el caudal

$$Q = K ha^n$$

$$Q(PCS) = 0.676 ha^{1.55}$$

$$Q = 0.4 \frac{L}{S} = 0.01412 PCS$$

$$0.01412 PCS = 0.676 ha^{1.55}$$

$$ha = \left(\frac{Q}{K} \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$ha = \left(\frac{0.01412 PCS}{0.676} \right)^{\frac{1}{1.55}}$$

$$ha = 0.0824 ft \text{ (Altura a la entrada canaleta)}$$

$$ha = 0,025 m$$

2. Zona de aforo

2.1 Velocidad en zona de aforo

Ancho de la canaleta en la sección de aforo:

$$D' = \frac{2}{3}(D - W) + W$$

$$D' = \frac{2}{3}(21.4\text{cm} - 5.08\text{cm}) + 5.08\text{cm}$$

$$D' = 15.96\text{ cm} = 0.16\text{ m}$$

Velocidad:

$$Va = \frac{Q}{D' Ha}$$

$$Va = \frac{0.0004\text{ m}^3/\text{s}}{(0.16\text{ m})(0.025\text{ m})}$$

$$Va = 0.10\text{ m/s}$$

2.2 Energía en zona de aforo

$$E_1 = \frac{Va^2}{2g} + ha + N$$

$$E_1 = \frac{(0.10\text{ m/s})^2}{2(9.81\text{ m/s}^2)} + 0.0824\text{ m} + 0.0429\text{ m}$$

$$E_1 = 0.126\text{ m}$$

3. Zona de garganta (Antes del resalto)

3.1 Energía en la zona de garganta (Antes del resalto)

$$E_1 = E_2$$

3.2 Altura de la zona de garganta (Antes del resalto)

$$E_2 = \frac{Q^2}{2w^2h_2^2g} + h_2$$

$$Q^2 = 2E_2w^2h_2^2g - 2w^2h_2^3g$$

$$2w^2gh_2^3 - 2E_2w^2gh_2^2 + Q^2 = 0$$

$$2(0.0508\text{m})^2(9.81\frac{\text{m}}{\text{s}^2})h_2^3 - 2(0.126\text{m})(0.0508\text{m})^2(9.81\frac{\text{m}}{\text{s}^2})h_2^2 + (0.0004\text{m}^3/\text{s})^2 = 0$$

$$0.05063h_2^3 - 0.00638h_2^2 + 0.00000016 = 0$$

$$h_2 = \begin{pmatrix} 0.1258m \\ 0.00511m \\ -0.00491m \end{pmatrix}$$

$$h_2 = 0.0051m$$

3.3 Velocidad en la zona de garganta (Antes del resalto)

$$V_2 = \frac{Q}{Wh_2}$$

$$V_2 = \frac{0.0004m^3/s}{(0.0508m)(0.0051m)}$$

$$V_2 = 1.54m/s$$

3.4 Sumergencia

$$S = \frac{h_2}{ha}$$

$$S = \frac{0.0051m}{0.025m}$$

$$S = 0.204$$

3.5 Numero de Froude en la zona garganta (Después del resalto)

$$Nf = \frac{V_2}{\sqrt{gh_2}}$$

$$Nf = \frac{1.54m/s}{\sqrt{9.81m/s^2 * 0.00051m}}$$

$$Nf = 6.88$$

3.6 Altura en la zona garganta (Después del resalto)

$$h_3 = \frac{h_2}{2}(\sqrt{1 + 8F^2} - 1)$$

$$h_3 = \frac{0.0051\text{ m}}{2} \left(\sqrt{1 + 8(6.88)^2} - 1 \right)$$

$$h_3 = 0.0047\text{ m}$$

3.7 Velocidad en la zona de garganta (Después del resalto)

$$V_3 = \frac{Q}{Wh_3}$$

$$V_3 = \frac{0.0004\text{ m}^3/\text{s}}{(0.0508\text{ m})(0.0047\text{ m})}$$

$$V_3 = 1.68\text{ m/s}$$

4. Zona de divergencia

4.1 Altura de la zona de divergencia

$$h_4 = h_3 - N + K$$

$$h_4 = 0.0047\text{ m} - 0.0429\text{ m} + 0.022\text{ m}$$

$$h_4 = 0.0162\text{ m}$$

4.2 Velocidad en la zona de divergencia

$$V_4 = \frac{Q}{Wc}$$

$$V_4 = \frac{0.0004\text{ m}^3/\text{s}}{(0.0508\text{ m})(0.20066\text{ m})}$$

$$V_4 = 0.039\text{ m/s}$$

4.3 Energía en la zona de divergencia

$$E_4 = \frac{V_4^2}{2g} + h_4$$

$$E_4 = \frac{(0.039 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}})} + 0.0162$$

$$E_4 = 0.0163\text{m}$$

5. Tiempo

$$Vm = \frac{v_3 + v_4}{2}$$

$$Vm = \frac{1.68 \text{ m/s} + 0.039}{2} = 0.86 \text{ m/s}$$

$$t = \frac{d}{Vm}$$

$$t = \frac{(0.114\text{m} + 0.254\text{m})}{0.86 \text{ m/s}}$$

$$t = 0.368\text{s}$$

6. Gradiente de velocidad (Temperatura= 18 °C)

$$\Delta h = E_1 - E_4$$

$$\Delta h = 0.126\text{m} - 0.0163\text{m}$$

$$\Delta h = 0.11\text{m}$$

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \Delta h}{\mu t}}$$

$$G = \sqrt{\frac{(9792.6 \frac{\text{N}}{\text{m}^3})(0.11\text{m})}{(0.00106 \text{ N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2})(0.368\text{s})}}$$

$$G = 1661.76 \text{ s}^{-1}$$

9.2 DE CONSTRUCCIÓN (CAMBIAR FOTO POR ACTUAL)

El resultado final del proceso constructivo (Imagen 9), es un dispositivo didáctico de canaleta Parshall que obedece a las condiciones de diseño calculadas, con perfil frontal en acrílico, cámara de aquietamiento y sistema de recirculación del fluido.

Ilustración 6 Dispositivo de Canaleta Parshall Instalado y Entregado.



Fuente: El autor.

10. CONCLUSIONES

Ya que usualmente los diseños de canaleta Parshall involucran anchos de garganta mayores a dos pulgadas, estas canaletas pueden manejar caudales altos pero su precisión no es la misma en caudales bajos. En consecuencia, las canaletas con anchos de garganta mayores a dos pulgadas requieren de un suministro de agua alto, lo que perjudica su funcionamiento en espacios académicos con recursos limitados, como el laboratorio de hidráulica de la universidad. Es por esto, que el dispositivo de canaleta Parshall con ancho de garganta de dos pulgadas que fue diseñado en este proyecto se adecúa a las condiciones necesarias para su funcionamiento en el laboratorio, y posee las dimensiones óptimas para el análisis hidráulico en aulas de clase.

Como se puede evidenciar en los cálculos del diseño y del cambio de régimen del fluido dentro de la Canaleta (con el número de Froude), en la sección 4 se genera un resalto hidráulico. Esto confirma que el diseño de las dimensiones de la canaleta obedece al cambio de los tipos de flujo dentro del sistema, como se esperaba. Adicionalmente este resalto hidráulico permite al dispositivo tener una función distinta a la de aforo; añadiendo las cualidades de un mezclador rápido. Con esto, se puede incluir a la práctica de laboratorio la explicación y análisis de la mezcla rápida a partir de un resalto hidráulico, donde se puede evidenciar la dispersión del soluto en el fluido.

La cualidad del diseño de la canaleta de poseer un costado en lámina de acrílico con transparencia, brinda la capacidad al observador de evidenciar el comportamiento del agua, así también es muy fácil la recuperación de los datos de aforo.

Por medio de la administración de coagulante en la garganta del dispositivo, es posible observar la mezcla rápida gracias al resalto hidráulico, el acrílico permite observar la calidad de la misma.

Por medio de la guía de laboratorio que se realizó, el estudiante puede observar el paso a paso del manejo del dispositivo, explicando la importancia de la estructura, y la manera apropiada de calcular el caudal en este tipo de dispositivos, de esta manera el dispositivo se hace muy eficiente para la enseñanza, además la disposición de las respectivas métricas hace que la recolección de datos sea mucho más fácil.

El manual de operaciones se desarrolló orientado a solucionar cualquier tipo de problema que se presente con la instalación del dispositivo, por medio de ayudas graficas el profesor o técnico de laboratorio puede aplicar el mantenimiento preventivo del dispositivo, gracias a sus materiales se garantiza la duración del dispositivo.

11. RECOMENDACIONES

Para el manejo de la canaleta Parshall y sus equipos siempre es indispensable tener en cuenta el manual de operaciones, y las indicaciones del profesor o ayudante de laboratorio.

GLOSARIO

- Q: Caudal para condiciones de descarga libre (m^3/s)
- ha: Profundidad del agua en el punto de aforo (m)
- K y n: Constantes diferentes para cada ancho de la garganta
- Wa: Ancho de la zona de garganta antes del resalto (m)
- D: Ancho de la zona de aforo (m)
- W: Ancho de la zona de garganta (m)
- Va: Velocidad del agua en la zona de aforo (m/s)
- E1: Energía en la zona de aforo (m)
- g: Gravedad (m/s^2)
- N: Diferencia respecto al nivel de referencia (N)
- E2: Energía en la zona de garganta antes del resalto
- h2: Altura de la zona de garganta antes del resalto (m)
- V2: Velocidad en la zona de garganta antes del resalto (m/s)
- Hb: Profundidad del agua en la zona de garganta (m)
- S: Sumergencia
- F: Número de Froud
- h3: Altura en la zona de garganta después del resalto (m)
- V3: Velocidad en la zona de garganta después del resalto (m/s)
- h4: Altura en la zona de divergencia (m)
- Z: Diferencia de altura entre la zona de divergencia y la zona de aforo (m)
- E4: Energía en la zona de divergencia (m)
- V4: Velocidad en la zona de divergencia (m/s)
- c: Medida estándar de la canaleta en función del ancho de la garganta (m)
- Vm: Velocidad media después del resalto (m/s)
- t: Tiempo(s)
- G': Medida estándar de la canaleta en función del ancho de la garganta (m)
- G: Gradiente de velocidad (s)
- γ : Densidad (kg/m^3)
- h: Pérdida de energía (m)

μ : Viscosidad absoluta (Kg s/m²)

T: Temperatura (°C)

BIBLIOGRAFÍA

- Netto, A., Fernandez, M., & Fernandez, R. d. (2015). *Manual de hidráulica. (9th ed.)*. Sao Paulo: Edgar Blücher.
- Bermeo Tisoy, V. A., Restrepo Montoya, C., & Garcia Camacho, H. (2010). *Diseño Canaleta Parshall*. Armenia: Facultad de Ingenieria, Universidad del Quindio.
- Bos, M., Reploge, J., & Clemmens, A. (1986). *Aforadores de caudal para canales abiertos*. Wageningen, The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement ILRI,.
- Chow, V. T., & Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos* . Santafé de Bogota, Colombia : McGraw Hil. Obtenido de Hidraulica de Canales Abiertos .
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Sistemas de medición del agua: Producción, operación y consumo (9th ed.)*. México.
- Cristhian Felix Cadena Cornejo, M. R. (2018). *Escuela Superior Politécnica del Litoral*. Obtenido de Comparación de tipos de flujos, para diferentes secciones de canales.: https://www.researchgate.net/publication/322555700_Comparacion_de_tipos_de_flujos_para_diferentes_secciones_de_canales
- Giraldo, G. M. (2016). *Evaluación de los procesos de operación de la planta de tratamiento para potabilización de agua Villas antana ubicada en la ciudad de Pereira. Risaralda*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- González, E. P. (Diciembre, 2001). *Canal Parshall* . México : Comisión Nacional del Agua, CNA .
- Gutiérrez, G. E. (2017). *Laboratorio de hidráulica de canales*. FAVE Sección Ciencias Agrarias .
- Gutiérrez, M. A. (2008). *Calculos Hidráulicos*. España: EOI.

- Huamán, L. E. (2013). *Diseño hidráulico del canal de dissipación que conecta un conducto con flujo supercrítico con un aforador Parshall, empleando un modelo a escala*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Ingeniería Civil.
- Hudson, N. (1997). *Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía*. Obtenido de FAO - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: <http://www.fao.org/3/T0848S/T0848S00.htm>
- Ingenieros Asociados de Control, S.L. (s.f.). *Canal Parshall I.A.C S.L - Instrucciones de Montaje-*. Obtenido de <https://iac-sl.es/sites/default/files/Ccanales.PDF>
- L. Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Mexico : Pearson Educación de México.
- Molina, L. S. (1988). *Manual de Diseño de Estructuras de Aforo* . Obtenido de Repositorio IMTA, México : http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/825/IMTA_013.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Monroy, M. A. (Septiembre de 2010). *Medidores de Flujo en Canales Abiertos* . Obtenido de Universidad de San Carlos, Guatemala : http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3165_C.pdf
- Moreno, J. A. (2015). *Verificación del estado actual y necesidades del laboratorio de hidráulica de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bogotá* . Bogotá .
- Murillo, H. P. (1992). *Principios hidráulicos del funcionamiento del aforador Parshall en el canal principal Bagatzi*. Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Pedroza-González, E., & Ángel-Hurtado , J. L. (2012). *Variaciones en la calibración de un aforador parshall*. México .
- Perez, R. M. (1997, Medellín). *Fundamentos para las prácticas de laboratorio de hidráulica*. Obtenido de bdigital.unal: <http://bdigital.unal.edu.co/12572/>

- Pulido Muñoz , H. S., & Carrillo Bernal, M. F. (2016). *Diseño hidráulico de una planta de potabilización de agua en la vereda de San Antonio de Anapoima*. Bogotá: Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia .
- Water Resources. (2010). *dasasd*. dsas: das.
- Water Resources Research Laboratory. (1997). *Water Measurement Manual* . Obtenido de https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/WMM_3rd_2001.pdf