

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ANÁLISIS DE MEDIDORES DE CAUDAL PARA FLUJO SUBCRÍTICO
EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

CRISTINA ALEXANDRA TORRES JACOBOWITZ
crisale_664@hotmail.com

EDUARDO MAURICIO VÁSQUEZ FALCONES
eduvafsa@hotmail.com

DIRECTOR: DR. ING. MARCO CASTRO DELGADO
macd0706@gmail.com

Quito, Octubre 2010

DECLARACIÓN

Nosotros, Cristina Alexandra Torres Jacobowitz y Eduardo Mauricio Vásquez Falcones, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Cristina Alexandra Torres Jacobowitz

Eduardo Mauricio Vásquez Falcones

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristina Alexandra Torres Jacobowitz y Eduardo Mauricio Vásquez Falcones, bajo mi supervisión.

Dr. Ing. Marco Castro Delgado
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Un especial agradecimiento a mis padres, Antonio Torres y Margot Jacobowitz, por el apoyo, gracias a ellos estoy cumpliendo esta meta tan anhelada.

Gracias a la Escuela Politécnica Nacional por acogerme en sus aulas y brindarme una educación de calidad. A todas las personas que trabajan en la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, por su arduo trabajo. Gracias a todos los ingenieros que imparten sus conocimientos día a día con mucha responsabilidad por permitirme acceder a un gran aprendizaje profesional.

Un sincero agradecimiento al director de tesis, el Dr. Ing. Marco Castro Delgado por ayudarnos en todo momento con la dedicación que lo caracteriza.

Gracias a mi esposo y a mi hijo, por estar a mi lado en la culminación de esta meta.

Agradezco a mi familia porque siempre han estado pendientes de mí.

Cristina Torres J.

AGRADECIMIENTO

A mi esposa, coautora de este proyecto, porque hemos conseguido juntos el logro de terminar nuestra formación profesional.

A mi familia, por su apoyo a lo largo de mi carrera, especialmente a mis padres por su comprensión y aliento en los momentos difíciles.

Gracias al personal docente y administrativo de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental por compartir sus conocimientos y brindar su ayuda. A los trabajadores del laboratorio de hidráulica por su paciencia y colaboración en la realización de este proyecto.

Eduardo Vásquez F.

DEDICATORIA

A mi esposo Eduardo y a mi hijo Eduardito por estar siempre conmigo y ser mi fuerza de cada día. A mis padres Margot Jacobowitz y Antonio Torres por ser un ejemplo de trabajo honesto. Es por ustedes que estoy logrando esta meta.

Cristina Torres J.

DEDICATORIA

A mi hijo Eduardo, quien llenó de alegría los últimos momentos de mi formación profesional, además de ser la inspiración para lograr esta meta.

Eduardo Vásquez F.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
DEDICATORIA.....	VI
CONTENIDO.....	VII
RESUMEN.....	XIX
PRESENTACIÓN.....	XX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES: DEFINICIONES SOBRE EL FLUJO SUBCRÍTICO EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE TEÓRICA SOBRE FLUJO SUBCRÍTICO, FLUJO HOMOGÉNEO Y RESISTENCIA AL MOVIMIENTO	1
1.2.1 FLUJO SUBCRÍTICO.....	1
1.2.2 FLUJO HOMOGÉNEO.....	2
1.2.3 RESISTENCIA AL MOVIMIENTO.....	2
1.3 GENERALIDADES SOBRE LA MODELACIÓN FÍSICA DE FLUJOS A GRAVEDAD A TRAVÉS DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS CON CONTRACCIONES GEOMÉTRICAS	3
1.4 DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS CLÁSICAS DE SOLUCIÓN DEL PERFIL DE FLUJO EN RÉGIMEN SUBCRÍTICO.....	5
1.5 OBJETIVOS Y RESTRICCIONES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN	8
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	8
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.5.3 RESTRICCIONES.....	10
1.6 CONCLUSIONES.....	10

2. CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE MEDICIÓN DE CAUDALES EN FLUJO SUBCRÍTICO.....	11
2.1 ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES Y DE PRESIONES EN SECCIONES TRANSVERSALES CONVERGENTES EN RÉGIMEN SUBCRÍTICO.....	11
2.2 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MOVIMIENTO ACELERADO CON SUPERFICIE LIBRE.....	14
2.2.1 EFECTO DE LA VISCOSIDAD.....	14
2.2.2 EFECTO DE LA DENSIDAD DEL FLUJO.....	15
2.2.3 EFECTO DE LA GRAVEDAD.....	16
2.2.4 SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CANAL.....	16
2.3 SÍNTESIS DE LA RELACIÓN FUNCIONAL CAUDAL VS. PROFUNDIDAD DE AGUA EN RÉGIMEN SUBCRÍTICO.....	19
2.4 CONCLUSIONES.....	20
3. ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FLUJO EN LOS CANALES TIPO PALMER & BOWLUS Y TIPO PARSHALL. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS PARA LABORATORIO.....	21
3.1 INTRODUCCIÓN: BASES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL PROBLEMA.....	21
3.1.1 GRUPOS ADIMENSIONALES IMPORTANTES EN LA MECÁNICA DE FLUIDOS.....	22
3.2 RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA.....	24
3.2.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL CANAL DE AFORO PARSHALL.....	24
3.2.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS	28
3.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES.....	31
3.4 RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA Y BASES PARA LA FORMULACIÓN EXPERIMENTAL.....	33
3.5 DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES Y DE LOS MODELOS.....	38
3.5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES.....	38
3.5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS.....	44
3.5.2.1 CANAL DE AFORO PARSHALL.....	44

3.5.2.1.1	PARTES PRINCIPALES DEL CANAL DE AFORO PARSHALL	45
3.5.2.1.2	CARACTERÍSTICAS DE DESCARGA DEL AFORADOR PARSHALL	46
3.5.2.1.3	DESCARGA LIBRE Y SUMERGENCIA	49
3.5.2.1.4	REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES DE INSTALACIÓN DEL AFORADOR PARSHALL	51
3.5.2.1.5	VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO	52
3.5.2.1.6	REGISTRO DE LECTURAS Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	54
3.5.2.1.7	MODELO CANAL PARSHALL 7.62 cm	55
3.5.2.1.7.1	CURVA DE DESCARGA MODELO CANAL PARSHALL 7.62 cm	58
3.5.2.1.7.2	CURVA DE DESCARGA MODELO CANAL PARSHALL 7.62 cm PREDETERMINADO EN EL MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0	61
3.5.2.2	CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS	63
3.5.2.2.1	PRINCIPIOS HIDRÁULICOS DEL AFORADOR PALMER-BOWLUS	63
3.5.2.2.2	CLASIFICACIÓN DEL AFORADOR PALMER-BOWLUS	64
3.5.2.2.3	PARTES PRINCIPALES DEL AFORADOR PALMER-BOWLUS	65
3.5.2.2.4	CONDICIONES NECESARIAS PARA EL DISEÑO DE UN AFORADOR PALMER-BOWLUS	67
3.5.2.2.5	AFORADORES PALMER BOWLUS PREFABRICADOS	68
3.5.2.2.6	CALCULO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN DEL AFORADOR PALMER-BOWLUS	68
3.5.2.2.7	PARÁMETROS REQUERIDOS PARA EL CÁLCULO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN	72
3.5.2.2.8	SECUENCIA DE CÁLCULO DE UN AFORADOR PALMER-BOWLUS	74
3.5.2.2.9	AFORADOR PALMER-BOWLUS PARA CANAL DE SECCIÓN CIRCULAR	75

3.5.2.2.10	AFORADOR PALMER-BOWLUS PARA MEDICIÓN EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO.....	78
3.5.2.2.11	MODELO CANAL PALMER-BOWLUS 33 cm.....	79
3.5.2.2.11.1	CÁLCULO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO CANAL PALMER-BOWLUS $Q = F(H_0)$	81
3.5.2.2.11.2	TRAZADO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN.....	88
3.6	CONCLUSIONES.....	88
4.	SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL.....	90
4.1	ANÁLISIS DE LAS RELACIONES FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA.....	90
4.1.1	ANÁLISIS DE LAS RELACIONES FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA, CANAL DE AFORO PARSHALL.....	90
4.1.2	ANÁLISIS DE LAS RELACIONES FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA, CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS.....	91
4.2	ANÁLISIS DE LA RELACIÓN FUNCIONAL OBTENIDA DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	94
4.3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES EN LOS MODELOS DEL LABORATORIO	97
4.3.1	RESULTADOS DE CAUDAL Y CALADO EXPERIMENTALES DEL CANAL DE AFORO PARSHALL Y DEL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS.....	99
4.3.1.1	CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL CON LOS DATOS OBTENIDOS CON EL MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0 EN EL CANAL DE AFORO PARSHALL.....	101
4.3.1.2	CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL CON LOS DATOS OBTENIDOS CON EL MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0 EN EL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS.....	102
4.3.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE VARIACIÓN DEL CAUDAL EN UN TIEMPO DETERMINADO (T = 2 HORAS) TOMANDO DATOS CADA MINUTO.....	103
4.3.3	ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE CARGA EN LOS AFORADORES PARSHALL Y PALMER-BOWLUS.....	105

4.4	SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES.....	106
4.4.1	SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES EN EL MODELO CANAL PARSHALL 7.62 cm DEL LABORATORIO.....	107
4.4.2	SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES EN EL MODELO CANAL PALMER-BOWLUS 33 cm DEL LABORATORIO.....	110
4.5	CONCLUSIONES.....	114
5.	GUÍA PARA LA EJECUCIÓN DE LA PRÁCTICA DOCENTE EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL.....	115
5.1	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FÍSICO.....	115
5.2	CONDICIONES HIDRÁULICAS A LA ENTRADA Y A LA SALIDA PARA ESTAS ESTRUCTURAS.....	116
5.3	GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO DE UN MEDIDOR DE CAUDAL.....	117
5.3.1	CANAL DE AFORO PARSHALL.....	117
5.3.2	CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS.....	121
5.4	CONCLUSIONES.....	124
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	126
6.1	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL CANAL DE AFORO PARSHALL.....	126
6.2	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS.....	127
6.3	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	128
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
	ANEXO 1: GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA.....	130
	ANEXO 2: MANUAL DE OPERACIÓN MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0.....	141
	ANEXO 3: DATOS EXPERIMENTALES.....	160
	ANEXO 4: PLANOS.....	165

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 2.1:	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN UN CANAL RECTANGULAR.....	12
FIGURA 2.2:	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN UN CANAL RECTANGULAR ANGOSTO.....	12
FIGURA 2.3:	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN CANALES CIRCULARES.....	12
FIGURA 2.4:	SECCIONES TRANSVERSALES COMUNES EN CANALES	17
FIGURA 3.1:	PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PRINCIPALES DEL AFORADOR PARSHALL.....	24
FIGURA 3.2:	PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PRINCIPALES DEL AFORADOR PALMER-BOWLUS.....	28
FIGURA 3.3:	GRAFICA DE LA RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA C_q vs. W/Ha	35
FIGURA 3.4:	GRAFICA DE LA RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA C_q vs. D/ho	37
FIGURA 3.5:	PARTES PRINCIPALES DEL AFORADOR PARSHALL.....	45
FIGURA 3.6:	NOMENCLATURA DE LAS PARTES DEL AFORADOR PARSHALL.....	48
FIGURA 3.7:	DIMENSIONES (cm) DEL MODELO CANAL PARSHALL 7.62 cm INSTALADO EN EL LABORATORIO.....	57
FIGURA 3.8:	CURVA DE CALIBARCÓN OBTENIDA CON EL CUADRO 3.12.....	59
FIGURA 3.9:	CURVA DE CALIBARCÓN OBTENIDA CON EL CUADRO 3.13.....	61
FIGURA 3.10:	CURVA DE CALIBARCÓN OBTENIDA CON EL CUADRO 3.14.....	62
FIGURA 3.11:	CLASIFICACIÓN DE AFORADORES PALMER-BOWLUS	64
FIGURA 3.12:	REGÍMENES DE FLUJO EN EL AFORADOR PALMER-BOWLUS.....	66

FIGURA 3.13:	AFORADOR PALMER-BOWLUS PARA SECCIÓN CIRCULAR	75
FIGURA 3.14:	DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS DE LA SECCIÓN DE LA GARGANTA DEL AFORADOR PALMER-BOWLUS.....	77
FIGURA 3.15:	DIMENSIONES DEL MODELO CANAL PALMER-BOWLUS INSTALADO EN EL LABORATORIO.....	80
FIGURA 3.16:	CURVA DE CALIBRACIÓN AFORADOR PALMER-BOWLUS	88
FIGURA 4.1:	CURVA DE CALIBRACIÓN Y ECUACIÓN QUE REPRESENTA EL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm.....	93
FIGURA 4.2:	COMPARACIÓN ENTRE LA RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA Y LA RELACIÓN FUNCIONAL OBTENIDA DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL CANAL PARSHALL.....	95
FIGURA 4.3:	COMPARACIÓN ENTRE LA RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA Y LA RELACIÓN FUNCIONAL OBTENIDA DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL CANAL PALMER-BOWLUS.....	97
FIGURA 4.4:	DISTANCIAS DE CALIBRACIÓN.....	98
FIGURA 4.5:	CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL (GREYLINE OCF 4.0) OBTENIDA CON LOS DATOS DEL CUADRO 4.5	101
FIGURA 4.6:	CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL (GREYLINE 4.0) OBTENIDA CON LOS DATOS DEL CUADRO 4.5.....	102
FIGURA 4.7:	REGISTRO DE DATOS DEL MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0 ENTRE LAS 10H31 Y LAS 12H25.....	104
FIGURA 4.8:	CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL (H_A EN mm) OBTENIDA CON LOS VALORES DEL CUADRO 4.7.....	108
FIGURA 4.9:	CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL (H_a en m) OBTENIDA CON LOS VALORES DEL CUADRO 4.7.....	109
FIGURA 4.10:	COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS CANAL DE AFORO PARSHALL 7.62 cm.....	110
FIGURA 4.11:	CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL OBTENIDA CON LOS VALORES DEL CUADRO 4.8.....	112

FIGURA 4.12:	COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS.....	113
FIGURA 5.1:	DIMENSIONES AFORADOR PARSHALL COMO SE MUESTRA EN EL CUADRO 5.2.....	120
FIGURA 5.2:	DIMENSIONES AFORADOR PALMER-BOWLUS.....	122

LISTADO DE CUADROS

CUADRO 1.1:	TIPOS DE PERFILES DE FLUJO.....	6
CUADRO 3.1:	VARIABLES RELEVANTES EN LOS PROCESOS DE FLUJO FLUIDO.....	22
CUADRO 3.2:	PARÁMETROS ADIMENSIONALES IMPORTANTES EN LA MECÁNICA DE FLUIDOS.....	23
CUADRO 3.3:	VARIABLES FÍSICAS Y MAGNITUDES FUNDAMENTALES DEL CANAL DE AFORO PARSHALL.....	25
CUADRO 3.4:	MATRIZ QUE EXPRESA LAS VARIABLES FÍSICAS EN TÉRMINOS DE LAS MAGNITUDES FUNDAMENTALES.....	26
CUADRO 3.5:	VARIABLES FÍSICAS Y MAGNITUDES FUNDAMENTALES DEL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS.....	29
CUADRO 3.6:	MATRIZ QUE EXPRESA LAS VARIABLES FÍSICAS EN TÉRMINOS DE LAS MAGNITUDES FUNDAMENTALES.....	29
CUADRO 3.7:	CALCULO DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES EN FUNCIÓN DE LOS DATOS TOMADOS EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PARSHALL 7,62 cm.....	34
CUADRO 3.8:	CALCULO DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES EN FUNCIÓN DE LOS DATOS TOMADOS EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm.....	36
CUADRO 3.9:	VALORES DE K Y n EN LA ECUACIÓN (3.34) PARA DIFERENTES ANCHOS DE LA GARGANTA	47
CUADRO 3.10:	VALORES PERMITIDOS DE SUMERGENCIA (S) EN LOS AFOROS PARSHALL.....	50
CUADRO 3.11:	PROFUNDIDADES MÍNIMAS Y MÁXIMAS EN AFORADORES PARSHALL.....	53
CUADRO 3.12:	CAUDALES OBTENIDOS CON LA ECUACIÓN 3.37.....	58
CUADRO 3.13:	CAUDALES OBTENIDOS CON LA ECUACIÓN 3.38.....	60
CUADRO 3.14:	CAUDALES OBTENIDOS CON LA ECUACIÓN 3.39.....	62
CUADRO 3.15:	CALCULO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN DEL MODELO CANAL PALMER-BOWLUS $q = f(h_0)$	81

CUADRO 4.1:	FÓRMULAS FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA PARA EL CANAL DE AFORO PARSHALL.....	90
CUADRO 4.2:	RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN DEL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm.....	92
CUADRO 4.3:	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL OBTENIDOS CON LOS DATOS TEÓRICOS CANAL DE AFORO PARSHALL 7.62 cm.....	94
CUADRO 4.4:	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL OBTENIDOS CON LOS DATOS TEÓRICOS CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm.....	96
CUADRO 4.5:	CALADO Y CAUDAL OBTENIDO EXPERIMENTALMENTE EN LOS CANALES DE AFORO PARSHALL Y PALMER BOWLUS CON EL MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0. RESULTADOS DE CAUDAL Y CALADO OBTENIDOS CON EL VERTEDERO.....	100
CUADRO 4.6:	RESULTADOS OBTENIDOS DEL MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0.....	103
CUADRO 4.7:	CALADOS Y CAUDAL MEDIDO EN LOS AFORADORES, PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDA DE ENERGÍA.....	105
CUADRO 4.8:	PÉRDIDAS DE ENERGÍA CALCULADAS EN LOS AFORADORES.....	105
CUADRO 4.9:	CALADO OBTENIDO EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PARSHALL 7.62 cm Y CAUDAL CALCULADO CON LA EC. 4.4 DEL VERTEDERO TRIANGULAR 60°.....	107
CUADRO 4.10:	CALADO OBTENIDO EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm Y CAUDAL CALCULADO CON LA Ec. 4.4 DEL VERTEDERO TRIANGULAR 60°.....	111
CUADRO 5.1:	CARACTERÍSTICAS DE DESCARGA PARA AFORADORES PARSHALL.....	118
CUADRO 5.2:	DIMENSIONES ESTÁNDAR DE LOS AFORADORES PARSHALL.....	119
CUADRO 5.3:	CARACTERÍSTICAS DE DESCARGA PARA AFORADORES PALMER-BOWLUS.....	121

LISTADO DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFÍA 3.1:	CUARTO DE MÁQUINAS Y SISTEMA DE BOMBEO.....	38
FOTOGRAFÍA 3.2:	TANQUE ELEVADO.....	39
FOTOGRAFÍA 3.3:	TUBERIA DE ADMISIÓN.....	39
FOTOGRAFÍA 3.4:	TANQUES DE CARGA.....	40
FOTOGRAFÍA 3.5:	VERTEDERO TRIANGULAR 60°.....	40
FOTOGRAFÍA 3.6:	PIEZOMETRO CON LIMNIMETRO.....	41
FOTOGRAFÍA 3.7:	CANAL DE ENTRADA.....	41
FOTOGRAFÍA 3.8:	MODELO CANAL DE AFORO PARSHALL 7.62 cm (3").....	42
FOTOGRAFÍA 3.9:	TANQUE DISIPADOR DE ENERGÍA.....	42
FOTOGRAFÍA 3.10:	MODELO CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33cm.....	43
FOTOGRAFÍA 3.11:	SENSOR DE ULTRASONIDO.....	43
FOTOGRAFÍA 3.12:	MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0.....	44
FOTOGRAFÍA 3.13:	AFORADOR PALMER-BOWLUS PREFABRICADO.....	79

RESUMEN

El Proyecto de Investigación Análisis de Medidores de Caudal para Flujo Subcrítico en Sistemas de Alcantarillado, pretende ampliar la utilización de este tipo de medidores de caudal en nuestro medio, principalmente la del canal de aforo Palmer-Bowlus, debido a que el uso de este, es poco común en nuestro país.

Mediante la comparación entre varios tipos de aforadores como son: vertedero triangular, canal de aforo Parshall y canal de aforo Palmer-Bowlus, se verificó el correcto funcionamiento de cada una de estas estructuras, y se llegó a demostrar que el canal de aforo Palmer-Bowlus es ideal para ser usado en la medición de caudales en sistemas de alcantarillado, debido a que los datos obtenidos con esta estructura son confiables y su sección transversal es compatible con la utilizada en sistemas de alcantarillado.

El presente trabajo de titulación o tesis de grado presenta la información teórica y experimental de los medidores de caudal, para que sea una guía en el estudio y análisis de los mismos.

Los modelos construidos en el Laboratorio de Hidráulica de la FICA, podrán ser utilizados para realizar prácticas estudiantiles, que facilitarán la comprensión del funcionamiento de los aforadores de caudal.

El estudio de los aforadores se complementa con la utilización del monitor de flujo Greyline OCF 4.0, siendo este una herramienta práctica y automatizada en el registro de datos obtenidos experimentalmente en cada aforador.

PRESENTACIÓN

A continuación se presenta el desarrollo del proyecto de titulación: Análisis de Medidores de Caudal para Flujo Subcrítico en Sistemas de Alcantarillado. El estudio presenta inicialmente una introducción con antecedentes de las características hidráulicas del flujo subcrítico, la modelación de estructuras hidráulicas y los objetivos que se procura obtener al realizar el estudio. A continuación se analizan las características hidrodinámicas que se presentan en las estructuras de medición de caudal.

Para la realización de un estudio profundo de los aforadores se presenta un análisis dimensional de cada una de las estructuras y las características físicas e hidráulicas de los mismos. Se presenta también la descripción de los modelos construidos e instalados en el laboratorio de hidráulica de la FICA, y su funcionamiento en conjunto con estructuras instaladas anteriormente.

En base a los resultados experimentales obtenidos con el uso de los modelos, se presentan cuadros y gráficos de calibración, comparación, y análisis de las estructuras.

A continuación se describe las características de flujo que se debe tener para el correcto funcionamiento de los aforadores y se presenta una guía de dimensionamiento geométrico, que facilitará la construcción de aforadores de diferentes tamaños.

Basándose en la experiencia obtenida se presentan las conclusiones y recomendaciones para el correcto uso de cada aforador.

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES: DEFINICIONES SOBRE EL FLUJO SUBCRÍTICO EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

Las estructuras de Medición de caudales son recomendables para aquellas aplicaciones en las que se tenga concentraciones moderadas de sedimentos y en donde las velocidades de flujo al ingresar al aforador son subcríticas. El aforador opera con una pequeña pérdida de energía. Los aforadores son ideales para la medición de fluidos en canales de riego y principalmente en alcantarillado

La condición normal de flujo en conductos circulares de alcantarillado, es a sección parcialmente llena, con una superficie de agua libre y en contacto con el aire.

1.2 DESCRIPCIÓN DE LA BASE TEÓRICA SOBRE FLUJO SUBCRÍTICO, FLUJO HOMOGÉNEO Y RESISTENCIA AL MOVIMIENTO

1.2.1 FLUJO SUBCRÍTICO

También denominado flujo lento, en este estado el papel jugado por las fuerzas gravitacionales es más pronunciado por lo tanto se presenta una velocidad de flujo baja, tiene una profundidad de flujo alta y se genera en condiciones de baja pendiente.

Para este régimen de flujo las fuerzas inerciales son sobrepasadas en importancia por las gravitacionales; en el flujo se tienen velocidades y pendientes bajas, pero las profundidades de la lámina de agua, por el contrario, son mayores que las que se presentan en el flujo supercrítico. Para este tipo de flujo un aumento en la

energía se traduce en un aumento en la profundidad de la lámina de agua. El número de Froude en este estado es menor a 1.

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

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D_H}} \quad (1.1)$$

En ella se relaciona la velocidad, gravedad y profundidad hidráulica; esta última está definida como el cociente entre el área mojada y el ancho de la superficie del canal.

En el caso del flujo subcrítico, también denominado flujo lento, el nivel efectivo del agua en una sección determinada está condicionado a la condición de contorno situada aguas abajo (Reyes, 2007).

1.2.2 FLUJO HOMOGÉNEO

La variación de la densidad del flujo hace que se clasifique como homogéneo o estratificado. Si en todas las dimensiones espaciales la densidad del flujo es constante, se dice que el flujo es homogéneo, pero si la densidad varía en cualquier dirección el flujo es estratificado, como es el caso de grandes embalses o cuando hay cambios de temperatura. (M. E. Guevara A., 2006)

1.2.3 RESISTENCIA AL MOVIMIENTO

En flujos en canales abiertos, la resistencia al movimiento del flujo puede ignorarse en una transición corta como una primera aproximación, y se puede aplicar las condiciones de continuidad (la masa dentro de un sistema cerrado permanece constante en el tiempo) y de Bernoulli (si no existieran pérdidas por fricción, la suma de la energías potencial y cinética y el trabajo de las fuerzas sería constante) para estimar las propiedades de flujo aguas abajo como funciones de las propiedades de flujo aguas arriba y las condiciones de frontera

(superficies de frontera clasificadas como hidráulicamente lisas o rugosas). La aproximación de flujo sin fricción no es válida para canales largos.

En hidráulica de canales abiertos, el flujo por debajo de una compuerta deslizante o un resalto hidráulico; o el flujo por encima de un vertedero o en una caída o elevación abrupta puede considerarse como una transición corta (Hubert Chanson 2004).

Las leyes de la resistencia al flujo en canales abiertos son en esencial las mismas que aquellas para tuberías cerradas (Henderson 1966). En un canal abierto, los cálculos del esfuerzo cortante de frontera son complicados debido a la existencia de la superficie libre y a la gran variedad de formas de la sección transversal.

Otra diferencia es la fuerza propulsiva que actúa en la dirección del flujo. En tuberías cerradas, el flujo es movido por un gradiente de presión a lo largo de la tubería mientras que, en fluidos en canales abiertos, el flujo es movido por el peso del agua que fluye hacia abajo de una pendiente (Hubert Chanson 2004).

1.3 GENERALIDADES SOBRE LA MODELACIÓN FÍSICA DE FLUJOS A GRAVEDAD A TRAVÉS DE ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS CON CONTRACCIONES GEOMÉTRICAS

A diferencia de otros campos del trabajo científico, la ingeniería hidráulica moderna ha estado y sigue estando basada en gran medida en la experimentación.

Es importante analizar el diseño, construcción, y uso de los modelos físicos para la observación de los fenómenos de flujo en canales abiertos.

El modelo en el ambiente del laboratorio para la solución de problemas de ingeniería hidráulica requiere un entendimiento claro y preciso de los principios de similitud.

SIMILITUD GEOMÉTRICA.- dos objetos son geoméricamente similares si las razones de sus dimensiones correspondientes son iguales. Por eso, la similitud geométrica se refiere solo en similitud en la forma.

SIMILITUD CINEMÁTICA.- dos movimientos son cinemáticamente similares si: a) los patrones o trayectorias del movimiento son geoméricamente similares y b) las razones de las velocidades de las partículas involucradas en los dos movimientos son iguales.

SIMILITUD DINÁMICA.- dos movimientos son dinámicamente similares si a) la razón de las masas de los objetos involucrados son iguales y b) las razones de las fuerzas que afectan el movimiento son iguales.

La similitud geométrica y cinemática se puede lograr en la generalidad de las situaciones de modelaje, caso contrario con la dinámica que es muy difícil de lograr.

Los modelos basados en la ley de Froude aseveran que la fuerza primordial que causa el movimiento del fluido es la gravedad y que todas las otras fuerzas, como la fricción del fluido y la tensión superficial, pueden despreciarse.

$$F_M = F_P \quad (1.2)$$

F_M : Número de Froude del modelo, y

F_P : Número de Froude del prototipo.

Se resuelve la ecuación anterior:

$$U_R = \frac{U_M}{U_P} = \left(\frac{g_M L_M}{g_P L_P} \right)^{1/2} = \sqrt{g_R L_R} \quad (1.3)$$

Dónde:

R: Subíndice que indica la razón entre la variable del modelo al prototipo,

U_R : Razón de velocidad,

L_R : Razón de escala de longitud, y

g_R : Razón de gravedad = 1.

$$U_R = \sqrt{L_R} \quad (1.4)$$

Expresamos la velocidad en términos de distancia y tiempo:

$$\frac{U_M}{U_P} = \frac{L_M / T_M}{L_P / T_P} = \frac{T_P L_M}{T_M L_P} = \frac{L_R}{T_R} \quad (1.5)$$

Al sustituir la ecuación 1.4 se tiene:

$$T_R = \sqrt{L_R} \quad (1.6)$$

Donde T_R = escala de tiempos (Richard H. French 1988)

1.4 DESCRIPCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS CLÁSICAS DE SOLUCIÓN DEL PERFIL DE FLUJO EN RÉGIMEN SUBCRÍTICO

El perfil del flujo representa la curva de la superficie del flujo. Representará una curva de remanso (indica la curva longitudinal de la superficie del agua represada aguas arriba) si la profundidad del flujo se incrementa en la dirección del flujo, y una curva de caída si la profundidad disminuye con la dirección del flujo.

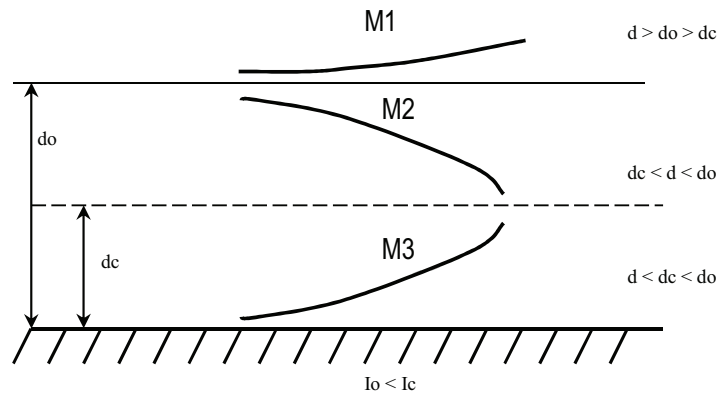
Ante la presencia de una sección de control en el canal y dependiendo tanto del tipo de régimen (subcrítico, crítico y supercrítico) como de la pendiente del fondo, se tiene:

CUADRO 1.1**TIPOS DE PERFILES DE FLUJO**

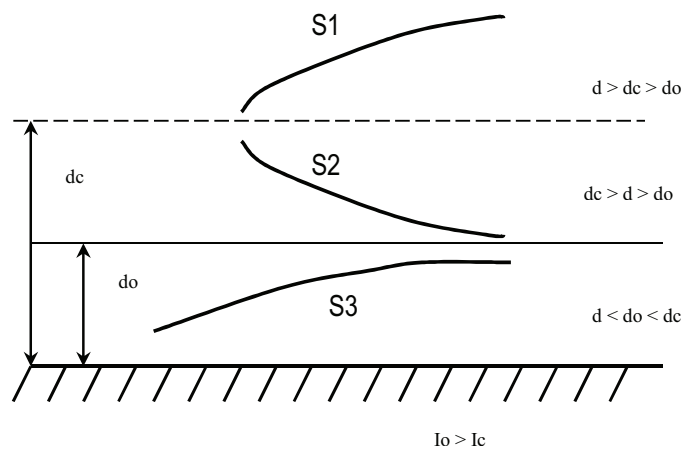
Pendiente del canal	Designación del perfil			Relación relativa de d a d_o y d_c	Tipo de curvas	Tipo de flujo
	Zona 1	Zona 2	Zona 3			
Suave $0 < S_o < S_c$	M1			$d > d_o > d_c$	Remanso	Subcrítico
		M2		$d_o > d > d_c$	Caída	Subcrítico
			M3	$d_o > d_c > d$	Remanso	Supercrítico
Crítica $S_o = S_c > 0$	C1			$d > d_c = d_o$	Remanso	Subcrítico
		C2		$d_c = d = d_o$	Paralela al fondo del canal	Uniforme – Crítico
			C3	$d_c = d_o > d$	Remanso	Supercrítico
Fuerte $S_o > S_c > 0$	S1			$d > d_c > d_o$	Remanso	Subcrítico
		S2		$d_c > d > d_o$	Caída	Supercrítico
			S3	$d_c > d_o > d$	Remanso	Supercrítico
Horizontal $S_o = 0$	-			-	-	-
		H2		$d_o > d > d_c$	Caída	Subcrítico
			H3	$d_o > d_c > d$	Remanso	Supercrítico
Adversa $S_o < 0$	-			-	-	-
		A2		$d_o > d > d_c$	Caída	Subcrítico
			A3	$d_o > d_c > d$	Remanso	Supercrítico

FUENTE: HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS, Ven Te Chow

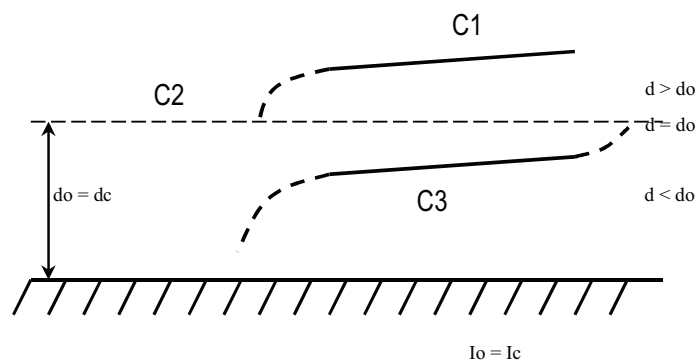
- a. Perfiles de flujo para canales de pendiente suave o moderada ($I_0 < I_c$): **Curvas tipo M.**



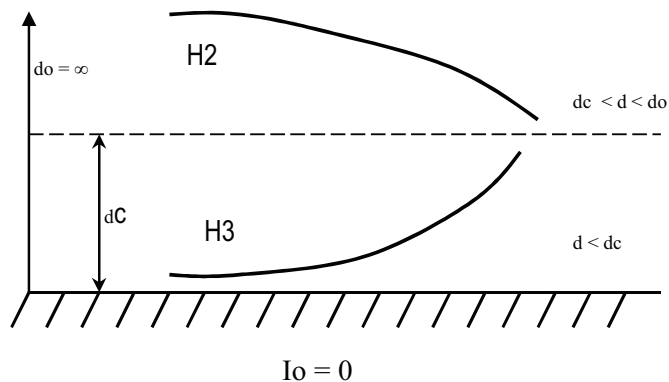
- b. Perfiles de flujo para canales de pendiente fuerte ($I_0 > I_c$): **Curvas tipo S.**



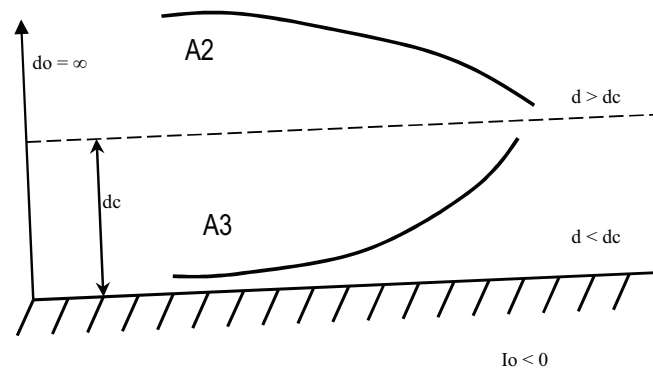
- c. Perfiles de flujo para canales de pendiente crítica ($I_0 = I_c$): **Curvas tipo C.**



d. Perfiles de flujo para canales de pendiente horizontal ($I_0 = 0$) : **Curvas tipo H.**



e. Perfiles de flujo para canales de pendiente adversa ($I_0 < 0$). **Curvas tipo A.**



Con los gráficos anteriores se puede afirmar que el flujo será subcrítico siempre que $d > d_c$ (el calado sea mayor que el calado crítico)

1.5 OBJETIVOS Y RESTRICCIONES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo del presente trabajo de titulación es el de estudiar, examinar y evaluar el comportamiento de los medidores del flujo con superficie libre al interior de las conducciones tipo de sistemas de alcantarillado circulares. Especial énfasis se hace en el uso de los medidores tipo Palmer-Bowlus y Parshall.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar y analizar las variables hidrodinámicas que definen apropiada y adecuadamente la relación funcional de medidores de flujo subcrítico por medio de contracciones.
- Estudiar experimentalmente los medidores tipo Palmer-Bowlus y Parshall en instalaciones de laboratorio previa su instalación en sistemas prototipo
- Elaborar una guía para el dimensionamiento y el chequeo de estos tipos de canales o medidores del flujo subcrítico.
- Efectuar una práctica estudiantil para las carreras de ingeniería civil, de ingeniería ambiental y de tecnólogos en agua y saneamiento

El presente estudio está dirigido a examinar, evaluar y obtener parámetros de diseño de medidores del flujo subcrítico o lento en sistemas de alcantarillado. Este Manual de dimensionamiento deberá permitir su uso en los municipios y entidades locales o regionales para el desarrollo de infraestructura.

El presente proyecto de titulación analizará experimentalmente y comparará el funcionamiento de medidores de flujo con superficie libre, principalmente la descripción física, funciones y características del aforador tipo Palmer-Bowlus, ya que en nuestro medio no se conoce o se conoce muy ligeramente sobre su aplicabilidad en sistemas de alcantarillado, irrigación, drenes de tormenta, etc.

Con este estudio se pretende la creación de un manual que facilite el estudio, construcción y evaluación de medidores tipo Parshall y Palmer – Bowlus para que sea utilizado por estudiantes y profesionales.

Esta investigación permitirá desarrollar prototipos de los aforadores para uso experimental y el desarrollo de prácticas estudiantiles.

1.5.3 RESTRICCIONES

Además de las consideraciones teóricas, el modelador debe preocuparse de las siguientes limitaciones físicas: 1) tiempo, 2) dinero, 3) espacio de laboratorio, y 4) abastecimiento de agua disponible. Estas cuatro consideraciones prácticas pueden tener un impacto crucial y significativo en cualquier esfuerzo de modelaje.

1.6 CONCLUSIONES

Para el diseño del modelo, se debe tomar en cuenta la determinación de la escala más conveniente para llevar a cabo la investigación.

Para poder investigar cualquier fenómeno natural representado en el modelo, se debe establecer en este, con la mayor exactitud posible, las leyes que gobiernan a dicho fenómeno.

En la mayor parte de los modelos es necesario confinar la similitud a una sola fuerza. Ya que en gran parte de los problemas de canales abiertos la fuerza de gravedad es la primordial.

CAPÍTULO 2.

CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DE LAS ESTRUCTURAS DE MEDICIÓN DE CAUDALES EN FLUJO SUBCRÍTICO

2.1 ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES Y DE PRESIONES EN SECCIONES TRANSVERSALES CONVERGENTES EN RÉGIMEN SUBCRÍTICO

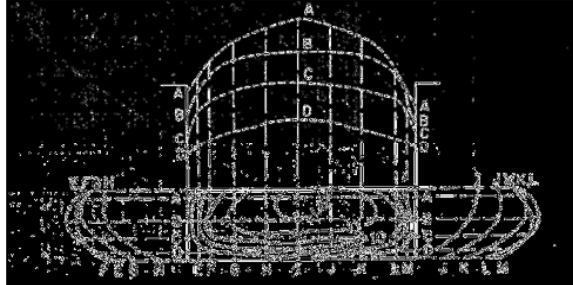
Debido a la presencia de superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad media en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad. La distribución de velocidades depende también de otros factores, como la forma inusual de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas.

En canaletas cortas de laboratorio, una pequeña perturbación a la entrada, que por lo general es inevitable, es suficiente para causar una zona con nivel más alto a un lado del canal. En consideraciones prácticas es seguro ignorar lo mencionado anteriormente (Ven Te Chow, 1994).

Para ilustrar la distribución de velocidades en la sección transversal se indica la sección de un canal en el que se ha dibujado las curvas que unen los puntos de igual velocidad (isotacas). Esta velocidad se ha relacionado con la velocidad media. Así la curva que tiene el número 2 significa que todos sus puntos tienen una velocidad que es el doble de la velocidad media.

FIGURA 2.1

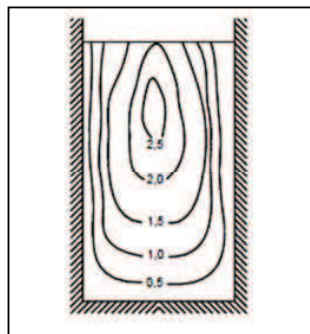
DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN UN CANAL RECTANGULAR



FUENTE: HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS, Ven Te Chow

FIGURA 2.2

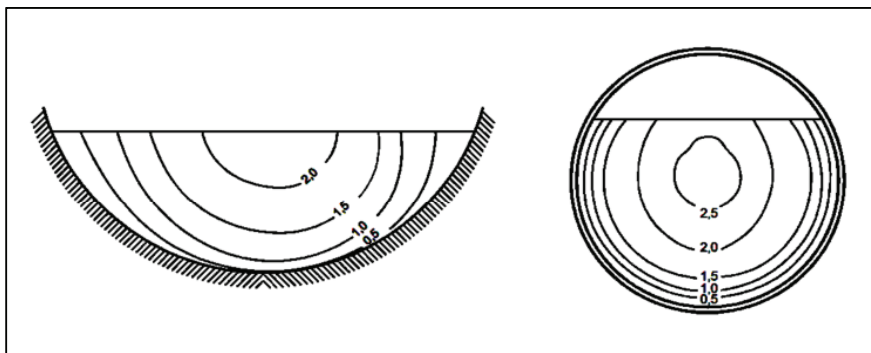
DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN UN CANAL RECTANGULAR ANGOSTO



FUENTE: HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS, Ven Te Chow

FIGURA 2.3

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN CANALES CIRCULARES



FUENTE: HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS, Ven Te Chow

En un canal rectangular angosto hay fuerte influencia de los lados y la velocidad máxima aparece debajo de la superficie. Mientras más angosto es el canal mayor es la influencia de los lados y la velocidad máxima está más profunda con respecto a la superficie. Valores usuales para ubicar la velocidad máxima son los comprendidos entre 0,95 y 0,75 de la profundidad.

En transición convergente el flujo subcrítico debe acelerarse gradualmente hacia la sección de control, lo que implica un aumento gradual de la velocidad, sin que se presenten discontinuidades o separación de flujo, obteniéndose así, líneas de flujo prácticamente paralelas.

La presión en cualquier punto de la sección transversal del flujo en un canal con pendiente baja puede medirse por medio de la altura de la columna de agua en un tubo piezométrico instalado en el punto.

Al no considerar las pequeñas perturbaciones debidas a la turbulencia, etc... Es claro que el Agua subirá desde el punto de medición hasta la línea de gradiente hidráulico o superficie del agua.

En efecto la aplicación de la ley hidrostática (la diferencia de presiones entre dos puntos de un mismo líquido es igual al producto del peso específico del líquido por la diferencia de niveles) a la distribución de presiones en la sección transversal es válida solo si los filamentos del flujo no tienen componentes de aceleración en el plano de la sección transversal.

En secciones transversales convergentes el flujo se acelera gradualmente hacia la sección de control, lo que implica un aumento gradual de la velocidad el teorema de Bernoulli explica una relación existente entre el aumento de velocidad en un flujo con una disminución de la presión y viceversa, lo cual proporciona una diferencia de presiones.

2.2 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MOVIMIENTO ACCELERADO CON SUPERFICIE LIBRE

Los cambios en la velocidad del flujo son graduales en la dirección principal del flujo como cuando existen contracciones o expansiones suaves en las conducciones. Este tipo de flujo puede ser gradualmente variado retardado o acelerado, según que la velocidad disminuya o aumente en el sentido del flujo.

2.2.1 EFECTO DE LA VISCOSIDAD

Recordando los conceptos básicos de la mecánica de fluidos, un flujo puede ser clasificado como laminar, transicional o turbulento dependiendo de la magnitud de la proporción de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas de viscosidad. La base para esta clasificación es el número de Reynolds (adimensional). En régimen de flujo laminar las fuerzas viscosas predominan en el flujo y las partículas del fluido se mueven siguiendo trayectorias suaves. En régimen de flujo turbulento, las fuerzas inerciales predominan y las partículas del fluido se mueven siguiendo trayectorias aleatorias.

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.1)$$

Re: Número de Reynolds,

V: Velocidad del flujo,

L: Longitud característica, y

ν : Viscosidad cinemática [$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para agua a 20 °C].

Si se usa como longitud característica el radio hidráulico, el número de Reynolds es:

$$\text{Re} = \frac{VR}{\nu} \quad (2.2)$$

Con los siguientes valores límites:

Flujo laminar	$Re < 500$
Flujo turbulento	$Re > 1000$
Flujo transicional	$500 < Re < 1000$

Debe aclararse que en experimentos se ha demostrado que el régimen de flujo puede cambiar de laminar a turbulento con valores entre 500 y 12500 cuando se ha trabajado con el radio hidráulico como longitud característica, por lo que algunos aceptan los siguientes límites:

Flujo laminar	$Re < 500$
Flujo turbulento	$Re > 12500^*$
Flujo transicional	$500 < Re < 12500$

*El límite superior no está definido.

Si se usa como longitud característica un valor de cuatro veces el radio hidráulico, ($L = 4R$)

$$Re = \frac{4VR}{\nu} \quad (2.3)$$

Siendo aceptados los siguientes límites:

Flujo laminar	$Re < 2000$
Flujo turbulento	$Re > 4000$
Flujo transicional	$2000 < Re < 4000$

2.2.2 EFECTO DE LA DENSIDAD DEL FLUJO

La variación de la densidad del fluido hace que los flujos se clasifiquen como homogéneos o estratificados.

La ausencia de un gradiente de densidad en la mayor parte de los flujos de los canales abiertos naturales demuestra que la velocidad del flujo es suficiente para mezclar completamente el fluido con respecto a la densidad o que los fenómenos que tienden a introducir el gradiente de densidad no son importantes, por lo que los flujos libres se consideran homogéneos en la mayoría de los casos.

2.2.3 EFECTO DE LA GRAVEDAD

Dependiendo de la magnitud de la proporción de las fuerzas de gravedad e inercia, un flujo es clasificado como subcrítico, crítico y supercrítico y el parámetro adimensional sobre el cual se basa esta clasificación es el número de Froude Fr.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D_H}} \quad (2.4)$$

Dónde:

V: Velocidad

g: gravedad

D_H: Profundidad hidráulica

- Flujo lento o subcrítico $Fr < 1$

La velocidad del flujo es menor que la velocidad de la onda de gravedad

- Flujo crítico $Fr = 1$

La velocidad del flujo es igual a la velocidad de la onda de gravedad

- Flujo rápido o supercrítico $Fr > 1$

La velocidad del flujo es mayor que la velocidad de la onda de gravedad

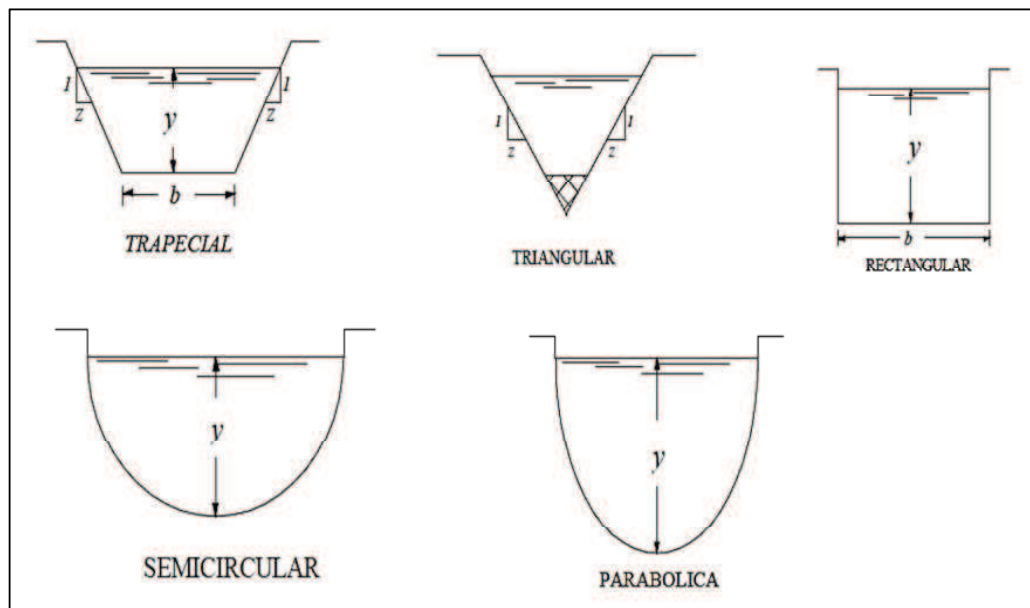
2.2.4 SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN CANAL

La forma de los canales puede ser irregular, prismática simétrica o prismática asimétrica. Los canales artificiales pueden ser no revestidos o revestidos con diversos materiales (Guevara M. E. y Lemos R, 1986.)

Las secciones transversales más comunes de canales suelen ser rectangulares, triangulares, trapezoidales, circulares y parabólicas.

FIGURA 2.4

SECCIONES TRANSVERSALES COMUNES EN CANALES



FUENTE: Guevara M. E. y Lemos R, 1986

Los siguientes son los elementos geométricos de interés desde el punto de vista hidráulico:

y = tirante del flujo = profundidad del agua

Es la distancia vertical desde el punto más bajo de la sección de un canal a la superficie del agua.

∇ = Nivel del agua

Es la elevación de la superficie libre del agua relativa a un plano de referencia. Si el plano de referencia se toma en el punto más bajo del canal, coinciden el nivel del agua y el tirante del flujo.

A = Área hidráulica

Es el área de la sección transversal del flujo, tomada normalmente a la dirección del flujo.

P = Perímetro mojado

Es la longitud de la línea que es interface entre el fluido y el contorno del canal.

R = Radio hidráulico

Es la relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado.

B = ancho superficial

Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre del agua.

 D_H = profundidad hidráulica

Es la relación entre el área hidráulica y el ancho superficial.

z = talud de la pared lateral del canal

En canales rectangulares $z = 0$.

En canales trapezoidales o triangulares simétricos, $z_1 = z_2 = z$

b = ancho de la solera del canal

$b = 0$ en canales triangulares

2.3 SÍNTESIS DE LA RELACIÓN FUNCIONAL CAUDAL VS. PROFUNDIDAD DE AGUA EN RÉGIMEN SUBCRÍTICO

Fundamentalmente, las estructuras de medición de caudales tales como el canal Parshall y el canal Palmer-Bowlus, crean una reducción en la sección del canal y esto obliga al agua a elevarse o a remansarse, y volver a caer hasta la elevación que se tenía sin presencia del aforador. En este proceso se presenta una aceleración del flujo que permite establecer una relación matemática entre la elevación del agua y el gasto.

Experimentalmente utilizando diferentes tamaños de aforadores en los que se midió el caudal y la profundidad, se observó que todos los aforadores tienen un comportamiento similar en la relación Caudal vs. Profundidad, para condiciones de descarga libre; es decir, todos se pueden representar matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$Q = C(H_a)^n \quad (2.5)$$

Donde Q es el gasto, para condiciones de descarga libre; H_a es la profundidad del agua en una ubicación determinada del aforador; C y n son valores que difieren según el tamaño del aforador.

En función del tamaño del aforador las unidades de la ecuación pueden ser l/s o m^3/s , para el gasto o caudal; y milímetros o metros para H_a .

Los medidores de caudal tipo Parshall y Palmer-Bowlus tienen medidas establecidas y cualquier medidor de caudal que se construya de este tipo debe apegarse a dichas medidas, ya que los errores de construcción generarán mediciones erróneas.

2.4 CONCLUSIONES

En el caso particular de los aforadores Parshall y Palmer-Bowlus, se tiene cambios de sección, ya sean convergentes, divergentes o contracciones, estas causan que la velocidad del flujo varíe gradualmente, hasta llegar a tener una sección de control donde ocurre un flujo crítico que permite el cálculo del caudal que atraviesa el aforador.

Para modelos de laboratorio en los que se utilizará agua como fluido, se considera que el flujo es homogéneo debido a que la densidad es constante; además se considera que no se presenta fricción interna en el fluido y se desprecia la viscosidad.

Para cada tamaño de aforador sea este Parshall o Palmer-Bowlus se tendrá una relación funcional entre caudal y calado, que permitirá determinar el caudal que atraviesa el aforador.

CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FLUJO EN LOS CANALES TIPO PALMER & BOWLUS Y TIPO PARSHALL. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS PARA LABORATORIO.

3.1 INTRODUCCIÓN: BASES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL PROBLEMA

El **análisis dimensional** es una potente herramienta que permite simplificar el estudio de cualquier fenómeno en el que estén involucradas muchas magnitudes físicas en forma de variables independientes. Su resultado fundamental, el teorema de Vaschy-Buckingham (más conocido por teorema π) permite cambiar el conjunto original de parámetros de entrada dimensionales de un problema físico por otro conjunto de parámetros de entrada adimensionales más reducido. Estos parámetros adimensionales se obtienen mediante combinaciones adecuadas de los parámetros dimensionales. De este modo, al obtener uno de estos conjuntos de tamaño mínimo se consigue:

- Analizar con mayor facilidad el sistema objeto de estudio
- Reducir drásticamente el número de ensayos que debe realizarse para averiguar el comportamiento o respuesta del sistema.

El análisis dimensional es la base de los ensayos con modelos a escala reducida utilizados en muchas ramas de la ingeniería, tales como la aeronáutica, la automoción o la ingeniería civil. A partir de dichos ensayos se obtiene información sobre lo que ocurre en el fenómeno a escala real cuando existe semejanza física entre el fenómeno real y el ensayo, gracias a que los resultados obtenidos en una maqueta a escala son válidos para el modelo a tamaño real si los números adimensionales que se toman como variables independientes para la experimentación tienen el mismo valor en el modelo a escala y en el modelo real.

Finalmente, el análisis dimensional también es una herramienta útil para detectar errores en los cálculos científicos e ingenieriles. Con este fin se comprueba la congruencia de las unidades empleadas en los cálculos, prestando especial atención a las unidades de los resultados.

Un análisis dimensional es útil para:

- Comprobar cualitativamente las ecuaciones
- Determinar las dimensiones de los coeficientes empíricos
- Establecer y realizar experimentos generalizando los resultados
- Formular leyes de similitud de considerable importancia en la investigación experimental

3.1.1 GRUPOS ADIMENSIONALES IMPORTANTES EN LA MECÁNICA DE FLUIDOS

En la mecánica de fluidos, aparece un número determinado de grupos adimensionales que son formados por las siguientes variables:

CUADRO 3.1

VARIABLES RELEVANTES EN LOS PROCESOS DE FLUJO FLUIDO

No.	Variable	Símbolo	Dimensión
1	Viscosidad	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
2	Densidad	ρ	ML^{-3}
3	Tensión superficial	σ	MT^{-2}
4	Variación de la presión	Δp	$ML^{-1}T^{-2}$
5	Velocidad	V	LT^{-1}
6	Velocidad del sonido	c	LT^{-1}
7	Longitud	L	L
8	Aceleración de la gravedad	g	LT^{-2}

FUENTE: MECÁNICA DE FLUIDOS, Irving H. Shames

Tomando como base estas variables se forman los siguientes parámetros adimensionales:

CUADRO 3.2

PARÁMETROS ADIMENSIONALES IMPORTANTES EN LA MECÁNICA DE FLUIDOS

Grupo adimensional	Designación	Expresión
Número de Reynolds	Re	$\frac{\rho VL}{\mu}$
Número de Froude	Fr	$\frac{V^2}{Lg}$
Número de Euler	Eu	$\frac{\Delta p}{\rho V^2}$
Número de Mach	M	$\frac{V}{c}$
Número de Weber	We	$\frac{\rho V^2 L}{\sigma}$

FUENTE: MECÁNICA DE FLUIDOS, Irving H. Shames

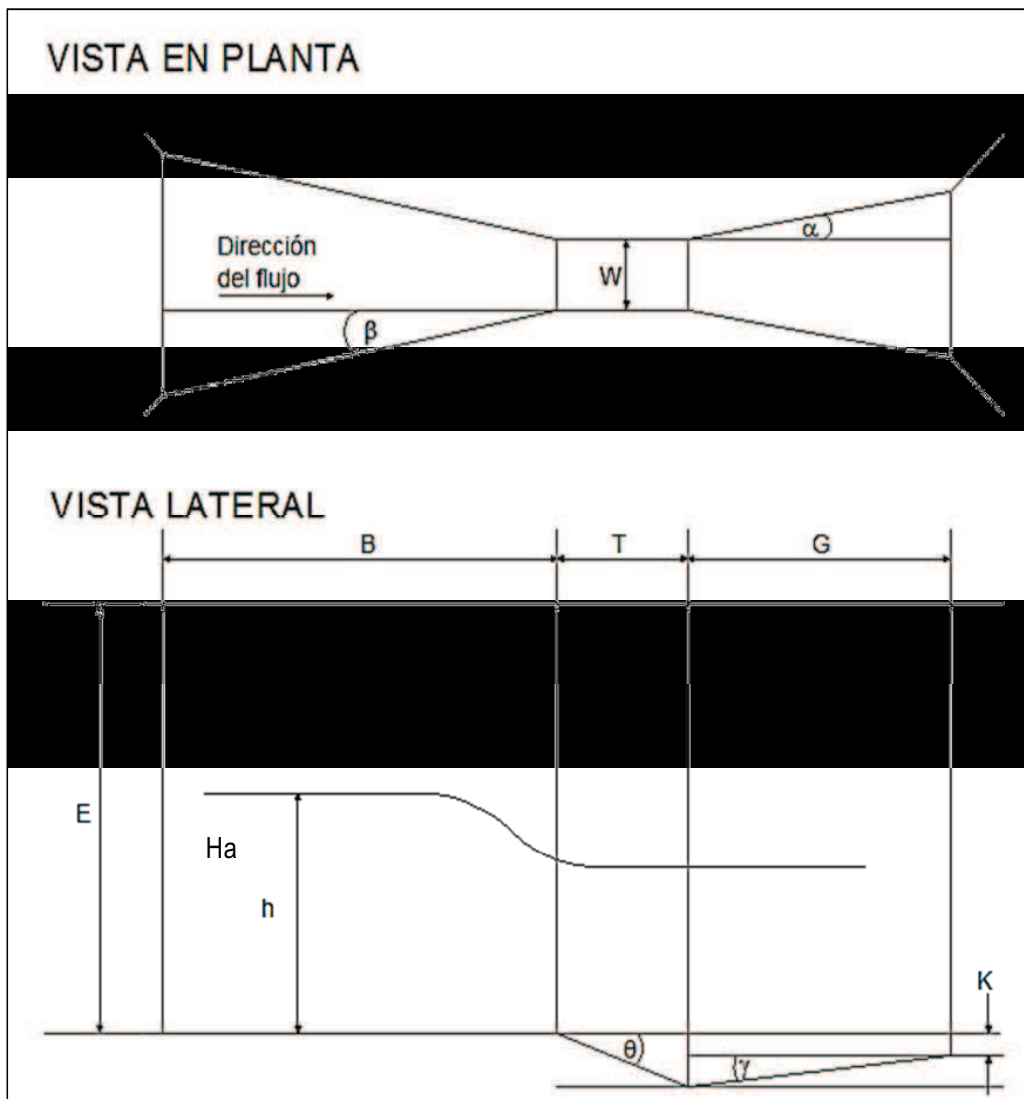
En el caso particular de los aforadores tipo Parshall y Palmer-Bowlus, predominan las fuerzas gravitacionales por lo tanto en la relación funcional restringida se omiten los números de Reynolds, Euler, Mach y Weber.

3.2 RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA

3.2.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL CANAL DE AFORO PARSHALL

FIGURA 3.1

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PRINCIPALES DEL AFORADOR PARSHALL



CUADRO 3.3

VARIABLES FÍSICAS Y MAGNITUDES FUNDAMENTALES DEL CANAL DE AFORO PARSHALL

Variables Físicas		
Q	m ³ /s	L ³ T ⁻¹
Ha	m	L T ⁰
g	m ² /s	L ² T ⁻¹
W	m	L T ⁰
B	m	L T ⁰
G	m	L T ⁰
T	m	L T ⁰
K	m	L T ⁰
E	m	L T ⁰
α	Adimensional	
β	Adimensional	
θ	Adimensional	
γ	Adimensional	
Magnitudes Fundamentales		
Longitud	m	L
Tiempo	s	T

Las $m = 13$ Variables Físicas se expresan en términos de $n = 2$ Magnitudes Fundamentales, por lo que hay 11 Parámetros adimensionales ($m-n = 11$) siendo:

$$\pi_8 = \alpha$$

$$\pi_9 = \beta$$

$$\pi_{10} = \theta$$

$$\pi_{11} = \gamma$$

Por ser adimensionales.

CUADRO 3.4

MATRIZ QUE EXPRESA LAS VARIABLES FÍSICAS EN TÉRMINOS DE LAS MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Dimensiones Fundamentales	Magnitudes Variables								
	Q	Ha	g	W	B	G	T	K	E
L	3	1	1	1	1	1	1	1	1
T	-1	0	-2	0	0	0	0	0	0
	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9

El sistema de ecuaciones es:

$$3k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9 = 0 \quad (3.1)$$

$$k_1 + 2k_3 = 0 \quad (3.2)$$

$$k_3 = -\frac{1}{2}k_1 \quad (3.3)$$

Se eligen como variables repetitivas Ha y g, y se reemplaza la Ec. 3.3 en la Ec. 3.1 y tenemos:

$$k_2 = -\frac{5}{2}k_1 - k_4 - k_5 - k_6 - k_7 - k_8 - k_9 = 0 \quad (3.4)$$

Por lo tanto:

$$\pi = Q^{k_1} Ha^{\frac{5}{2}k_1 - k_4 - k_5 - k_6 - k_7 - k_8 - k_9} g^{-\frac{1}{2}k_1} W^{k_4} B^{k_5} G^{k_6} T^{k_7} K^{k_8} E^{k_9} \quad (3.5)$$

Cada parámetro adimensional se obtiene eligiendo arbitrariamente las ternas de valores de k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , k_6 , k_7 , k_8 y k_9

Si: $k_1 = 1$ y $k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9 = 0$ se obtiene:

$$\pi_1 = \frac{Q}{Ha^{5/2}g^{1/2}} \quad (3.6)$$

Si: $k_4 = 1$ y $k_1, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9 = 0$ se obtiene:

$$\pi_2 = \frac{W}{Ha} \quad (3.7)$$

Si: $k_5 = 1$ y $k_1, k_4, k_6, k_7, k_8, k_9 = 0$ se obtiene:

$$\pi_3 = \frac{W}{Ha} \quad (3.8)$$

Si: $k_6 = 1$ y $k_1, k_4, k_5, k_7, k_8, k_9 = 0$ se obtiene:

$$\pi_4 = \frac{G}{Ha} \quad (3.9)$$

Si: $k_7 = 1$ y $k_1, k_4, k_5, k_6, k_8, k_9 = 0$ se obtiene:

$$\pi_5 = \frac{T}{Ha} \quad (3.10)$$

Si: $k_8 = 1$ y $k_1, k_4, k_5, k_6, k_7, k_9 = 0$ se obtiene:

$$\pi_6 = \frac{K}{Ha} \quad (3.11)$$

Si: $k_9 = 1$ y $k_1, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8 = 0$ se obtiene:

$$\pi_7 = \frac{E}{Ha} \quad (3.12)$$

Entonces podemos escribir:

$$f\left(\frac{Q}{Ha^{5/2}g^{1/2}}, \frac{W}{Ha}, \frac{B}{Ha}, \frac{G}{Ha}, \frac{T}{Ha}, \frac{K}{Ha}, \frac{E}{Ha}, \alpha, \beta, \theta, \gamma\right) = 0 \quad (3.13)$$

Todas las dimensiones principales del aforador Parshall se derivan del ancho W de la garganta, entonces se puede simplificar la ecuación de la siguiente manera:

$$f\left(\frac{Q}{Ha^{5/2}g^{1/2}}, \frac{W}{Ha}\right) = 0 \quad (3.14)$$

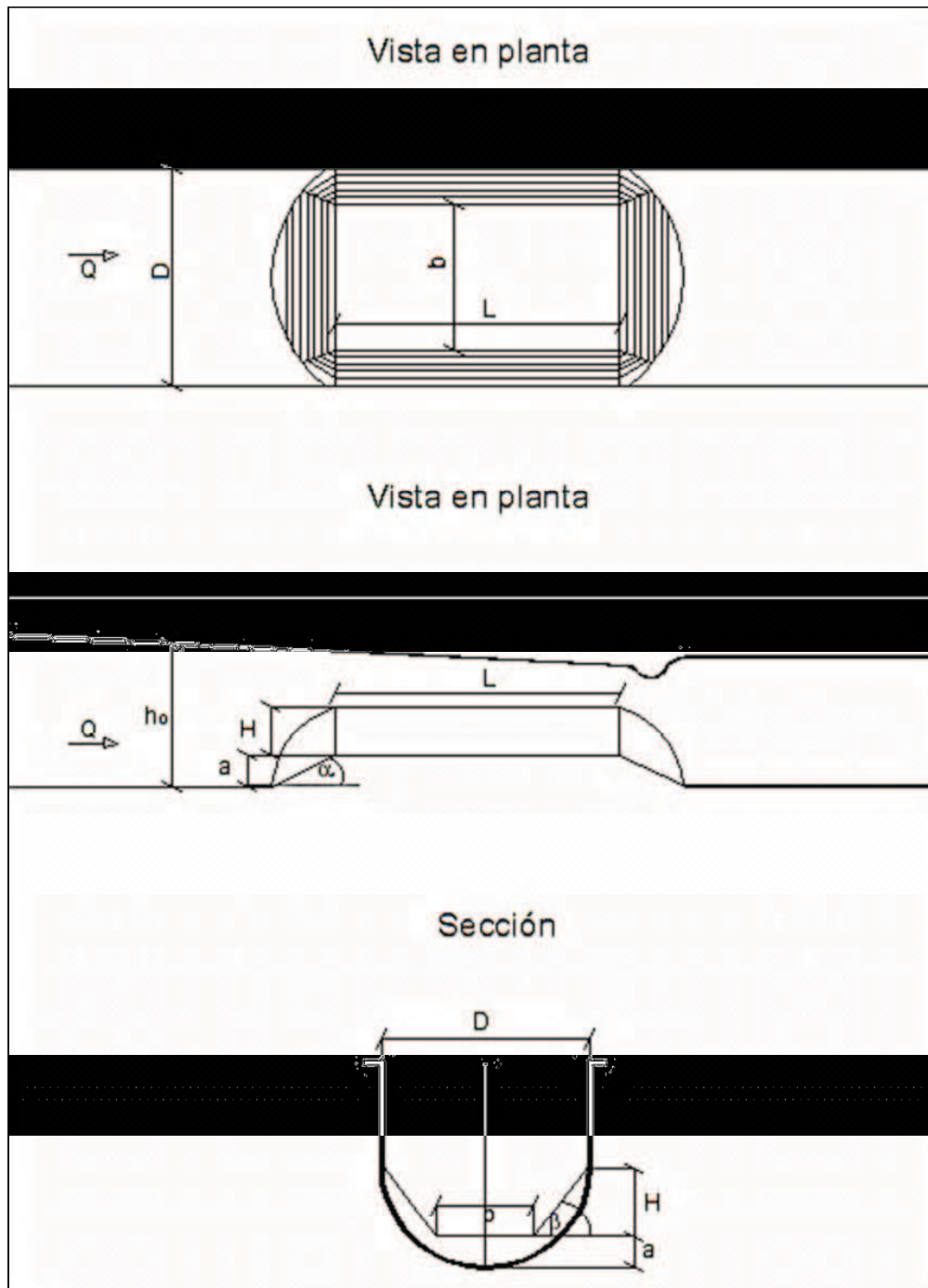
O bien:

$$Q = Ha^{5/2}g^{1/2}f_1\left(\frac{W}{Ha}\right) \quad (3.15)$$

3.2.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS

FIGURA 3.2

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PRINCIPALES DEL AFORADOR PALMER-BOWLUS



CUADRO 3.5

VARIABLES FÍSICAS Y MAGNITUDES FUNDAMENTALES DEL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS

Variables Físicas		
Q	m ³ /s	L ³ T ⁻¹
ho	m	L T ⁰
g	m ² /s	L ² T ⁻¹
D	m	L T ⁰
L	m	L T ⁰
b	m	L T ⁰
H	m	L T ⁰
a	m	L T ⁰
α	Adimensional	
β	Adimensional	
Magnitudes Fundamentales		
Longitud	m	L
Tiempo	s	T

Las m = 10 Variables Físicas se expresan en términos de n = 2 Magnitudes Fundamentales, por lo que hay 8 Parámetros adimensionales (m-n = 8) siendo:

$$\pi_7 = \alpha$$

$$\pi_8 = \beta$$

por ser adimensionales.

CUADRO 3.6

MATRIZ QUE EXPRESA LAS VARIABLES FÍSICAS EN TÉRMINOS DE LAS MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Dimensiones Fundamentales	Magnitudes Variables							
	Q	ho	g	D	L	b	H	a
L	3	1	1	1	1	1	1	1
T	-1	0	-2	0	0	0	0	0
	k1	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8

El sistema de ecuaciones es:

$$3k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 = 0 \quad (3.16)$$

$$k_1 + 2k_3 = 0 \quad (3.17)$$

$$k_3 = -\frac{1}{2}k_1 \quad (3.18)$$

Se eligen como variables repetitivas h_0 y g , y se reemplaza la Ec. 3.18 en la Ec. 3.16 y tenemos:

$$k_2 = -\frac{5}{2}k_1 - k_4 - k_5 - k_6 - k_7 - k_8 = 0 \quad (3.19)$$

Por lo tanto:

$$\pi = Q^{k_1} h_0^{-\frac{5}{2}k_1 - k_4 - k_5 - k_6 - k_7 - k_8} g^{-\frac{1}{2}k_1} D^{k_4} L^{k_5} b^{k_6} H^{k_7} a^{k_8} \quad (3.20)$$

Cada parámetro adimensional se obtiene eligiendo arbitrariamente las ternas de valores de k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , k_6 , k_7 y k_8

Si: $k_1 = 1$ y $k_4, k_5, k_6, k_7, k_8 = 0$ se obtiene:

$$\pi_1 = \frac{Q}{h_0^{5/2} g^{1/2}} \quad (3.21)$$

Si: $k_4 = 1$ y $k_1, k_5, k_6, k_7, k_8 = 0$ se obtiene:

$$\pi_2 = \frac{D}{h_0} \quad (3.22)$$

Si: $k_5 = 1$ y $k_1, k_4, k_6, k_7, k_8 = 0$ se obtiene:

$$\pi_3 = \frac{L}{h_0} \quad (3.23)$$

Si: $k_6 = 1$ y $k_1, k_4, k_5, k_7, k_8 = 0$ se obtiene:

$$\pi_4 = \frac{b}{h_0} \quad (3.24)$$

Si: $k_7 = 1$ y $k_1, k_4, k_5, k_6, k_8 = 0$ se obtiene:

$$\pi_5 = \frac{H}{ho} \quad (3.25)$$

Si: $k_8 = 1$ y $k_1, k_4, k_5, k_6, k_7 = 0$ se obtiene:

$$\pi_6 = \frac{a}{ho} \quad (3.26)$$

Entonces podemos escribir:

$$f\left(\frac{Q}{ho^{3/2}g^{1/2}}, \frac{D}{ho}, \frac{L}{ho}, \frac{b}{ho}, \frac{H}{ho}, \frac{a}{ho}, \alpha, \beta\right) = 0 \quad (3.27)$$

Todas las dimensiones principales del aforador palmer-Bowlus se derivan del diámetro D, entonces se puede simplificar la ecuación de la siguiente manera:

$$f\left(\frac{Q}{ho^{3/2}g^{1/2}}, \frac{D}{ho}\right) = 0 \quad (3.28)$$

O bien:

$$Q = ho^{3/2}g^{1/2}f_1\left(\frac{D}{ho}\right) \quad (3.29)$$

3.3 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES

Los parámetros adimensionales en este caso nos ayudan a profundizar nuestro entendimiento sobre las características del flujo y la relación de las dimensiones principales de los aforadores, con lo que se logrará una experimentación más razonable y ordenada.

Una ventaja de los parámetros adimensionales es la independencia del tamaño real, lo que permite que resultados experimentales limitados sean aplicados a situaciones que involucran dimensiones físicas diferentes

En nuestro caso muchos de los parámetros adimensionales pueden ser vistos como la relación de las dimensiones principales del aforador, al agrupar las cantidades importantes en parámetros adimensionales, es posible reducir el

número de variables y hacer que este resultado compacto sea aplicable a otras situaciones similares.

En el caso del aforador Parshall todas las dimensiones principales se redujeron a utilizar el ancho de la garganta W , porque de este se pueden derivar las demás

$$f\left(\frac{Q}{Ha^{5/2}g^{1/2}}, \frac{W}{Ha}, \frac{B}{Ha}, \frac{G}{Ha}, \frac{T}{Ha}, \frac{K}{Ha}, \frac{E}{Ha}, \alpha, \beta, \theta, \gamma\right) = 0$$

Se simplifico a:

$$f\left(\frac{Q}{Ha^{5/2}g^{1/2}}, \frac{W}{Ha}\right) = 0$$

$\frac{Q}{Ha^{5/2}g^{1/2}}$ Representa un coeficiente de descarga.

$\frac{W}{Ha}$ Representa la relación entre las dimensiones principales y el calado en la ubicación determinada del aforador.

Esta relación es inversamente proporcional, porque con el mismo caudal si aumenta el ancho de la garganta W disminuirá el calado Ha y viceversa.

Para el aforador Palmer-Bowlus todas las dimensiones principales están representadas por el diámetro ya que de este se derivan las demás

$$f\left(\frac{Q}{ho^{5/2}g^{1/2}}, \frac{D}{ho}, \frac{L}{ho}, \frac{b}{ho}, \frac{H}{ho}, \frac{a}{ho}, \alpha, \beta\right) = 0$$

Se simplifico a:

$$f\left(\frac{Q}{ho^{5/2}g^{1/2}}, \frac{D}{ho}\right) = 0$$

$\frac{Q}{h_o^{5/2}g^{1/2}}$ Representa un coeficiente de descarga.

$\frac{D}{h_o}$ Representa la relación entre las dimensiones principales y el calado en la ubicación determinada del aforador de igual modo que en el aforador Parshall, esta relación es inversamente proporcional.

3.4 RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA Y BASES PARA LA FORMULACIÓN EXPERIMENTAL

El Análisis Dimensional de un modelo sirve para reducir el número de ensayos que debe realizarse para averiguar el comportamiento o respuesta del sistema y para que al realizar experimentos logremos una generalización de resultados para este fin se utilizan las dimensiones adimensionales, para obtener posibles resultados en modelos de diferentes tamaños sin la necesidad de la construcción de los mismos, sino en base a los resultados del modelo que ya está construido.

- **Parshall**

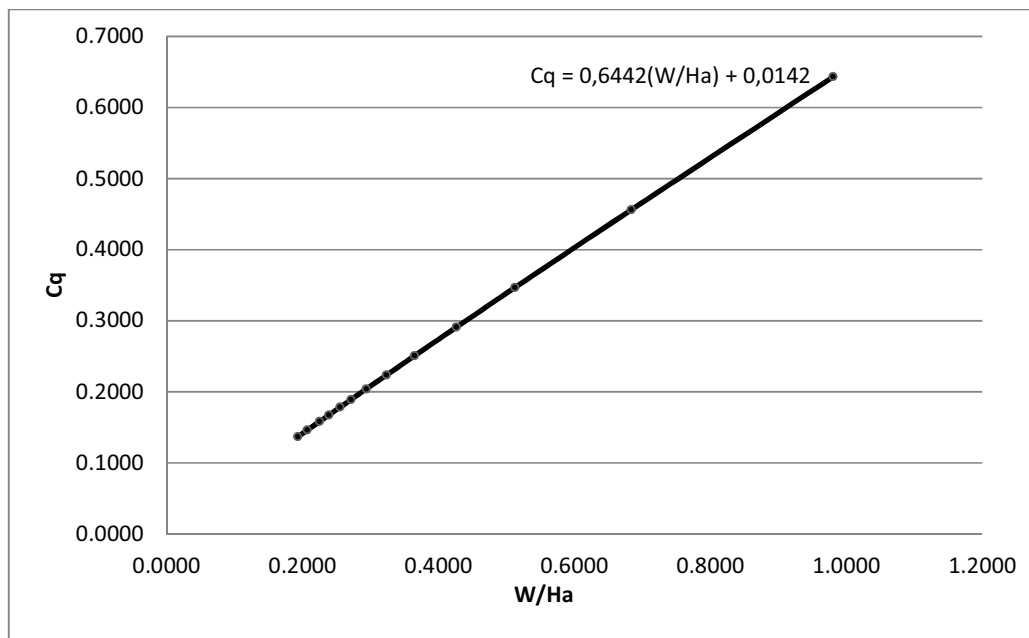
$$f\left(\frac{Q}{Ha^{5/2}g^{1/2}}, \frac{W}{Ha}\right) = 0$$

$$Cq = \left(\frac{Q}{Ha^{5/2}g^{1/2}}\right) \tag{3.30}$$

CUADRO 3.7

CALCULO DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES EN FUNCIÓN DE LOS DATOS TOMADOS EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PARSHALL 7,62 cm

Datos Experimentales Canal Parshall		Parámetros Adimensionales	
Ha(m)	Q(m³/s)	Cq	W/Ha
0,0777	0,0034	0,6431	0,9803
0,1115	0,0059	0,4561	0,6837
0,1487	0,0093	0,3466	0,5124
0,1787	0,0123	0,2908	0,4263
0,2088	0,0156	0,2507	0,3649
0,2357	0,0189	0,2234	0,3233
0,2594	0,0219	0,2039	0,2938
0,2807	0,0247	0,1891	0,2714
0,2989	0,0272	0,1782	0,2550
0,3192	0,0302	0,1673	0,2387
0,3385	0,0330	0,1582	0,2251
0,3679	0,0376	0,1462	0,2071
0,3946	0,0419	0,1367	0,1931

FIGURA 3.3GRAFICA DE LA RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA C_q vs. W/H_a 

Esta curva sirve para cualquier aforador Parshall, nos ayudará a encontrar el caudal Q con un calado H_a dado o viceversa utilizando la Ec. 3.31

$$\frac{Q}{Ha^{5/2} g^{1/2}} = 0,6442 \left(\frac{W}{Ha} \right) + 0,0142 \quad (3.31)$$

Dónde:

Q : Caudal (para condiciones de descarga libre),

H_a : Es la profundidad del agua en la ubicación determinada del aforador,

g : Aceleración de la Gravedad ($9,81\text{m/s}^2$), y

W : Ancho de la garganta para un tamaño de aforador Parshall conocido.

- **Palmer-Bowlus**

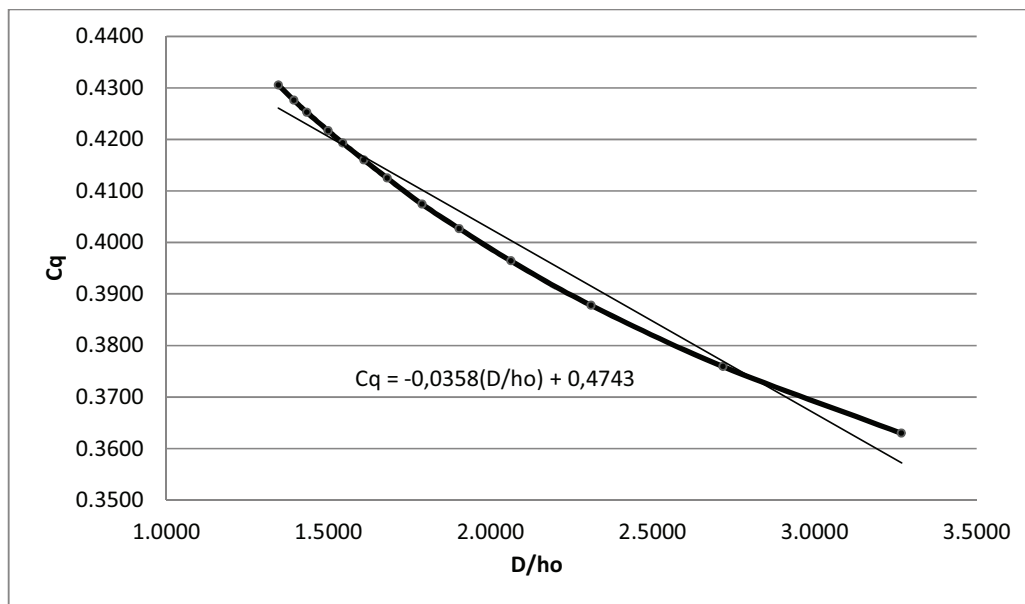
$$f \left(\frac{Q}{ho^{5/2} g^{1/2}}, \frac{D}{ho} \right) = 0$$

$$Cq = \left(\frac{Q}{ho^{5/2} g^{1/2}} \right) \quad (3.32)$$

CUADRO 3.8

CALCULO DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES EN FUNCIÓN DE LOS DATOS TOMADOS EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm

Datos experimentales Canal Palmer-Bowlus		Parámetros Adimensionales	
ho(m)	Q(m ³ /s)	Cq	D/ho
0,1010	0,0037	0,3630	3,2682
0,1214	0,0061	0,3759	2,7173
0,1428	0,0094	0,3878	2,3109
0,1600	0,0127	0,3964	2,0631
0,1734	0,0158	0,4027	1,9037
0,1845	0,0187	0,4074	1,7885
0,1963	0,0220	0,4125	1,6814
0,2051	0,0248	0,4160	1,6091
0,2138	0,0277	0,4193	1,5439
0,2201	0,0300	0,4216	1,4995
0,2303	0,0339	0,4252	1,4331
0,2369	0,0366	0,4276	1,3931
0,2453	0,0402	0,4305	1,3454

FIGURA 3.4GRAFICA DE LA RELACIÓN FUNCIONAL RESTRINGIDA C_q vs. D/h_o 

Esta curva sirve para cualquier aforador Palmer-Bowlus, nos ayudará a encontrar el caudal Q con un calado h_o dado o viceversa utilizando la ecuación Ec. 3.33

$$\frac{Q}{h_o^{5/2} g^{1/2}} = -0,0358 \left(\frac{D}{h_o} \right) + 0,4743 \quad (3.33)$$

Dónde:

- Q: Caudal (para condiciones de descarga libre),
- h_o : Es la profundidad del agua en la ubicación determinada del aforador,
- g : Aceleración de la Gravedad ($9,81\text{m/s}^2$), y
- D: Diámetro para un tamaño de aforador Palmer-Bowlus conocido.

3.5 DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES Y DE LOS MODELOS.

3.5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES

Los modelos se encuentran ubicados en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Este laboratorio cuenta con un sistema de bombeo que recibe el agua almacenada en tanques que bordean el mismo.

El sistema de bombeo cuenta con tres bombas centrífugas de eje horizontal que se encuentran ubicadas en el cuarto de máquinas en el subsuelo del laboratorio. Para este proyecto se utilizó la bomba que trabaja con un caudal máximo de 300 l/s, tiene un arranque del motor tipo estrella triángulo y opera con un voltaje de 220 V.

FOTOGRAFÍA 3.1

CUARTO DE MÁQUINAS Y SISTEMA DE BOMBEO



El agua es bombeada a través de este sistema hacia un tanque elevado, el mismo que se encuentra a una altura de 3.50 m, desde el piso del laboratorio; y tiene las siguientes dimensiones: 1.55 m X 4.55 m X 8.60 m y las paredes tienen un espesor de 0.16 m

FOTOGRAFÍA 3.2
TANQUE ELEVADO



En la base del tanque elevado, está conectada una tubería de acero galvanizado con un diámetro de 17.5 cm y una longitud total de 6 m. Esta tubería cuenta con dos codos y una válvula de cierre, la cual fue utilizada para regular el caudal que pasa hacia los aforadores.

Esta tubería descarga un caudal de hasta 98 l/s.

FOTOGRAFÍA 3.3
TUBERÍA DE ADMISIÓN



La tubería alimenta un tanque de carga, que está conectado a un segundo tanque de carga por medio de un orificio de fondo. Los tanques tienen las siguientes dimensiones: el primer tanque es de 1.95 m X 0.82 m X 0.86 m y el segundo tanque es de 1.95 m X 1.16 m X 0.86 m; las paredes tienen un espesor de 0.20 m

FOTOGRAFÍA 3.4

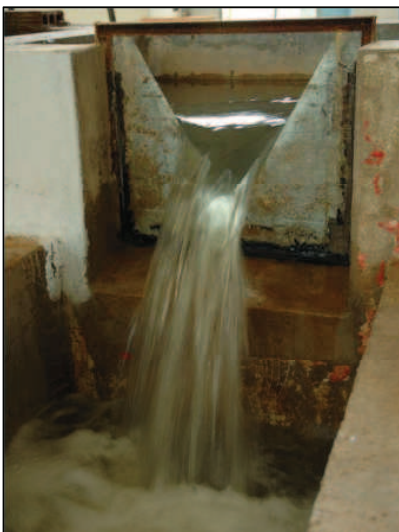
TANQUES DE CARGA



En la parte superior del segundo tanque, se encuentra un vertedero triangular con una abertura de 60° , en donde se realiza la primera medición de caudal, por medio de un piezómetro colocado a un costado del tanque, que sirve para medir la carga sobre el vertedero. Esta medición se realiza con un limnómetro.

FOTOGRAFÍA 3.5

VERTEDERO TRIANGULAR 60°



FOTOGRAFÍA 3.6
PIEZOMETRO CON LIMNIMETRO



El agua vierte hacia un canal de entrada donde se ubica una pantalla que sirve para estabilizar el flujo.

FOTOGRAFÍA 3.7
CANAL DE ENTRADA



Luego del canal de entrada está colocado el modelo del canal de aforo Parshall construido en acrílico, con un ancho de garganta de 7.62 cm (3"), cuyas dimensiones se muestran en el literal 3.5.2.1.5.

FOTOGRAFÍA 3.8

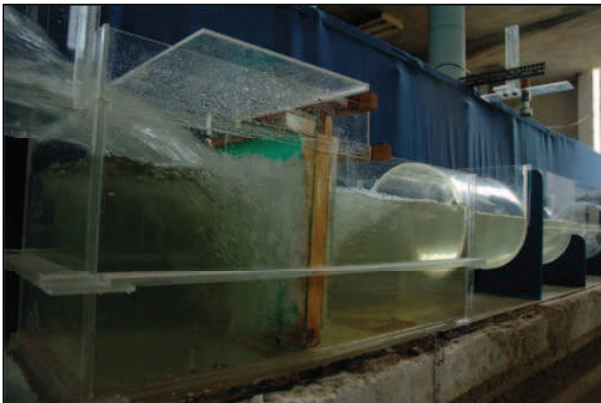
MODELO CANAL DE AFORO PARSHALL 7.62 cm (3")



El aforador Parshall descarga en un tanque construido en acrílico, que disipa la energía en un colchón de agua, y estabiliza el flujo a través de una pantalla. El tanque es de 1 m de largo, 0.4 m de ancho y 0.4 m de alto.

FOTOGRAFÍA 3.9

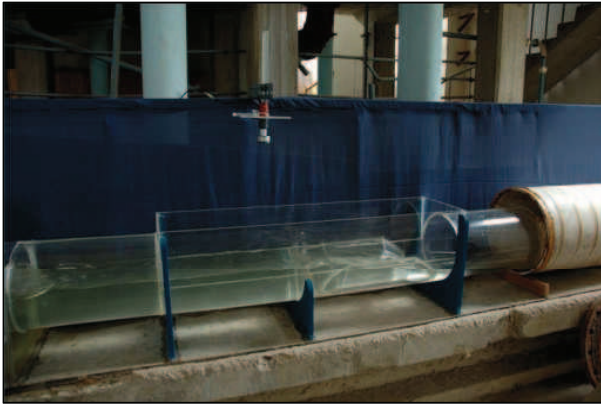
TANQUE DISIPADOR DE ENERGÍA



Al tanque disipador de energía está conectado a un tramo de tubería de 0.33 m de diámetro y 0.50 m de largo. Esta tubería se conecta al modelo canal de aforo Palmer-Bowlus de 33 cm de diámetro, construido en acrílico, cuyas dimensiones están especificadas en el literal 3.5.2.2.11.

FOTOGRAFÍA 3.10

MODELO CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm



El aforador Palmer-Bowlus descarga en una tubería 3.5 m de largo; que conduce el agua hasta los tanques de reserva.

En cada uno de los aforadores se encuentra instalada una estructura que sirve para sujetar el sensor de ultrasonido en la sección de medición correspondiente a cada modelo.

FOTOGRAFÍA 3.11

SENSOR DE ULTRASONIDO



El sensor de ultrasonido está conectado al monitor de flujo GREYLINE OCF 4.0, el mismo que está ubicado en el costado del canal de entrada y sirve para tomar las lecturas de calado y caudal en cada uno de los aforadores.

FOTOGRAFÍA 3.12

MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0



3.5.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS

Es posible medir el caudal al interior de un conducto con flujo a superficie libre por medio de canaletas o aforadores, que poseen medidas geométricas estándar y que están calibradas para que, por medio de un cálculo matemático y utilizando la medición de la altura del agua, se estime o calcule el caudal.

3.5.2.1 Canal de Aforo Parshall

El aforador Parshall llamado así en honor a su inventor, es un instrumento calibrado para determinar el caudal en cauces abiertos en función de la medida de la profundidad de agua. Se describen técnicamente como un aforador de profundidad crítica.

El aforador Parshall es un dispositivo de medición eminentemente experimental. Esto quiere decir que para calcular el gasto, se debe recurrir a gráficas experimentales que no tienen ecuaciones sencillas de representar.

Los materiales más comunes para su fabricación son de fibra de vidrio, resina de poliéster, vinylester, Atlac Bisphenol (poliéster especial para condiciones severas), acero inoxidable, etc.

La canaleta de aforo Parshall es una estructura hidráulica que permite medir la cantidad de agua que pasa por una sección de un canal.

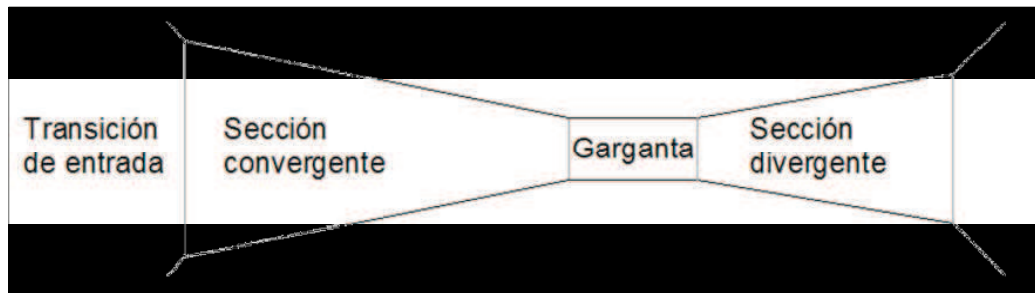
3.5.2.1.1 Partes Principales del Canal de Aforo Parshall

Consta de cuatro partes principales

- I. Transición de entrada.
- II. Sección convergente.
- III. Garganta.
- IV. Sección divergente.

FIGURA 3.5

PARTES PRINCIPALES DEL AFORADOR PARSHALL



En la **transición de entrada**, las paredes se van cerrando ya sea en línea recta o circular.

En la **sección convergente**, el fondo es horizontal y el ancho va disminuyendo.

En la **garganta** el pico vuelve a bajar para terminar con otra pendiente ascendente en la **sección divergente**.

3.5.2.1.2 *Características de Descarga del Aforador Parshall*

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 entre la elevación del agua y el caudal.

En cualquier parte del aforador, desde el inicio de la transición de entrada hasta la salida, el aforador tiene una sección rectangular. El aforador Parshall se puede representar matemáticamente con la siguiente expresión.

$$Q = k(H_a)^n \quad (3.34)$$

Dónde:

Q: Caudal (para condiciones de descarga libre),

H_a: Es la profundidad del agua en la ubicación determinada del aforador, y

K y n: Constantes diferentes para cada tamaño de aforador.

CUADRO 3.9

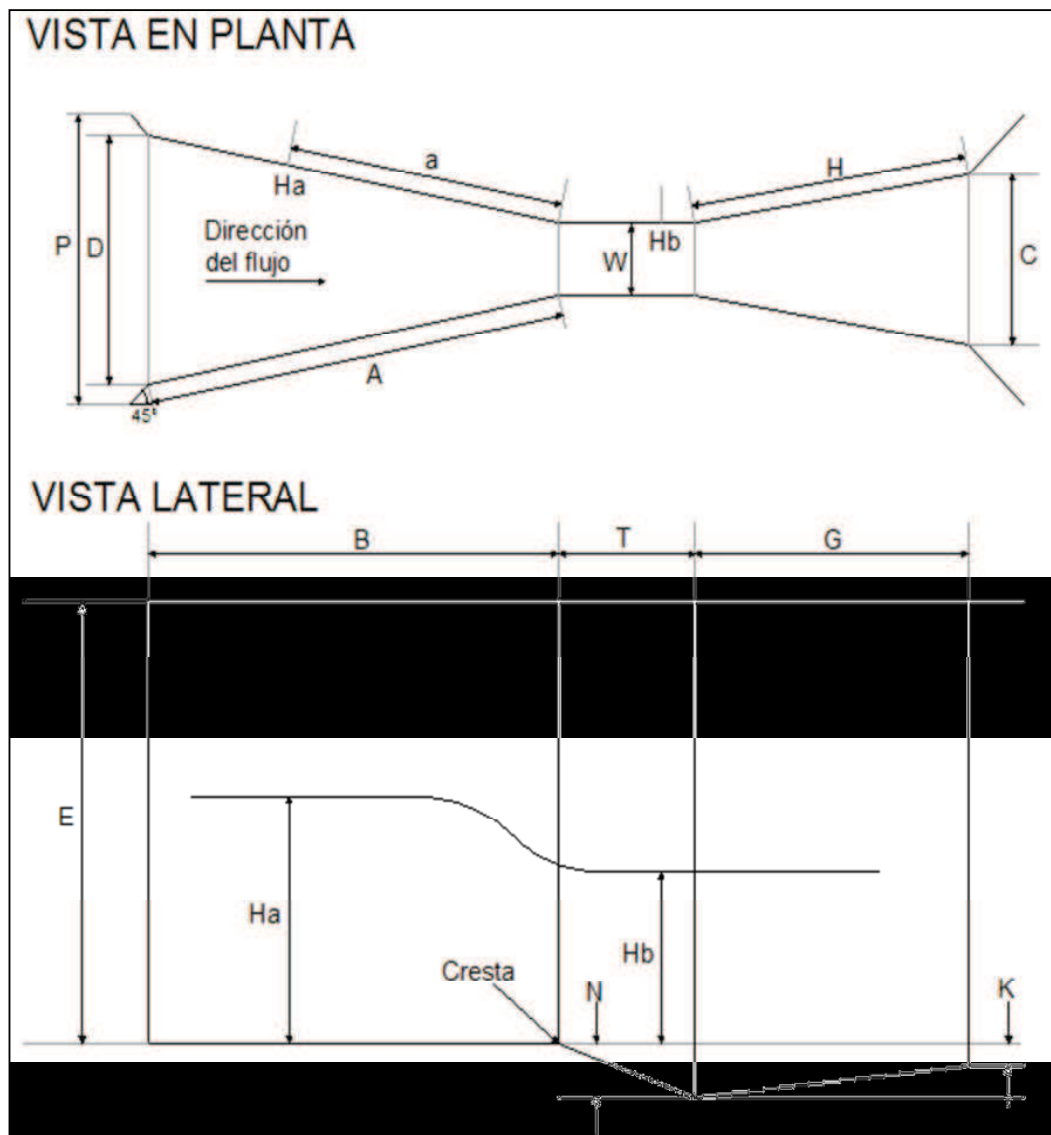
VALORES DE K Y n EN LA ECUACIÓN (3.34) PARA DIFERENTES ANCHOS DE LA GARGANTA

Ancho de la Garganta	Valores de K y n	
W (mm)	K	n
25,4	0,001352	1,55
50,8	0,002702	
76,2	0,003965	
152,4	0,006937	1,58
228,6	0,013762	1,53
W (m)	K	n
0,3048	0,69	1,52
0,4572	1,06	1,54
0,6096	1,43	1,55
0,9144	2,18	1,57
1,2192	2,95	1,58
1,524	3,23	1,59
1,6288	4,52	1,6
2,1336	5,31	
2,4384	6,11	1,61
3,048	7,46	1,6
3,658	9,96	
4,572	10,96	
6,096	14,45	
7,62	17,94	
9,144	21,44	
12,192	28,43	
15,24	35,41	

FUENTE: PEDROZA, Serie Autodidáctica de Medición, 1992.

FIGURA 3.6

NOMENCLATURA DE LAS PARTES DEL AFORADOR PARSHALL



FUENTE: PEDROZA, Serie Autodidáctica de Medición, 1992.

NOMENCLATURA DEL AFORADOR PARSHALL

 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 = diferencia de elevación entre la salida y la cresta
- N = Profundidad de la cubeta
- P = Ancho de la entrada de la transición

3.5.2.1.3 *Descarga Libre y Sumergencia*

Se mide H_a cuando el aforador trabaja con descarga libre, esto quiere decir que la profundidad del agua H_a es mayor, en cierto valor que la profundidad H_b . Para determinar este cierto valor es necesario definir la sumergencia, que no es más que el cociente del valor de H_b , entre H_a , tal como se indica en la Ec. 3.35 donde S es la sumergencia.

$$S = \frac{H_a}{H_b} \quad (3.35)$$

Se permite cierto valor de sumergencia, para cada tipo de aforador, estos valores se presentan en el cuadro 3.10. Si se tiene una sumergencia mayor se dice que el aforador trabaja ahogado o que presenta descarga sumergida, en este caso, será necesario corregir el gasto calculado con la ecuación Ec. 3.34, o con el cuadro 3.9.

CUADRO 3.10

VALORES PERMITIDOS DE SUMERGENCIA (S) EN LOS AFOROS PARSHALL

Ancho de la garganta W (mm)	Sumergencia máxima permitida, S (%)
25,4	50
50,8	50
76,2	50
152,4	60
228,6	60
Ancho de la garganta W (m)	Sumergencia máxima permitida, S (%)
0,3048	70
0,4572	70
0,6096	70
0,9144	70
1,2192	70
1,5240	70
1,6288	70
2,1336	70
2,4384	70
3,0480	80
3,6580	80
4,5720	80
6,0960	80
7,6200	80
9,1440	80
12,1920	80
15,2400	80

FUENTE: PEDROZA, Serie Autodidáctica de Medición, 1992.

Si la sumergencia se rebasa, el caudal en el aforador sufre una disminución, para este caso el caudal se puede calcular con la Ec. 3.36

$$Q_s = Q - Q_e \quad (3.36)$$

Dónde:

Q_s : Caudal en el aforador en condiciones de sumergencia mayor a la permitida en el cuadro 3.10,

Q : Caudal calculado con la Ec. 3.34 o en el cuadro 3.9 sin sumergencia, y

Q_e : Caudal de corrección.

Cuando los aforadores tipo Parshall trabajan sin sumergencia se obtienen buenas mediciones, con una precisión de $\pm 2\%$; y para condiciones de sumergencia considerable, se tiene una precisión de ± 5 (PEDROZA, 1992)

3.1.2.1.4 *Requerimientos y Especificaciones de Instalación del Aforador Parshall*

- La velocidad de llegada debe exceder los 0,3 m/s para evitar el crecimiento de maleza, los insectos y el azolve.
- Se debe evitar las corrientes inestables por lo tanto se debe verificar la velocidad de llegada antes de iniciar la construcción del aforador realizando inspecciones visuales.
- Se debe permitir grandes pérdidas de carga para absorber el remanso y así poder utilizar una relación de tirante y caudal con mediciones precisas. Esta relación asegura que los límites de sumergencia no se han excedido y no se tenga una sumergencia excesiva.
- Se necesita saber si el sitio donde está ubicado el aforador está influenciado por operación de compuertas sobre el canal para realizar el diseño

- Después de seleccionar la localización del canal se debe conocer :
 - Caudal mínimo y máximo que circula por el canal.
 - Profundidades correspondientes
 - Velocidad máxima del flujo
 - Dimensiones del canal en el sitio

Se debe poner especial atención a la capacidad de contener el incremento de nivel causado por la instalación del aforador

- Preferentemente el tramo seleccionado debe ser estable. En épocas de estiaje se debe tener cuidado con la sedimentación porque se pueden dar cambios en la velocidad e incluso se puede llegar a enterrar la estructura.
- El aforador debe ubicarse en tramos rectos de canal con ello se garantiza que el flujo sea uniforme y que las mediciones sean confiables.
- Desde el punto de vista de comodidad es importante la localización apropiada del aforador, debe estar cerca de la regulación usada para controlar la descarga. El aforador debe ser de fácil acceso para su instalación y mantenimiento

3.5.2.1.5 *Verificación del Funcionamiento*

- Es importante medir todas las partes del aforador identificando el ancho de la garganta, sin importar si el medidor es prefabricado o construido en el sitio.
- Con el ancho de la garganta encontramos el resto de dimensiones y comparamos con las del aforador construido.
- Para encontrar las lecturas H_a y H_b es importante que el cero coincida con el nivel de la parte horizontal del aforador, es decir con la cresta. (Figura 3.6)

CUADRO 3.11

PROFUNDIDADES MÍNIMAS Y MÁXIMAS EN AFORADORES PARSHALL

Ancho de la garganta aforador W (mm)	Rango de funcionamiento	
	H _a mínimo	H _a máximo
Dimensiones en mm		
25,4	0,015	0,21
50,8	0,015	0,24
76,2	0,03	0,33
152,4	0,03	0,45
228,6	0,03	0,61
Dimensiones en m		
0,3048	0,03	0,76
0,4572	0,03	0,76
0,6096	0,046	0,76
0,9144	0,046	0,76
1,2192	0,06	0,76
1,5240	0,06	0,76
1,6288	0,076	0,76
2,1336	0,076	0,76
2,4384	0,076	0,76
3,0480	0,09	1,07
3,6580	0,09	1,37
4,5720	0,09	1,67
6,0960	0,09	1,83
7,6200	0,09	1,83
9,1440	0,09	1,83
12,1920	0,09	1,83
15,2400	0,09	1,83

FUENTE: PEDROZA, Serie Autodidáctica de Medición, 1992.

3.5.2.1.6 *Registro de Lecturas y Procesamiento de Información.*

Para conocer el caudal se debe leer el tirante o calado en el punto de lectura H_a (Figura 3.6) utilizando una escala, regla, limnómetro, etc. Cualquiera que sea el caso se tiene que verificar el cero en la cresta del aforador (Figura 3.6) y que la graduación sea correcta. Luego se deberá calcular el caudal con las gráficas correspondientes o con su ecuación (Cuadro 3.9).

Siempre se debe verificar que la descarga sea libre, porque en caso contrario también se deberá verificar la profundidad H_b para encontrar el caudal real.

Para saber si la descarga es libre o ahogada se debe observar con atención la superficie del agua inmediatamente después del aforador. Si se nota un salto hidráulico normal (inmediatamente después del aforador) quiere decir que es una descarga libre, entonces no debe corregirse el caudal y solamente se utilizarían las ecuaciones del cuadro 3.9

Si no observamos el salto hidráulico quiere decir que tenemos salto ahogado o salto barrido, en el primer caso como su nombre lo indica el salto esta ahogado y se encontrara en la sección de divergencia del aforador, la corriente aguas abajo del aforador es de la misma magnitud que aguas arriba del mismo. El salto barrido estará muy alejado del aforador y en algunos casos incluso no se apreciará, la corriente aguas abajo es significativamente más rápida que en la entrada y es muy notorio que el agua cae en la sección de la garganta.

Si no se logra distinguir si se tiene descarga libre o ahogada lo más aconsejable es medir el calado en los dos puntos H_a y H_b (Figura 3.6), calcular el porcentaje de sumergencia, revisar en el cuadro 3.10 el porcentaje de sumergencia permitida y así calcular el caudal como corresponda.

Las mediciones también pueden realizarse electrónicamente con equipos de medición, los mismos que están formados por dos componentes básicos:

- Sensores de nivel
- Tabla de calibración

Los sensores de nivel miden el tirante en puntos específicos del aforador, en nuestro caso H_a (Figura 3.6) y H_b si es necesario, con esta medición el equipo determina el caudal que circula por el aforador basándose en la tabla de calibración que depende de las dimensiones de cada aforador. Algunos equipos incluyen un totalizador de volumen y una pantalla para mostrar la información que se está tomando.

Existen también equipos que incorporan algún tipo de comunicación alámbrica o inalámbrica que permite enviar los datos medidos de nivel, caudal, volumen totalizado que se obtiene integrando el caudal en el tiempo, para lo cual se debe configurar el equipo como lo indica el manual.

Existen dos alternativas para medir el nivel sensores de presión y sensores ultrasónicos.

3.5.2.1.7 *Modelo Canal Parshall 7.62 cm*

Dadas las instalaciones disponibles en el laboratorio de hidráulica se eligió construir un Canal Parshall con un ancho de garganta de 7.62 cm ó 3", este canal puede medir un caudal mínimo de 0.78 l/s y un caudal máximo de 40 l/s, se debe dar gran importancia a estos rangos para obtener resultados confiables.

La medición de caudal y calado se realizará con un sensor ultrasónico de marca Greyline y modelo OCF 4.0.

Se dará siempre una descarga libre lo que quiere decir que se deberá tomar datos de calado H_a solamente a la distancia "a" (Figura 3.6).

Dimensiones de acuerdo a la nomenclatura del Canal Parshall.

$W = 7.62$ cm (Ancho de la garganta)

$A = 46.6$ cm (Longitud de las paredes de la sección convergente)

$a = (2/3) A = 31.07$ cm (Ubicación del punto de medición H_a)

B = 45.7 cm (Longitud de la sección convergente)

C = 17.8 cm (Ancho de la salida)

D = 25.9 cm (Ancho de la entrada de la sección convergente)

E = 46.1 cm (Profundidad total)

T = 15.2 cm (Longitud de la garganta)

G = 30.5 cm (Longitud de la sección divergente)

H = 30.9 cm (Longitud de las paredes de la sección divergente)

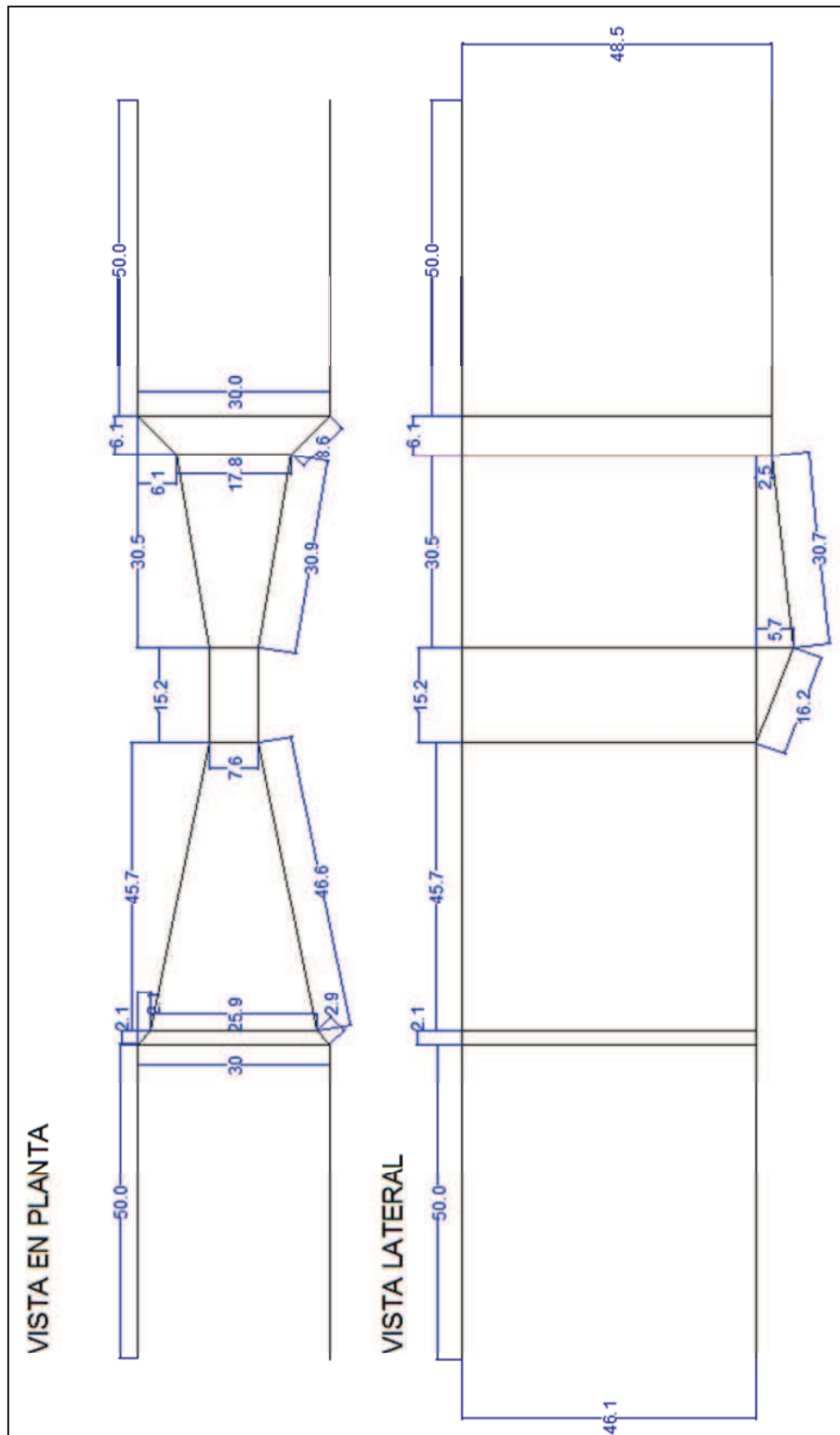
K = 2.5 cm (diferencia de elevación entre la salida y la cresta)

N = 5.7 cm (Profundidad de la cubeta)

P = 30 cm (Ancho de la entrada de la transición)

FIGURA 3.7

DIMENSIONES (cm) DEL MODELO CANAL PARSHALL 7.62 cm INSTALADO EN EL LABORATORIO.



3.5.2.1.7.1 *Curva de Descarga Modelo Canal Parshall 7.62 cm*

- $Q = 0,003965H_a^{1,55}$ (3.37) (Pedroza Gonzales, 1992)

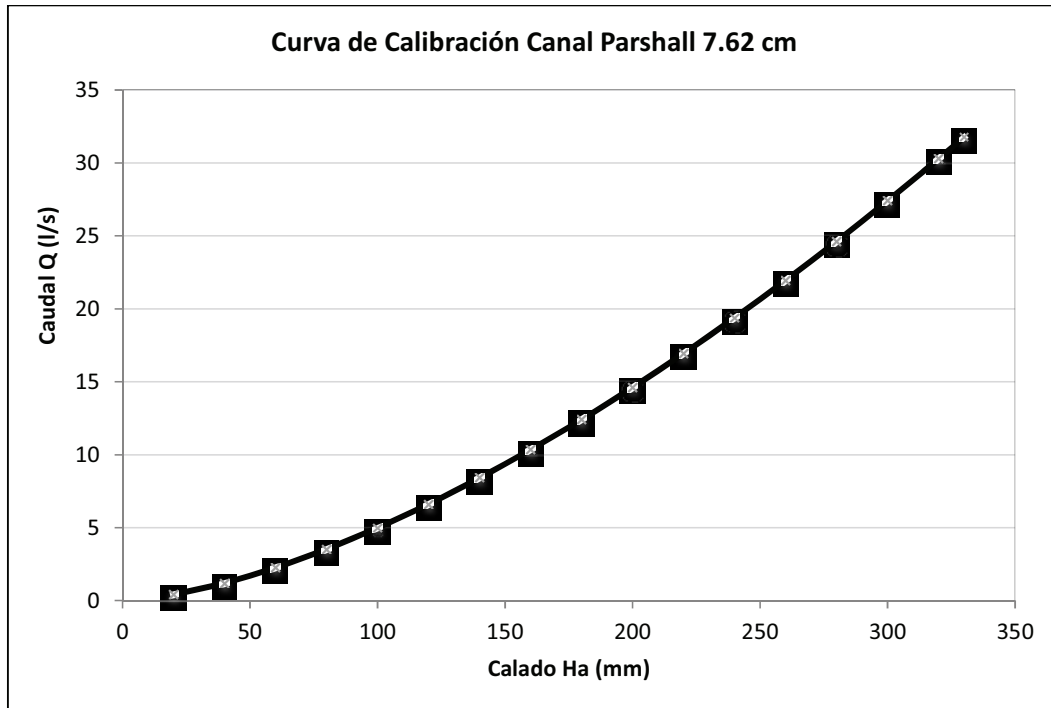
CUADRO 3.12

CAUDALES OBTENIDOS CON LA ECUACIÓN 3.37

Ha (mm)	Q (l/s)
20	0,412
40	1,206
60	2,261
80	3,532
100	4,992
120	6,622
140	8,409
160	10,343
180	12,414
200	14,616
220	16,943
240	19,390
260	21,951
280	24,623
300	27,402
320	30,285
330	31,764

FIGURA 3.8

CURVA DE CALIBRACIÓN OBTENIDA CON EL CUADRO 3.12



- $Q = 0,1771H_a^{1,55}$ (3.38). (Discharge Measurement Structures, 1976)

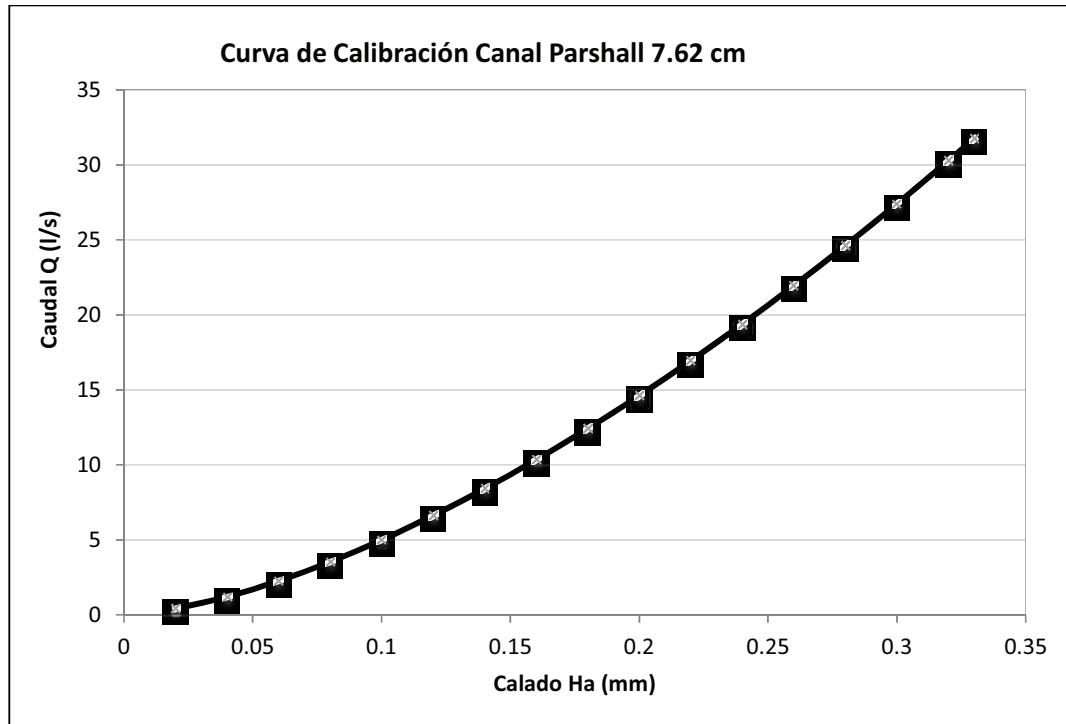
CUADRO 3.13

CAUDALES OBTENIDOS CON LA ECUACIÓN 3.38

Ha (m)	Q (m ³ /s)	Q (l/s)
0,02	0,0004	0,412
0,04	0,0012	1,206
0,06	0,0023	2,261
0,08	0,0035	3,532
0,10	0,0050	4,991
0,12	0,0066	6,621
0,14	0,0084	8,408
0,16	0,0103	10,342
0,18	0,0124	12,413
0,20	0,0146	14,616
0,22	0,0169	16,942
0,24	0,0194	19,389
0,26	0,0219	21,950
0,28	0,0246	24,621
0,30	0,0274	27,400
0,32	0,0303	30,283
0,33	0,0318	31,763

FIGURA 3.9

CURVA DE CALIBRACIÓN OBTENIDA CON EL CUADRO 3.13



3.5.2.1.7.2 *Curva de Descarga Modelo Canal Parshall 7.62 cm Predeterminado en el Monitor de Flujo Greyline OCF 4.0*

$$Q = 0,0040345 H_a^{1,5470}$$

(3.39). (Greyline Instruments Inc.)

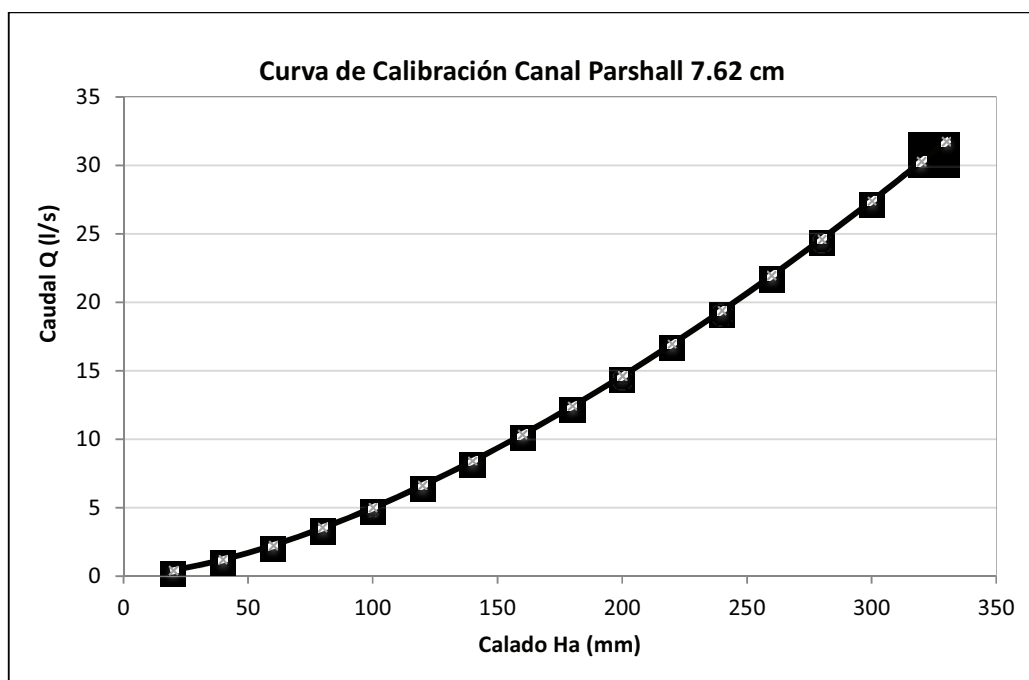
CUADRO 3.14

CAUDALES OBTENIDOS CON LA ECUACIÓN 3.39

Ha (mm)	Q (l/s)
20	0,415
40	1,214
60	2,273
80	3,547
100	5,009
120	6,642
140	8,430
160	10,365
180	12,436
200	14,638
220	16,964
240	19,408
260	21,966
280	24,634

FIGURA 3.10

CURVA DE CALIBRACIÓN OBTENIDA CON EL CUADRO 3.14



3.5.2.2 Canal de Aforo Palmer-Bowlus

El canal de aforo Palmer-Bowlus es un medidor de caudales a superficie libre, como canales y cañerías, mediante un dispositivo hidráulico ubicado en el fondo de los mismos.

Se aplica principalmente para aforar fluidos de sistemas de alcantarillado, industriales y de riego.

Fue desarrollado en 1930, por Harold N. Palmer y Fred D. Bowlus y publicado por A.S.C.E.

En 1936, a su vez, Wells y Gotaas, lo investigaron en profundidad y establecieron las condiciones que deben adoptarse para su diseño y operación, a fin de arribar a un adecuado funcionamiento hidráulico. (American Society of Civil Engineers) de USA, en 1936. (POTEL JUNOT, 2002).

3.5.2.2.1 *Principios Hidráulicos del Aforador Palmer-Bowlus*

El funcionamiento del canal Palmer-Bowlus es semejante al de un medidor tipo Venturi, se caracteriza por un estrechamiento en su sección transversal.

Igual que en el aforador Parshall es libre el escurrimiento de los caudales a medir.

El control hidráulico del flujo es producido por un canal de sección transversal restringida y uniforme (garganta del aforador).

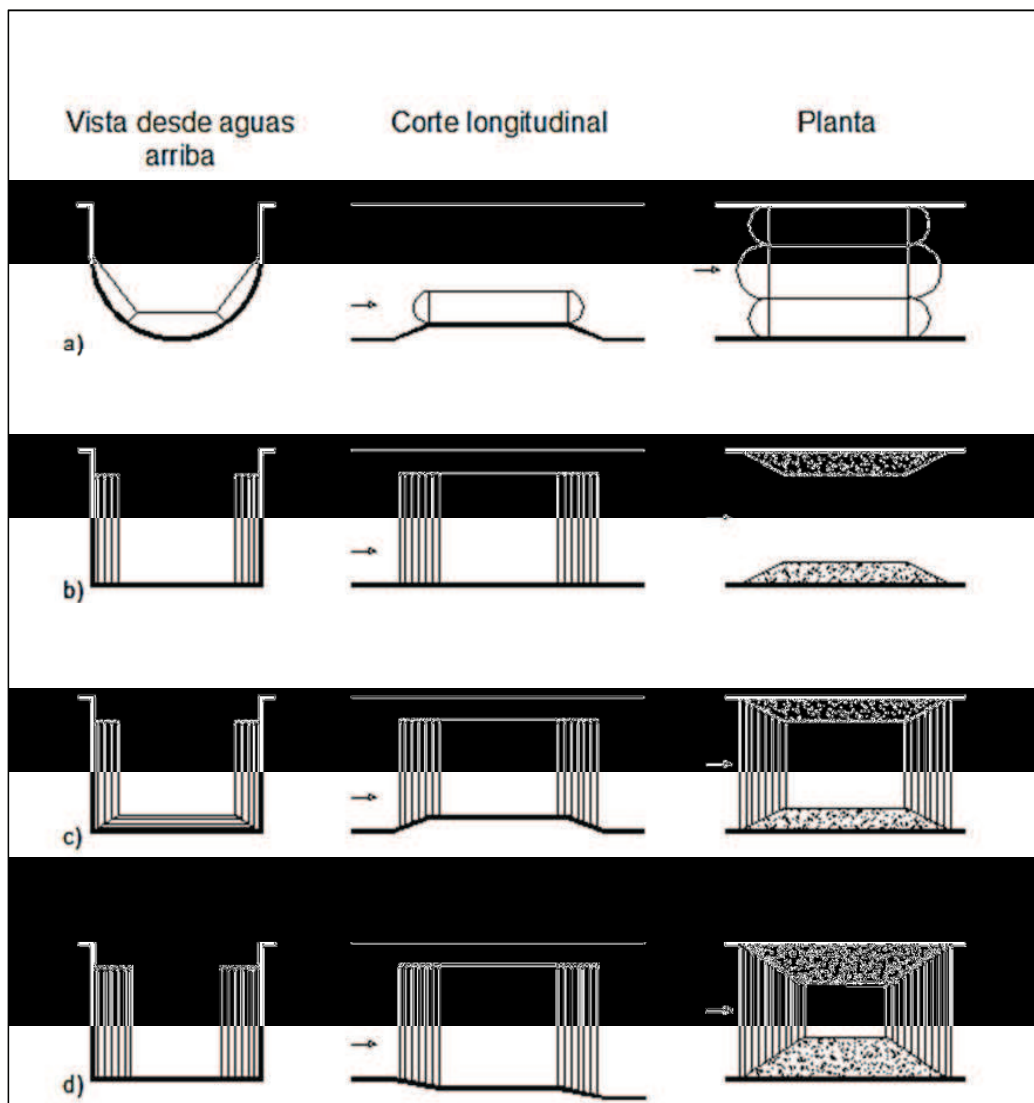
Para que funcione como un medidor de caudal, deben producirse en la garganta condiciones de régimen crítico, o lo que es lo mismo una sección transversal crítica donde se desarrolle el tirante o calado crítico, h_c (m), sobre su fondo plano. Esta condición se cumple, cuando aguas arriba de la garganta se desarrolla un flujo subcrítico, con una sobreelevación del flujo. Como consecuencia, aguas debajo de esa sección crítica el régimen hidráulico pasa a ser supercrítico hasta formar un resalto hidráulico (disminución y aumento brusco del nivel del flujo), inmediatamente a continuación de la garganta, siguiendo con flujo subcrítico aguas abajo del medidor.

Una vez conseguido el régimen crítico sobre la garganta, el caudal Q que escurre por el aforador puede relacionarse con el calado h_o medido en una sección transversal determinada aguas arriba de la garganta. Esa relación permite definir una curva de calibración, $h_o = f(Q)$.

3.5.2.2.2 Clasificación del Aforador Palmer-Bowlus

FIGURA 3.11

CLASIFICACIÓN DE AFORADORES PALMER-BOWLUS



FUENTE: AIDIS Potel Junot 2002

El canal de aforo Palmer-Bowlus se clasifica de la siguiente manera:

- Por su uso: permanentes o definitivos y temporarios o provisorios.
- Por la sección transversal de la garganta: rectangulares b y c (Figura 3.11) y trapeciales a y d (Figura 3.11).
- Según el nivel del fondo plano de la garganta, respecto al fondo del canal: sobre elevados (a y c) (Figura 3.11), al mismo nivel (b) (Figura 3.11). y reprimidos o rebajados, como en d (Figura 3.11), este último utilizado para el control del flujo en desarenadores.

3.5.2.2.3 Partes Principales del Aforador Palmer-Bowlus

- Zona intermedia, estrechada o garganta del aforador.

Se divide en tres partes principales: el central de fondo plano y horizontal y las transiciones en los extremos respecto a la sección transversal del conducto donde se inserta.

En el tramo central es donde se produce el tirante o calado crítico, h_c , aproximadamente la mitad del tramo.

La sección transversal en el tramo central, es rectangular o trapecial con prolongación rectangular superiormente, siendo su fondo plano y horizontal.

- Zona aguas arriba de la garganta.

Es donde se encuentra la sección transversal de los tirantes o calado h_0 medidos en el fluido (puntos de medición), correspondientes a cada valor del caudal Q .

La sección transversal del conducto puede ser rectangular, trapecial o semicircular con prolongación rectangular superiormente, al igual que en la trapecial.

En la zona debe asegurarse el flujo subcrítico (tranquilo) especialmente en la sección de medición.

En la sección del tirante medido, debe asegurarse que no se produzcan agitaciones y perturbaciones del flujo. Por lo que debe haber un flujo uniforme.

- Zona de descarga del caudal, aguas debajo de la garganta.

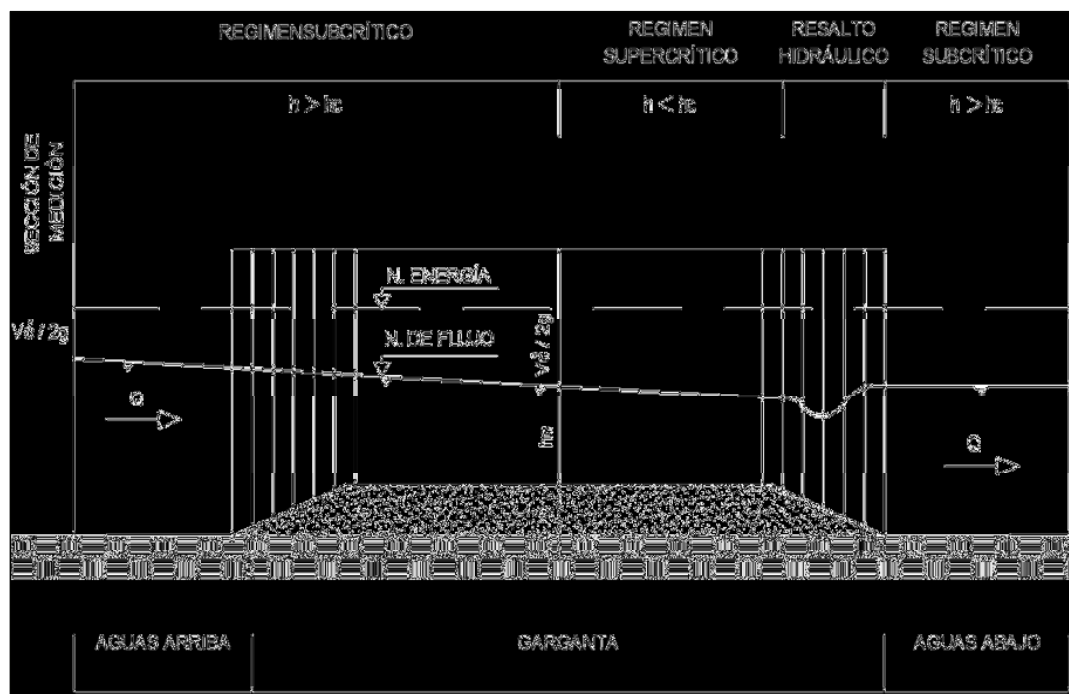
También en esta zona el régimen del flujo debe ser subcrítico, a fin de mantener el resalto hidráulico al final de la garganta.

La sumergencia (diferencia entre los niveles aguas arriba y aguas debajo de la garganta) no debe superar el máximo de un 85%, preferentemente no más de 80 % (superior al de canales Parshall).

El régimen subcrítico generalmente se asegura con ampliaciones, vertical y/o horizontal de la sección transversal. (POTEL JUNOT, 2002).

FIGURA 3.12

REGÍMENES DE FLUJO EN EL AFORADOR PALMER-BOWLUS



3.5.2.2.4 *Condiciones Necesarias Para el Diseño de un Aforador Palmer-Bowlus*

- En zonas aguas arriba de la garganta

Para elegir un aforador se requiere especialmente considerar el rango de caudales esperados: máximo y mínimo.

El tirante o calado h_o , correspondiente al caudal máximo Q_{max} , no debe exceder el 85% del ancho mayor o el diámetro del canal según sea el caso.

El tirante o calado h_o , correspondiente al caudal mínimo Q_{min} , debe ser igual o mayor a la altura de la sobreelevación de la garganta cuando se la proyecta.

Se aconseja diseñar una pantalla de malla transversal a una distancia de 2 a 4 veces el ancho del canal o diámetro del conducto, a partir del comienzo de la garganta.

- Zona de la garganta

Debe ubicarse en el fondo del canal o conducto donde se inserta, haciendo coincidir su parte exterior con el interior del conducto.

Cuando se instala en una caja de revisión de sistemas de alcantarillado, debe dejarse un espacio suficiente en la zona de medición del tirante o calado h_o , aguas arriba de la garganta.

El fondo de la garganta debe ser plano y horizontal.

- Zona aguas debajo de la garganta o de descarga

Debe evitarse obstrucciones en la descarga de caudales, que puedan afectar el desarrollo del resalto, requerido a continuación de la garganta y en consecuencia al régimen subcrítico.

3.5.2.2.5 *Aforadores Palmer-Bowlus Prefabricados*

Existen en el mercado aforadores de una sola pieza para ser adaptados en conductos existentes o a diseñar.

La designación del aforador corresponde al ancho o diámetro del canal según sea el caso, del conducto donde se inserta.

Se ofrecen en el mercado varias clases de aforadores prefabricados, se pueden indicar los siguientes:

- Permanentes o definitivos.
- Acoplado al conducto de aguas abajo del medidor, especialmente en una caja de registro de alcantarillado.
- Portátiles para ser aplicados en conductos existentes.

El material del aforador es adoptado especialmente para contemplar la agresividad, la acción erosiva del material suspendido y la acción del flujo al medir.

Particularmente se suministran para aforar caudales en una caja de medición de sistemas de alcantarillado. Cada aforador se suministra con su respectiva curva de calibración y tablas que definen $h_0 = f(Q)$.

3.5.2.2.6 *Calculo de la Curva de Calibración del Aforador Palmer-Bowlus.*

- Expresión hidráulica básica para el cálculo

Se aplica la expresión de Bernoulli en dos secciones transversales, la (1) en la zona de medición aguas arriba y la (2) sobre la garganta:

$$E = E_1 = E_2 \quad (3.40)$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + a + h_f \quad (3.41)$$

Energía específica, respecto al fondo del conducto de la zona (1).

Dónde:

h_1 : Tirante o calado en la sección (1), (m),

h_2 : Tirante o calado en la sección (2), (m),

$h_f = 0$: P de carga en el escurrimiento por la garganta, (m), no se considera en el cálculo por ser un valor muy pequeño (aproximadamente cero),

$V_1 = Q_1/A_1$: Velocidad media del flujo en la sección (1), (m/s),

$V_2 = Q_2/A_2$: Velocidad media del flujo en la sección (2), (m/s),

$Q = Q_1 = Q_2$: Caudal, (m^3/s), constante durante todo el sistema,

A_1 : Área mojada, (m^2), en la sección (1), pudiendo ser rectangular, trapecial o semicircular con prolongación rectangular superior, y

A_2 : Área mojada, (m^2), en la sección (2), pudiendo ser rectangular, trapecial o semicircular con prolongación rectangular superior.

- Energía específica en la sección transversal donde se desarrolla el flujo crítico sobre la garganta.

Haciendo $E_2 = E_c$: Energía específica en la sección crítica, (m), se tiene:

$$E_2 = E_c \quad (3.42)$$

$$E_c = h_c + \frac{V_c^2}{2g} \quad (3.43)$$

$$E_c = h_c + \frac{Q_c^2}{2g A_c^2} \quad (3.44)$$

Energía específica en la sección crítica, (m), respecto al fondo de la garganta.

Dónde:

h_c : Tirante o calado crítico, (m), de esa sección mojada,

V_c : Velocidad media crítica, (m/s), en esa sección mojada,

A_c : Área mojada, (m^2), y

$g = 9,806 \text{ m/s}^2$: Aceleración de la gravedad.

En la sección transversal crítica se tiene:

$$N_f^2 = 1 \quad (3.45)$$

$$N_f^2 = \frac{V_c^2}{g \cdot h_{cm}} \quad (3.46)$$

$$N_f^2 = \frac{Q^2}{g \cdot h_{cm} \cdot A_c^2} \quad (3.47)$$

$$N_f^2 = \frac{Q^2 \cdot B_c}{g \cdot A_c^3} \quad (3.48)$$

Número de Froude generalizado en la sección trasversal crítica, en términos de caudal, siendo:

$h_{cm} = A_c/B_c$: altura media de cualquier sección transversal, (m), como es la trapecial, y

$N_c = 1$: número de Froude en una sección crítica.

A la expresión N_F^2 , también se llega derivando la Energía Específica, $E_c(m)$, respecto al tirante líquido crítico, $h_c(m)$:

$$\frac{d(E_c)}{d(h_c)} = 1 - \left[\frac{Q^2}{g \cdot A_c^3} \right] \cdot \frac{d(A_c)}{d(h_c)} \quad (3.49)$$

$$\frac{d(E_c)}{d(h_c)} = 1 - \left[\frac{Q^2 B_c}{g \cdot A_c^3} \right] \quad (3.50)$$

Siendo:

$d(A_c) = B_c \cdot d(h_c)$: Área mojada en la sección crítica, de altura $d(h_c)$, (m) y B_c (m) ancho del área mojada en su superficie líquida, (m).

En el régimen crítico se tiene:

$$\frac{d(E_c)}{d(h_c)} = 0 \quad (3.51)$$

En consecuencia:

$$1 = \frac{Q^2 \cdot B_c}{g \cdot A_c^3} \quad (3.52)$$

Expresión similar para el número de Froude,

$$N_f = 1 \quad (3.53)$$

Considerando a ambas expresiones similares, se llega a la siguiente expresión:

$$Q = Q_1 = Q_c \quad (3.54)$$

$$Q = \left(\frac{g \cdot A_c^3}{B_c} \right)^{1/2} \quad (3.55)$$

Q en (m³/s): caudal, que pasa por la sección transversal crítica, de ancho, B_c (m) y área mojada, A_c (m²), igual a todas las secciones del sistema en un instante dado.

- Energía específica en la sección de medición de los tirantes del fluido, h_o(m) ubicada aguas arriba de la garganta.

En esa sección:

$$h_1 = h_0, \quad A_1 = A_0, \quad \text{y} \quad V_1 = V_0$$

En consecuencia:

$$E_1 = E_0 = h_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad (3.56)$$

$$E_1 = E_0 = h_0 + \frac{Q^2}{2g A_o^2} \quad (3.57)$$

Energía específica en la sección de medición, (m).

En consecuencia para el cálculo, se tiene:

$$E_1 = E_0 = E_c + a \quad (3.58)$$

Energía específica del sistema, (m).

Por lo tanto considerando el valor de E_c en metros, calculado para cada valor del tirante líquido crítico adoptado, h_c (m), se tiene:

$$E_c + a = h_c + \frac{A_c}{B_c} + a = h_0 + \frac{Q^2}{2g} \quad (3.59)$$

Dónde:

a: Altura de sobreelevación o depresión, (m), siendo positivo su valor para la sobreelevación, nulo cuando el nivel del fondo es igual en la garganta y en el conducto y negativo para la depresión.

Conocido el parámetro, a (m) y calculada la energía específica crítica sobre la garganta, E_c (m), para cada valor del tirante líquido crítico, h_c (m), adoptado, deben efectuarse iteraciones entre los valores del tirante líquido crítico, h_0 (m) y el correspondiente al área mojada, A_0 (m^2), en la sección transversal de medición.

Esa iteración debe llegar a:

$$h_0 + \frac{Q^2}{2g} = E_c + a \quad (3.60)$$

Determinado por lo tanto, el valor de h_0 (m) y el caudal, Q (m^3/s), del sistema calculado para cada tirante líquido, h_c (m), adoptado en la sección crítica, se grafican cada par de valores calculados en un sistema de coordenadas cartesianas, (y, x).

Uniendo los puntos de cada par, calculamos con los de h_c (m) adoptados, se tiene la curva de calibración, $h_0 = f(Q)$, de cada aforador diseñado.

3.5.2.2.7 *Parámetros Requeridos Para el Cálculo de la Curva de Calibración.*

- Área mojada por donde pasa el caudal Q (m^3/s)

- a. Para la sección trapezoidal

$$A = b.h + \frac{H^2}{i} \quad (3.61)$$

Área mojada, (m^2), para $h < H$ (m)

$$A = b.H + \frac{H^2}{i} \quad (3.62)$$

Área mojada, (m^2), para $h = H$ (m)

$$A = b.h + \frac{2h.H}{i} - \frac{H^2}{i} \quad (3.63)$$

Área mojada (m^2), para $h > H$ (m) – sección trapezoidal y rectangular superior de ancho $B = b + 2H/i$, (m)

Dónde:

- b: Ancho menor o base de la sección trapezoidal, (m),
- h: Altura líquida del área mojada, (m),
- H: Altura líquida del trapecio, (m), y
- i: Pendiente o relación entre las proyecciones vertical y horizontal, (m/m), correspondientes a cada lado inclinado del trapecio.

b. Para la sección rectangular:

$$A = B.h \quad (3.64)$$

Área mojada, medida en (m^2), de una sección transversal rectangular constante, de ancho $B = b$ (m) y altura h (m)

c. Para la sección circular:

$$A = \frac{D^2(\theta - \text{sen}\theta^\circ)}{8} \quad (3.65)$$

Área mojada, (m^2), del segmento circular de un conducto de diámetro D (m), siendo: h = tirante líquido, (m)

Dónde:

θ° : 2 veces el ángulo cuyo coseno es $(1 - 2h/D)$, expresado en grados sexagesimales.

$$\theta : \theta = \left(\frac{\pi}{180} \right) \cdot \theta^\circ = 0,017453292 \cdot \theta^\circ$$

Arco cuyo ángulo respecto al centro de gravedad, es θ° , (radianes)

$$A = \frac{D^2(\pi - \text{sen}180^\circ)}{8} + h.D - \frac{D^2}{2} \quad (3.66)$$

Área mojada en un conducto, compuesto por una sección semicircular inferior (cojinete) y una superior rectangular, ambas de diámetro D (m) = B : ancho de la sección, (m).

Esta situación se da en una caja de revisión y registro de un sistema de alcantarillado

3.5.2.2.8 *Secuencia de Cálculo de un Aforador Palmer-Bowlus*

Considerando las dimensiones y características del aforador adoptado, la secuencia de cálculo es la siguiente:

- a) Adoptar un tirante líquido crítico, h_c (m), desarrollado en la sección transversal adoptada sobre la garganta.
- b) Determinar el ancho de la superficie líquida del área mojada, B_c (m), correspondiente a h_c (m), anotado en el inciso a), y de acuerdo en lo indicado en el numeral 3.5.2.2.6.
- c) Calcular el área mojada, A_c (m²), para h_c (m) del inciso a), de acuerdo a lo indicado en el numeral 3.5.2.2.7.
- d) Calcular ($E_c + a$): energía específica, (m), respecto al fondo del conducto, en la sección crítica de la garganta, con los parámetros, B_c (m) del inciso b), A_c (m²) del inciso c) y de a (m): diferencia de niveles del fondo, entre la garganta y el conducto (positiva en la sobreelevación, nula cuando son iguales y negativa en la depresión).
- e) Calcular el caudal $Q = (g.A_c^3/B_c)^{1/2}$, correspondiente a todo el medidor, h_c (m) del inciso a).
- f) Para que $E_0 = h_0 + (Q^2 / A_0^2)/2g$: energía específica en el conducto de la sección transversal donde se mide el tirante, h_0 (m), sea igual a ($E_c + a$),

del inciso d), hay que iterar los parámetros h_0 (m) y A_0 (m^2) que es función de h_0 (m).

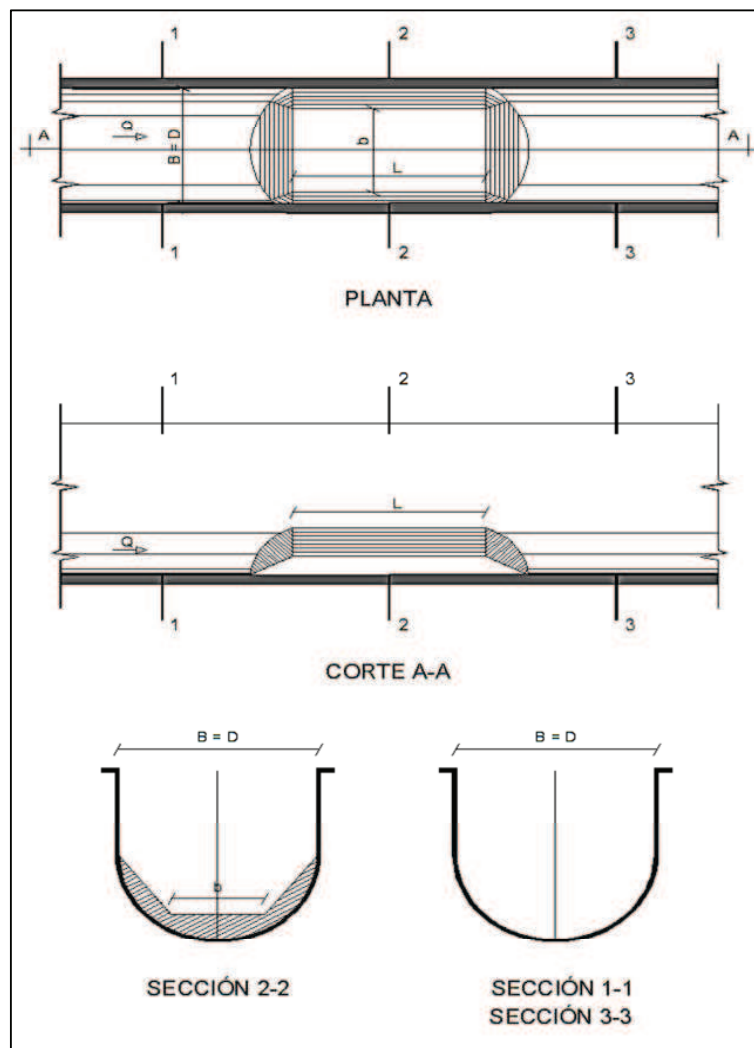
g) Lograda esa igualdad $E_0 = E_c + a$, se tiene el par de valores, $y = h_0$ (m) y $x = Q$ (m^3/s), que definen un punto de la curva de calibración $h_0 = f(Q)$

h) Los restantes puntos de la curva de calibración $h_0 = f(Q)$ se obtiene asignando valores de h_c (m) y repitiendo, para cada uno, los pasos a) hasta g).

3.5.2.2.9 Aforador Palmer-Bowlus Para Canal de Sección Circular

FIGURA 3.13

AFORADOR PALMER-BOWLUS PARA SECCIÓN CIRCULAR



En la Figura 3.13 se puede observar un aforador Palmer-Bowlus para canal de sección semicircular, con garganta sobreelevada.

Se aprecia en dicha figura la disposición en planta y en corte longitudinal del aforador Palmer-Bowlus construido en el canal (o instalado, en caso de un aforador prefabricado), más los cortes transversales de las tres secciones típicas que lo caracterizan, la correspondiente al tramo inicial o de aguas arriba de la garganta (sección 1-1), la correspondiente al sector de la garganta estrechada horizontal y verticalmente (sección 2-2) y la correspondiente al sector ubicado aguas debajo de la garganta (sección 3-3).

- Sección 1-1

Esta sección corresponde al tramo inicial del aforador, de sección transversal semicircular-rectangular, donde se lee el calado o tirante, h_0 (m) función del caudal Q (m^3/s). en esta zona el flujo siempre debe ser subcrítico (Número de Froude, $Nr < 1$). La sección transversal de este tramo está integrada por dos partes, la sección semicircular del fondo del canal, de diámetro D que llega hasta la altura $D/2$ y la sección rectangular de ancho $B = D$, a partir de la altura $D/2$, limitada por las paredes verticales, hasta el coronamiento de las mismas.

- Sección 2-2

Esta sección se encuentra en el sector de la garganta estrechado horizontal y verticalmente, donde se desarrolla el tirante o calado crítico h_c (m) con Nr (Número de Froude) igual a 1.

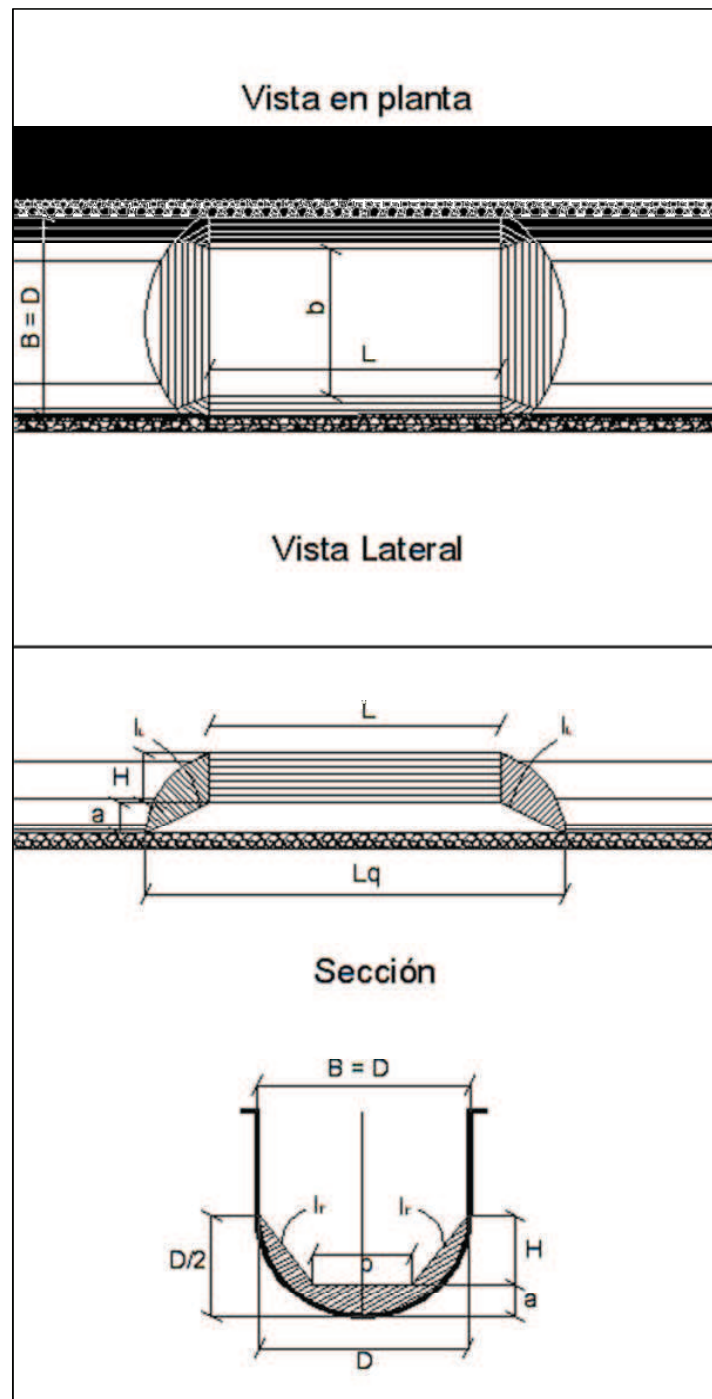
La garganta esta elevada en un valor a respecto de la generatriz inferior del fondo de la sección semicircular del canal. La sección transversal de la garganta es constante en toda la longitud de ésta, salvo en ambas transiciones longitudinales (inicial y final).

La sección transversal constante de la garganta tiene dos sectores: el inferior de sección trapezoidal, de altura H , con base menor b y base mayor $B = D$ y el superior que continua verticalmente con sección rectangular de ancho $B = D$.

Las dimensiones características de esta sección son las siguientes:

FIGURA 3.14

DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS DE LA SECCIÓN DE LA GARGANTA DEL AFORADOR PALMER-BOWLUS



a (m): sobreelevación de la garganta respecto de la generatriz inferior (invertido) del fondo de sección semicircular del canal.

b (m): ancho menor o base de la sección trapecial de la garganta del aforador.

B (m): ancho mayor o superficial de la sección trapecial de la garganta y ancho constante de la sección rectangular, siendo: $B = D =$ ancho del canal.

H (m): altura del sector trapecial de la garganta.

i_T (m/m): pendiente o inclinación de los lados del sector trapecial de la garganta (vertical / horizontal).

i_L (m/m): pendiente o inclinación de las transiciones longitudinales desde la sobreelevación a hasta el fondo del canal (vertical / horizontal).

D (m): diámetro de la sección semicircular del canal.

L (m): longitud del fondo plano horizontal de la sobreelevación de la garganta.

L_q (m): longitud del tramo sobreelevado de la garganta

- Sección 3-3

A continuación de la sección transversal crítica se genera el resalto hidráulico, cuyo inicio es el régimen subcrítico ($Nr < 1$). Es conveniente que el resalto se desarrolle sobre la transición entre los niveles de la solera horizontal de la garganta y el fondo de sección semicircular del canal, aguas debajo de la misma.

3.5.2.2.10 *Aforador Palmer-Bowlus Para Medición en Sistemas de Alcantarillado*

Una de las principales aplicaciones del aforador Palmer-Bowlus para canales de sección semicircular es la medición de caudales en bocas de registro de sistemas de alcantarillado, donde los cojinetes de la boca de registro conforman el canal.

FOTOGRAFÍA 3.13**AFORADOR PALMER-BOWLUS PREFABRICADO**

FUENTE: PLASTI-FAB INC.

En la Fotografía 3.13 se observa un modelo comercial del aforador Palmer-Bowlus para este tipo de instalación, construido generalmente en acero inoxidable o PRFV (Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio).

El aforador prefabricado presenta la ventaja de poder ser instalado en diversos puntos de una red de alcantarillado que posean conductos del mismo diámetro. Si lo que se requiere es la medición de un punto fijo, también puede construirse el aforador como parte integral de la boca de registro del sistema de alcantarillado.

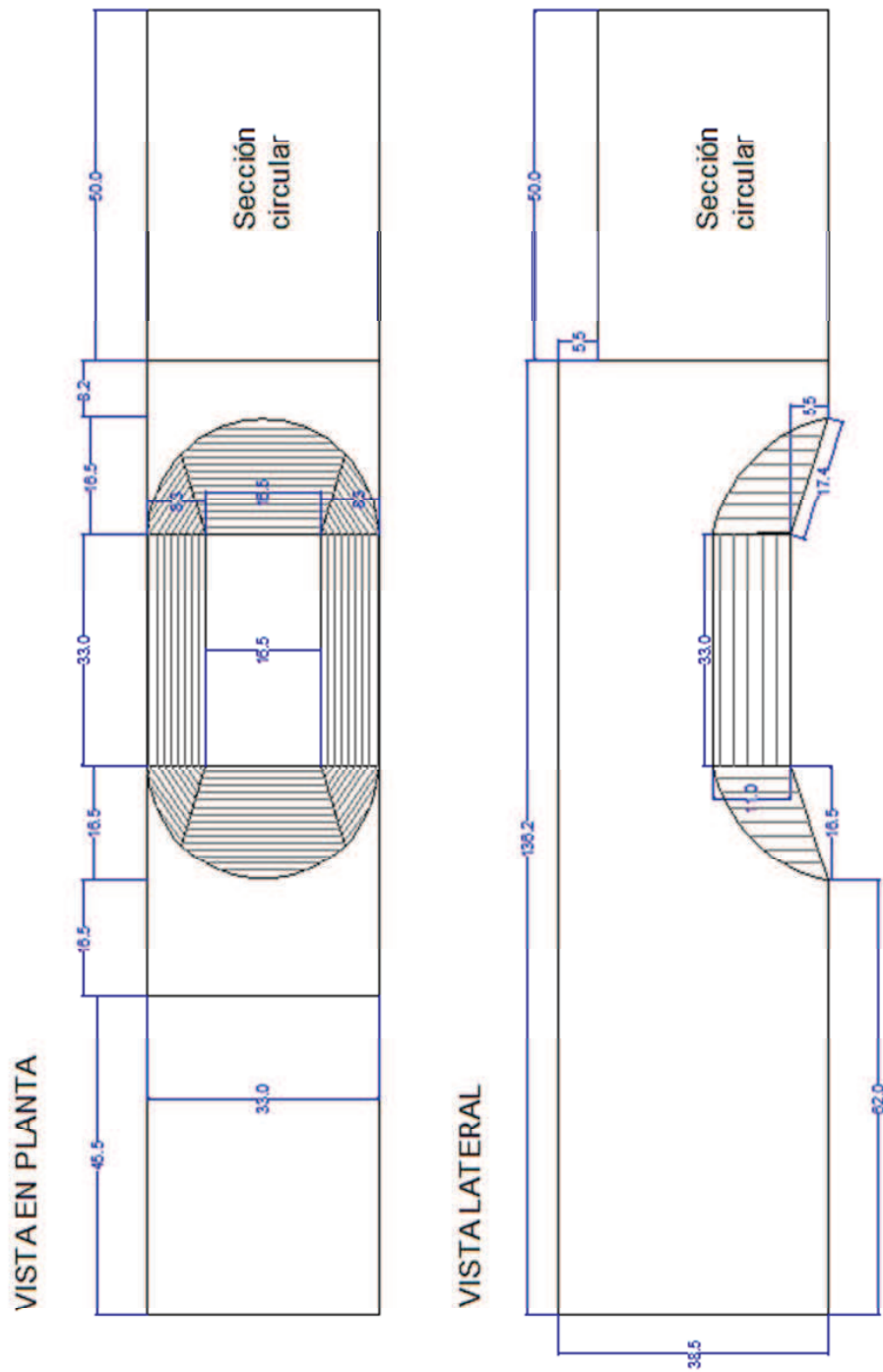
3.5.2.2.11 Modelo Canal Palmer-Bowlus 33 cm

Se construyó el Modelo del Canal Palmer-Bowlus con diámetro de 33 cm, la sección transversal de la garganta es de tipo trapecial Figura 3.11 a) y el fondo del canal es sobreelevado Figura 3.11 a). Este canal puede medir un caudal mínimo de 1.5 l/s y un caudal máximo de 54 l/s.

La medición de caudal y calado se realizará con un sensor ultrasónico de marca Greyline y modelo OCF 4.0

FIGURA 3.15

DIMENSIONES EN cm DEL MODELO CANAL PALMER-BOWLUS INSTALADO EN EL LABORATORIO.



3.5.2.2.11.1 Cálculo de la Curva de Calibración del Modelo Canal Palmer-Bowlus $q = f(h_o)$

CUADRO 3.15

PLANILLA PARA EL CÁLCULO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN

TRAMO GARGANTA				TRAMO AGUAS ARRIBA DE LA GARGANTA (SECCION DE MEDICION)							OBSERVACIONES	
PARAMETROS EN FUNCION DEL VALOR h_o (m) ADOPTADO				PARAMETROS EN FUNCION DEL VALOR h_o (m) OBTENIDO POR ITERACION								
Tirante Líquido Crítico h_o (m)	Ancho Superficial B_o (m)	Sección Líquida A_o (m ²)	Energía Específica E_o (m)	Caudal Q (m ³ /s)	Tirante Líquido h_o (m)	Cos $(\theta/2)$	Angulo al centro al centro θ (°)	Angulo al centro θ (rad)	Sección Líquida A_o (m ²)	Energía Específica E_o (m)		ΔE (m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
0,017	0,184	0,003	0,079	0,001	0,079	0,521	117,225	2,046	0,016	0,079	0,000	
0,033	0,203	0,006	0,103	0,003	0,102	0,383	135,005	2,356	0,022	0,103	0,000	$h_o < D/2$
0,060	0,222	0,010	0,126	0,006	0,124	0,250	151,061	2,637	0,029	0,126	0,000	
0,066	0,241	0,013	0,149	0,010	0,145	0,121	166,070	2,898	0,036	0,149	0,000	
0,083	0,260	0,018	0,171	0,014	0,166	0,000	180,000	3,142	0,043	0,171	0,000	$h_o = D/2$
0,099	0,279	0,022	0,193	0,019	0,186				0,050	0,193	0,000	
0,116	0,298	0,027	0,215	0,025	0,205				0,056	0,215	0,000	
0,132	0,317	0,032	0,237	0,032	0,224				0,062	0,237	0,000	
0,141	0,330	0,035	0,249	0,035	0,234				0,065	0,249	0,000	
0,149	0,330	0,037	0,260	0,039	0,243				0,069	0,260	0,000	
0,165	0,330	0,043	0,284	0,048	0,264				0,075	0,284	0,000	
0,182	0,330	0,048	0,309	0,057	0,284				0,082	0,309	0,000	
0,198	0,330	0,053	0,334	0,067	0,305				0,089	0,334	0,000	$D/2 < h_o < D$

El Cuadro 3.15 muestra una planilla típica para calcular los valores del caudal Q (m^3/s) que escurre a través del aforador para el tirante h_o (m) en la sección de medición.

Se detalla a continuación el cálculo de la función $Q = f(h_o)$ que define a la curva de calibración del aforador Palmer-Bowlus. Esta curva permite determinar el caudal (m^3/s) que pasa por el aforador midiendo el calado o tirante h_o (m) en la sección de medición.

- Columna 1

h_c : tirante líquido crítico (m) sobre el fondo plano horizontal de la garganta estrechada y sobreelevada, de sección transversal trapecial – rectangular. Para la determinación de la curva de calibración se parte de este parámetro, asignándole valores con un intervalo determinado (de 0,165 m en nuestro caso).

- Columna 2

$$B_c = \frac{2h_c}{i_T} + b \quad (3.67)$$

B_c : Ancho de la superficie líquida en la sección transversal crítica.

Para $h_c < H$; $H = 0,165$ m (sección trapecial cuya altura es 0,165 m) es:

$$B_c = \frac{2h_c}{2} + b$$

$$B_c = h_c + 0,165$$

Para $h_c = H$; $H = 0,165$ m es:

$B_c = B$ (límite superior de la sección trapecial).

Para $h_c > H$ (sección trapecial rectangular):

$B_c = B = 0,33$ m, valor constante.

- Columna 3

A_c : Sección transversal líquida crítica (m^2) para el tirante crítico h_c de la columna 1 y el ancho superficial B_c (m) de la columna 2.

$$A_c = b.h_c + \frac{h_c^2}{i_T} \quad (3.68)$$

$$A_c = 0,165.h_c + \frac{h_c^2}{2} \quad \text{Para } h_c < H; H = 0,165 \text{ m (sección trapecial)}$$

$$A_c = 0,165.h_c + \frac{H^2}{2} \quad A_c = 0,04083 \text{ m}^2, \text{ para } h_c = H = 0,165 \text{ m (sección trapecial – rectangular)}$$

$$A_c = b.h_c + \frac{2.h_c.H}{i_T} - \frac{H^2}{i_T} \quad (3.69)$$

$$A_c = 0,165.h_c + \frac{2 * 0,165.h_c}{2} - \frac{0,165^2}{2}$$

$$A_c = 0,33 * h_c - 0,01361 \quad \text{Para } h_c > H; H = 0,165 \text{ m (suma de la sección trapecial completa y la rectangular superior.)}$$

El valor de A_c para $h_c > H$ puede obtenerse también como la suma de la sección transversal trapecial más la rectangular función de h_c , es decir:

$$A_c = \frac{(B+b).H}{2} + (h_c - H).B$$

$$A_c = B.h_c - \frac{(B-b).H}{2}$$

$$A_c = 0,33h_c - \frac{(0,33 - 0,165) * 0,165}{2}$$

$$A_c = 0,33h_c - 0,01361$$

- Columna 4

E_c' : energía hidráulica específica (m) respecto al nivel correspondiente al invertido común del conducto circular y del cojinete semicircular.

Se demuestra a continuación que en un canal de sección transversal crítica cualquiera (como el de la garganta) la energía específica respecto del fondo del canal (en este caso del nivel de sobreelevación a de la garganta), vale:

$$E_c = h_c + \frac{V_c^2}{2g} \quad (3.70)$$

$$E_c = h_c + \frac{\frac{Q^2 \cdot A_c}{A_c^3}}{2g}$$

$$E_c = h_c + \frac{\frac{Q^2 \cdot B_c \cdot H_c}{A_c^3}}{2g}$$

$$E_c = h_c + \frac{Q^2 B_c h_c}{\left(\frac{g}{A_c^3}\right) * \left(\frac{h_c}{2}\right)}$$

Dado que el Número de Froude en la sección crítica vale:

$$N_r = \frac{Q^2 B_c}{g \cdot A_c^3} = 1 \quad (3.71)$$

y que $h_c = \frac{A_c}{B_c}$, resulta:

$$E_c = h_c + \frac{h_c}{2} \quad (3.72)$$

$$E_c = h_c + \frac{A_c}{2B_c}$$

$$E_c = h_c + 0,5 \frac{A_c}{B_c}$$

La energía específica respecto del invertido del cojinete (y del conducto) vale:

$$E_c' = E_c + a \quad (3.73)$$

$$E_c' = h_c + 0,5 \frac{A_c}{B_c} + a$$

Donde “a” es la sobreelevación de la garganta respecto del invertido del cojinete (y del conducto) y A_c y B_c los valores de las columnas 3 y 2, respectivamente.

- Columna 5

$$Q = \frac{g^{1/2} \cdot A_c^{3/2}}{B_c^{1/2}} \quad (3.74)$$

Q: Caudal (m^3/s) que escurre por la sección de la garganta de área líquida A_c (m^2) indicada en la columna 3 y de ancho B_c (m) indicado en la columna 2, siendo g (m/s^2) la aceleración de la gravedad.

- Columna 6

h_o : tirante líquido (m) en la sección transversal de medición, función de h_c (columna 1) y del caudal Q (columna 5).

Se obtiene iterando hasta obtener E_o (columna 11) = E_c (columna 4).

- Columna 7

$\cos(\theta/2) = 1 - 4 \cdot h_o$: coseno de la mitad del ángulo al centro comprendido entre los dos radios que subtienden la superficie líquida de ancho B_o (m) correspondiente al tirante líquido h_o (m) de la columna 6, para cada h_c de la columna 1.

- Columna 8

θ° : ángulo al centro, definido en el párrafo anterior, expresado en grados sexagesimales, obtenido como el doble del ángulo correspondiente al coseno de valor $(1 - 4 \cdot h_o)$, calculado en la columna 7.

- Columna 9

$$\theta = \frac{\pi \cdot \theta^\circ}{180} = 0,0174532 \cdot \theta^\circ \quad (3.75)$$

Arco, expresado en radianes, correspondiente al ángulo θ° de la columna 7. Cuando $h_o > D/2$; $h_o = 0,165$ m, no se calculan las columnas 7, 8 y 9, ya que en este caso la sección es rectangular en su parte superior.

- Columna 10

A_o : Sección transversal líquida, (m^2), en la sección de medición.

$$A_o = \frac{D^2 \cdot (\theta - \text{sen} \theta^\circ)}{8} \quad (3.76)$$

$A_o = 0,165 \cdot (\theta - \text{sen} \theta^\circ)$: Para $h_o < D/2$; $D/2 = 0,165$ m, de la columna 6

Siendo: $A_o = \frac{0,33^2 \cdot (\pi - \text{sen} 180^\circ)}{8}$

$A_o = 0,04277$ m^2 : sección transversal líquida, para $h_o = D/2 = 0,165$ m (sección semicircular de $\theta^\circ = 180$).

$$A_o = \frac{D^2 \cdot (\pi - \text{sen}180^\circ)}{8} + D \cdot (h_o - D/2) \quad (3.77)$$

$$A_o = 0,04277 + 0,33 \cdot h_o - 0,0545$$

$A_o = 0,33h_o - 0,01173 \text{ (m}^2\text{)}$ para $h_o > D/2$; $D/2 = 0,165 \text{ m}$ (suma de las secciones completas del semicírculo y rectangular superior.)

- Columna 11

$$E_o = h_o + \frac{Q^2}{2g A_o^2} \quad (3.78)$$

E_o : Energía hidráulica específica (m), en la sección de medición, respecto del nivel del invertido del cojinete (y del conducto) para el tirante h_o (m) de la Columna 6, Q (m^3/s) de la columna 5, A_o (m^2) de la columna 10 y $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. El valor de E_o se utiliza para la iteración, asignando distintos valores a h_o hasta obtener E_o (En la columna 11) = E_c' (de la columna 4).

- Columna 12

$$\Delta E = E_c' - E_o$$

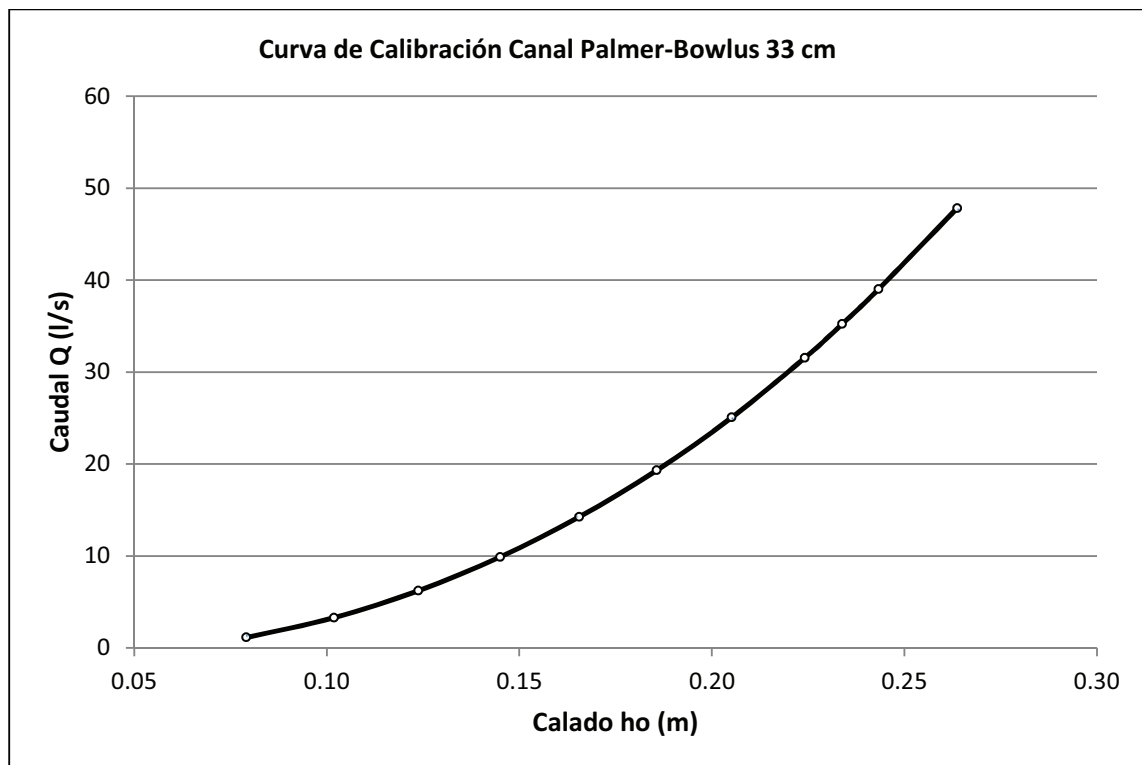
ΔE : Diferencia entre las energías hidráulicas específicas E_c' (Columna 4) y E_o (Columna 11) referidas al nivel del invertido del cojinete, coincidente con el del conducto.

Si $E_c' \neq E_o$, es decir, $\Delta E \neq 0$, significa que el valor de h_o adoptado no satisface la igualdad. Debe continuarse entonces la iteración asignando otros valores de h_o en la columna 6 y repitiendo el cálculo de los valores en las columnas 7 a 10, hasta satisfacer la igualdad $E_c' = E_o$.

3.5.2.2.11.2 Trazado de la Curva de Calibración

FIGURA 3.16

CURVA DE CALIBRACIÓN AFORADOR PALMER-BOWLUS



Por medio del procedimiento anteriormente descrito se obtiene un conjunto de pares de valores de h_o (m) y Q (m³/s), para cada valor de h_c (m) que, representados en un sistema de ejes cartesianos, definen puntos de la “curva de calibración”, $Q = f(h_o)$ que se observa en la Figura 3.16.

3.6 CONCLUSIONES

Se realiza el análisis dimensional de un problema cuando se conocen las variables que intervienen en el mismo y se desconoce la relación existente entre ellas; el análisis dimensional permite generalizar el fenómeno para diferentes tamaños de aforadores.

En los aforadores tipo Parshall y Palmer-Bowlus el procedimiento del análisis dimensional es similar, debido a que las variables físicas que intervienen en el proceso son el caudal, la gravedad y los parámetros geométricos principales; ya que el problema es similar bien se pudo realizar un solo análisis dimensional generalizando los dos aforadores y se obtendría el mismo resultados.

El tamaño de los modelos ubicados en el laboratorio de hidráulica, dependió mucho de las instalaciones y caudal con que contábamos; además del material para la construcción, la construcción de los modelos se hizo en acrílico, con este material es más sencillo construir secciones rectangulares; para la construcción del aforador Palmer-Bowlus se necesitó un molde, por ser de sección circular y semicircular, el laboratorio de hidráulica contaba con un molde de madera (laurel) de 33 cm de diámetro, por esta razón se construyó el Canal de Aforo Palmer-Bowlus de 33 cm, es más aconsejable tomar las dimensiones del aforador de tablas de dimensionamiento para cada tamaño de aforador, antes de la construcción comprobando caudales máximos, mínimos y la disposición del sitio de ubicación, para obtener mejores resultados, poder compararlos con los de las tablas y además facilitar la utilización del monitor de flujo Greyline OCF 4.0, ya que este trabaja con aforadores predeterminados, que son los que están en las tablas de dimensionamiento.

CAPÍTULO 4.

SÍNTESIS DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL

4.1 ANÁLISIS DE LAS RELACIONES FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA

4.1.1 ANÁLISIS DE LAS RELACIONES FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA, CANAL DE AFORO PARSHALL

CUADRO 4.1

FÓRMULAS FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA PARA
EL CANAL DE AFORO PARSHALL

Calado o tirante en el punto de medición			$Q = 0,003965H_a^{1,55}$ Q : (l/s) Ha: (mm)	$Q = 0,1771H_a^{1,55}$ Q : (m ³ /s) Ha: (m)	$Q = 0,0040345H_a^{1,5470}$ Q : (l/s) Ha: (mm)	
Ha(cm)	Ha(mm)	Ha(m)	Q (l/s)	Q (m ³ /s)	Q (l/s)	Q (l/s)
7,773	77,728	0,078	3,378	0,003	3,378	3,392
11,145	111,455	0,111	5,905	0,006	5,905	5,924
14,871	148,709	0,149	9,233	0,009	9,233	9,255
17,874	178,736	0,179	12,279	0,012	12,279	12,302
20,880	208,800	0,209	15,625	0,016	15,624	15,646
23,567	235,667	0,236	18,850	0,019	18,849	18,868
25,940	259,400	0,259	21,872	0,022	21,871	21,888
28,072	280,717	0,281	24,721	0,025	24,719	24,732
29,885	298,850	0,299	27,239	0,027	27,238	27,247
31,923	319,233	0,319	30,172	0,030	30,171	30,175
33,845	338,450	0,338	33,034	0,033	33,032	33,031
36,787	367,867	0,368	37,589	0,038	37,587	37,576
39,463	394,633	0,395	41,912	0,042	41,910	41,889

Las fórmulas propuestas en el Cuadro 4.1 fueron mencionadas anteriormente en el Capítulo 3 en los puntos 3.5.2.1.7.1 y 3.5.2.1.7.2., con sus respectivos autores y curvas de descarga. Podemos observar en el Cuadro 4.1 que los resultados obtenidos de caudal Q (l/s) calculados con las fórmulas propuestas por la literatura técnica para canales de aforo Parshall de garganta 7.62 cm dan resultados similares entre sí. El calado o tirante H_a (m) que se utilizó para encontrar el caudal Q (m³/s) con las fórmulas propuestas en la literatura técnica es el calado tomado experimentalmente, se tomó este calado con la finalidad de comparar resultados experimentales con los teóricos más adelante.

4.1.2 ANÁLISIS DE LAS RELACIONES FUNCIONALES PROPUESTAS EN LA LITERATURA TÉCNICA, CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS.

No existe literatura técnica del canal Palmer-Bowlus de diámetro 33 cm diseñado y montado en el laboratorio, debido a esto se encontró la curva de calibración teórica calculada en el Capítulo 3 en el punto 3.5.2.2.11.2 siguiendo el procedimiento expuesto en el Capítulo 3 en el punto 3.5.2.2.6 como se muestra en el punto 3.5.2.2.11.1, dio como resultado lo siguiente:

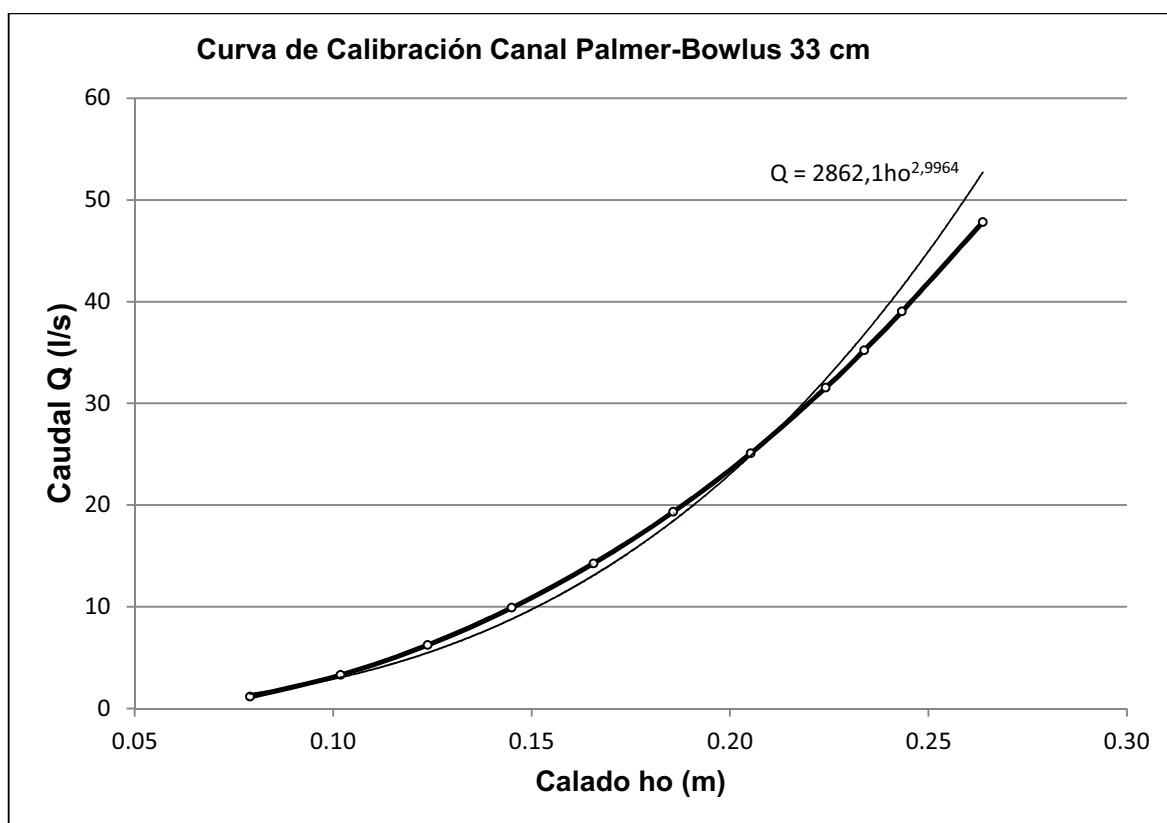
CUADRO 4.2

RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN DEL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm

Q (l/s)	h_o (m)
1,127	0,079
3,287	0,102
6,227	0,124
9,887	0,145
14,247	0,166
19,304	0,186
25,063	0,205
31,535	0,224
35,211	0,234
39,011	0,243
47,815	0,264
57,196	0,284
67,121	0,305

FIGURA 4.1

CURVA DE CALIBRACIÓN Y ECUACIÓN QUE REPRESENTA EL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm



Por lo tanto el canal de aforo Palmer-Bowlus de diámetro 33 cm se puede representar matemáticamente con la siguiente expresión:

$$Q = 2862,1h_0^{1,55} \quad (4.1)$$

Dónde:

h₀ (m): Calado o tirante en la sección de medición aguas arriba de la garganta,
y

Q (l/s): Caudal.

4.2 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN FUNCIONAL OBTENIDA DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL

Como resultado del análisis dimensional se obtuvieron ecuaciones que permiten determinar la relación funcional entre el caudal y calado para cualquier tamaño de aforador.

A continuación se presentan las relaciones funcionales obtenidas del análisis dimensional, al mismo tiempo que son comparadas con las relaciones funcionales teóricas.

- Canal Parshall 7,62 cm

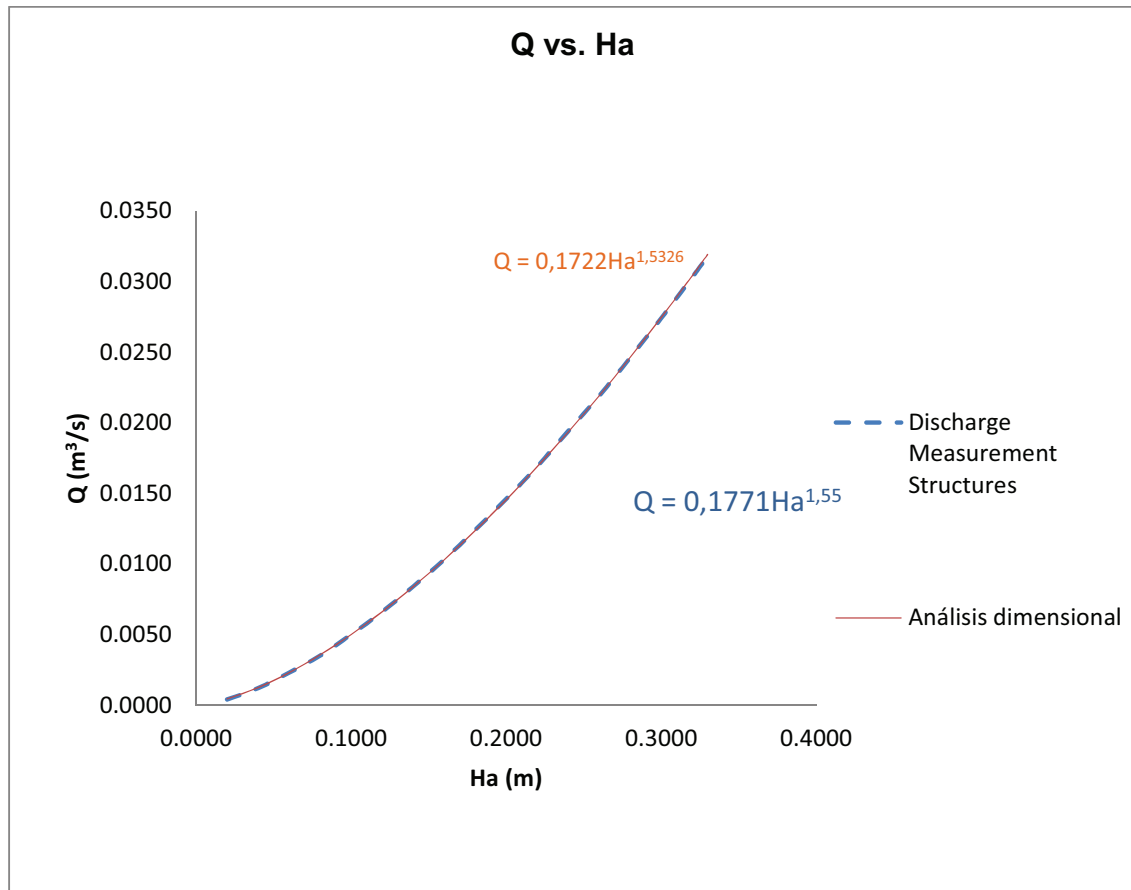
CUADRO 4.3

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL OBTENIDOS CON LOS DATOS TEÓRICOS CANAL DE AFORO PARSHALL 7.62 cm

Datos Teóricos		Resultados del Análisis Dimensional	
Ha (m)	Q (m ³ /s)	Cq	Q (m ³ /s)
0,0200	0,0004	2,4686	0,0004
0,0400	0,0012	1,2414	0,0012
0,0600	0,0023	0,8323	0,0023
0,0800	0,0035	0,6278	0,0036
0,1000	0,0050	0,5051	0,0050
0,1200	0,0066	0,4233	0,0066
0,1400	0,0084	0,3648	0,0084
0,1600	0,0103	0,3210	0,0103
0,1800	0,0124	0,2869	0,0124
0,2000	0,0146	0,2596	0,0145
0,2200	0,0169	0,2373	0,0169
0,2400	0,0194	0,2187	0,0193
0,2600	0,0219	0,2030	0,0219
0,2800	0,0246	0,1895	0,0246
0,3000	0,0274	0,1778	0,0275
0,3200	0,0303	0,1676	0,0304
0,3300	0,0318	0,1630	0,0319

FIGURA 4.2

COMPARACIÓN ENTRE LA RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA Y LA RELACIÓN FUNCIONAL OBTENIDA DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL CANAL PARSHALL



- **Canal Palmer-Bowlus 33 cm**

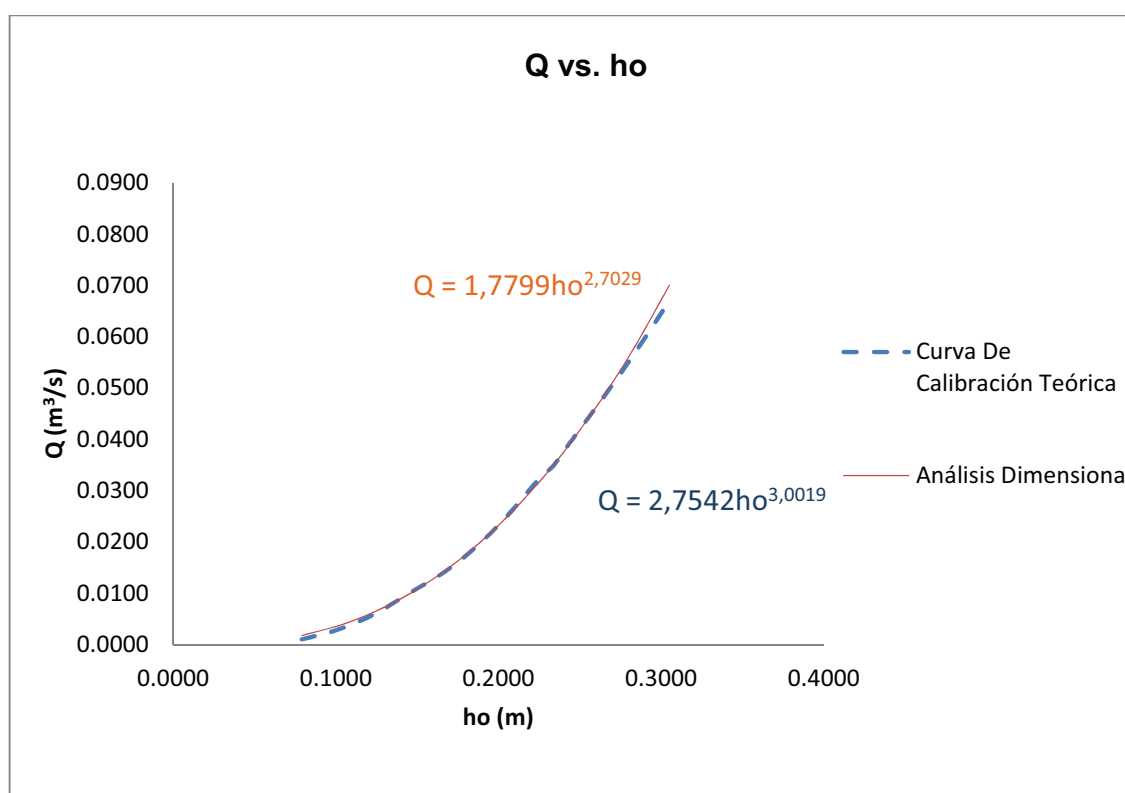
CUADRO 4.4

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL OBTENIDOS CON LOS DATOS TEÓRICOS CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm

Datos Teóricos		Resultados del Análisis Dimensional	
ho (m)	Q (m³/s)	Cq	Q (m³/s)
0,0790	0,0010	0,3248	0,0018
0,1020	0,0030	0,3585	0,0037
0,1240	0,0060	0,3790	0,0064
0,1450	0,0100	0,3928	0,0099
0,1660	0,0140	0,4031	0,0142
0,1860	0,0190	0,4108	0,0192
0,2050	0,0250	0,4167	0,0248
0,2240	0,0320	0,4216	0,0314
0,2340	0,0350	0,4238	0,0352
0,2430	0,0390	0,4257	0,0388
0,2640	0,0480	0,4296	0,0482
0,2840	0,0570	0,4327	0,0583
0,3050	0,0670	0,4356	0,0701

FIGURA 4.3

COMPARACIÓN ENTRE LA RELACIÓN FUNCIONAL TEÓRICA Y LA RELACIÓN FUNCIONAL OBTENIDA DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL CANAL PALMER-BOWLUS



4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES EN LOS MODELOS DEL LABORATORIO

Con la ayuda del Monitor de Flujo GREYLINE OCF 4.0 se tomaron varios datos de caudal y calado en el Canal de aforo Parshall y en el Canal de Aforo Palmer-Bowlus. Para poder realizar esto se tiene que seleccionar el tipo de aforador y el tamaño del mismo; si el aforador no está predeterminado se deberá introducir el valor de las constantes K y n que son las constantes de la curva de calibración de cada aforador.

- Calibración en el Canal de Aforo Parshall para realizar mediciones con el Monitor de Flujo GREYLINE OCF 4.0

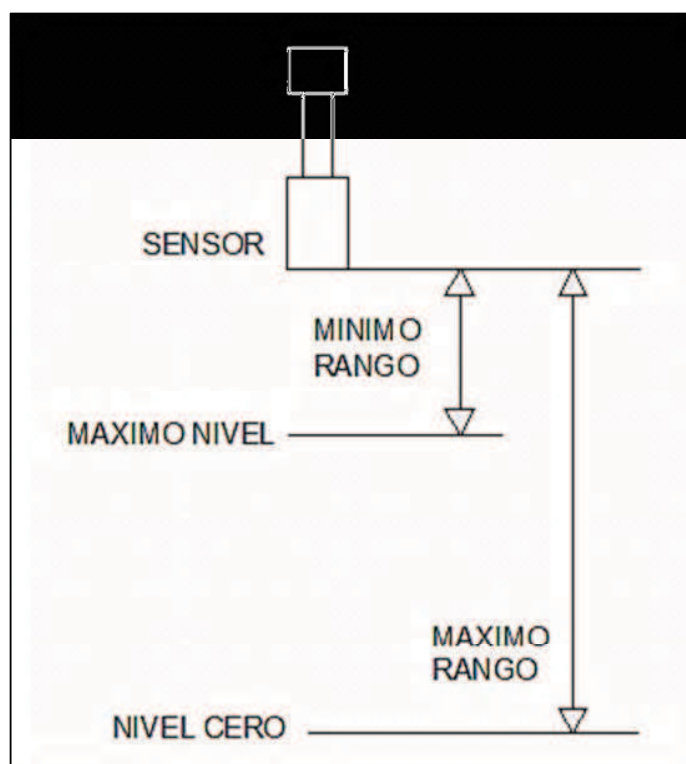
Se deberá seleccionar en el monitor de flujo el canal de aforo Parshall con un ancho de garganta de 7.62 cm (3"). Luego se introducirá manualmente los datos de rangos de operación del instrumento.

RANGO MÁXIMO PARSHALL = 81.29 cm

RANGO MÍNIMO PARSHALL = 40 cm

FIGURA 4.4

DISTANCIAS DE CALIBRACIÓN.



- Calibración en el Canal de Aforo Palmer-Bowlus para realizar mediciones con el Monitor de Flujo GREYLINE OCF 4.0

Ya que este aforador no está predeterminado en el instrumento se debe introducir las constantes K y n dadas por el programa FINDK&n.exe que viene junto con el monitor de flujo.

$$K = 2,5469$$

$$n = 2,6928$$

Luego de igual manera que en el Canal Parshall se introducirá los datos de rangos de operación del instrumento.

RANGO MÁXIMO PALMER-BOWLUS = 69.32 cm

RANGO MÍNIMO PALMER-BOWLUS = 40 cm

Se explica profundamente la utilización del Monitor de Flujo en el Anexo 2 (Manual de Instalación y Operación del Monitor de Flujo Para Canales Abiertos GREYLINE OCF 4.0).

4.3.1 RESULTADOS DE CAUDAL Y CALADO EXPERIMENTALES DEL CANAL DE AFORO PARSHALL Y DEL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS

Este experimento se realizó tomando datos de caudal y calado en los dos aforadores, en las secciones correspondientes a cada uno, sin variar el caudal y así poder comparar los resultados obteniendo lo siguiente:

CUADRO 4.5

CALADO Y CAUDAL OBTENIDO EXPERIMENTALMENTE EN LOS CANALES DE AFORO PARSHALL Y PALMER BOWLUS CON EL MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0. RESULTADOS DE CAUDAL Y CALADO OBTENIDOS CON EL VERTEDERO

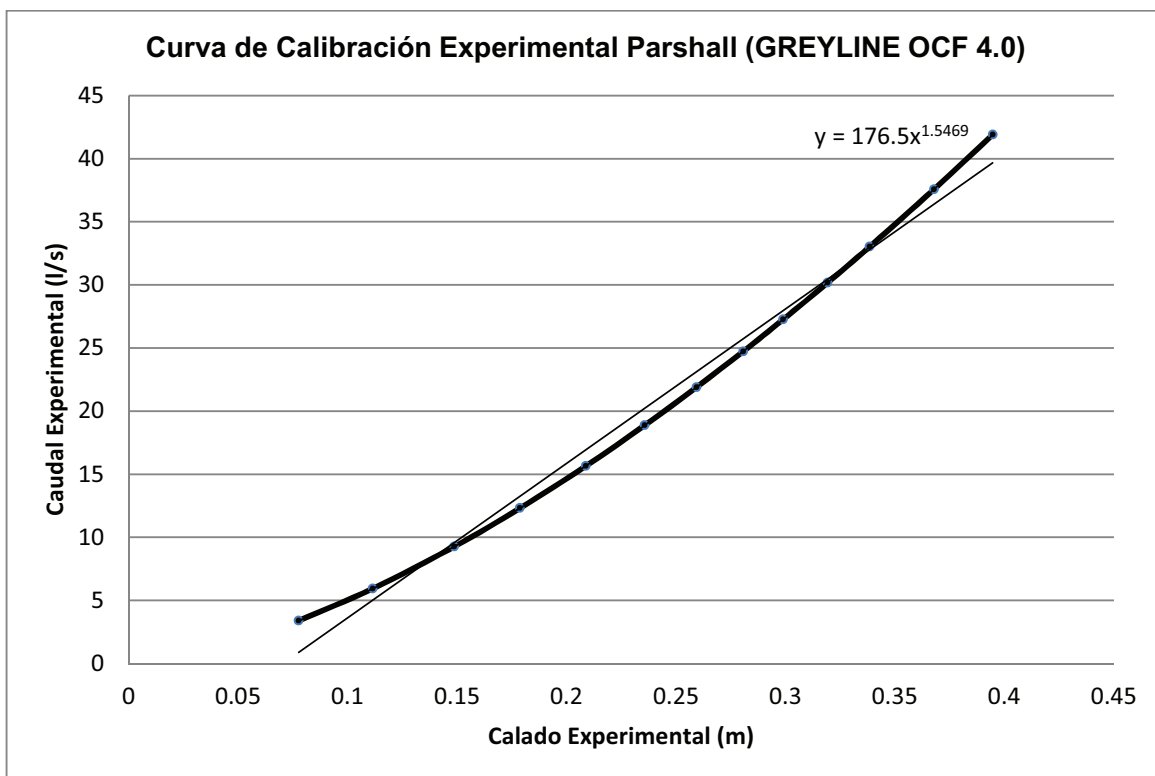
Canal Parshall		Canal Palmer-Bowlus		Vertedero	
h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
7,773	3,393	10,097	3,683	10,910	3,046
11,145	5,924	12,145	6,052	14,040	5,680
14,871	9,257	14,280	9,359	16,700	8,719
17,874	12,302	15,995	12,705	18,930	11,882
20,880	15,645	17,335	15,780	20,740	14,889
23,567	18,867	18,452	18,663	22,430	18,067
25,940	21,888	19,627	22,047	23,820	20,960
28,072	24,728	20,508	24,818	25,090	23,829
29,885	27,245	21,375	27,740	26,200	26,518
31,923	30,172	22,007	30,003	27,250	29,221
33,845	33,025	23,027	33,888	28,240	31,913
36,787	37,575	23,688	36,577	29,810	36,476
39,463	41,893	24,528	40,180	30,910	39,892

Se puede observar en el Cuadro 4.5 que los resultados de caudal en el Canal de Aforo Palmer-Bowlus son similares a los resultados de caudal en el canal de Aforo Parshall y estos a su vez son similares a los obtenidos en el Vertedero Rectangular 60°

4.3.1.1 Curva de Calibración Experimental con los Datos Obtenidos con el Monitor de Flujo Greyline OCF 4.0 en el Canal de Aforo Parshall

FIGURA 4.5

CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL (GREYLINE OCF 4.0) OBTENIDA CON LOS DATOS DEL CUADRO 4.5



$$Q = 176,5H_a^{1,5469} \quad (4.2)$$

Dónde:

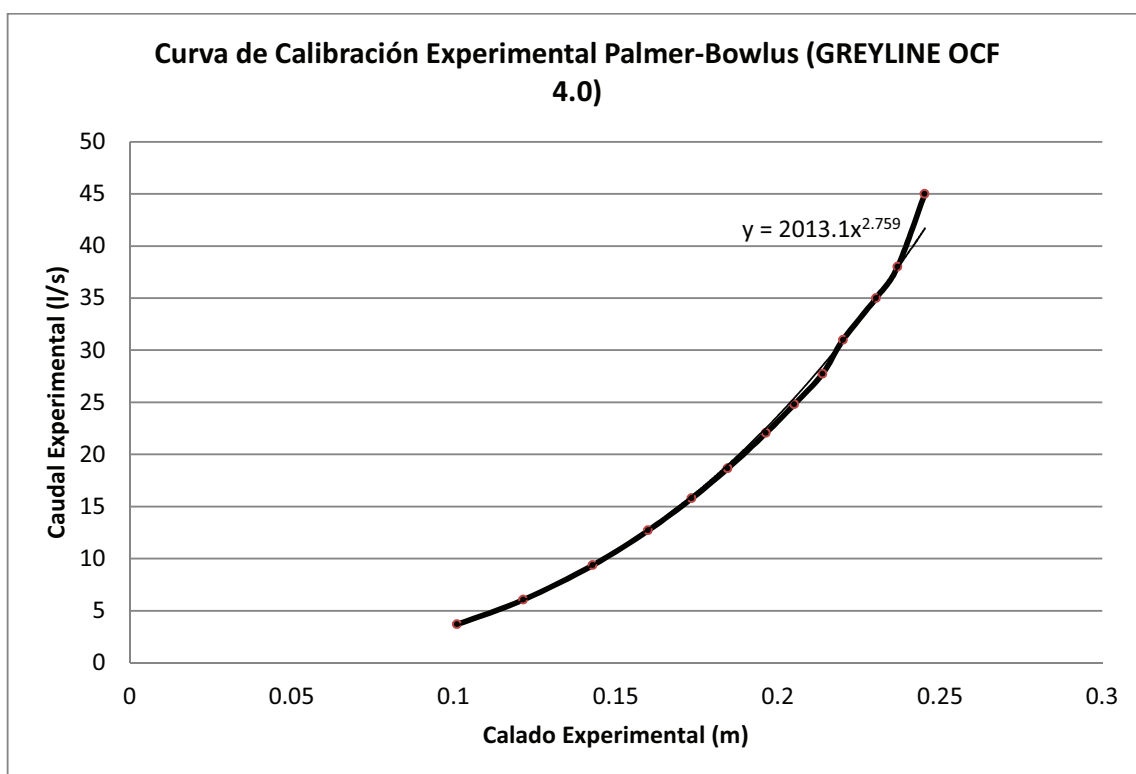
H_a (m): Calado Experimental (GREYLINE OCF 4.0) del Aforador Parshall, y

Q (l/s): Caudal Experimental (GREYLINE OCF 4.0).

4.3.1.2 Curva de Calibración Experimental con los Datos Obtenidos con el Monitor de Flujo Greyline OCF 4.0 en el Canal de Aforo Palmer-Bowlus

FIGURA 4.6

CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL (GREYLINE 4.0) OBTENIDA CON LOS DATOS DEL CUADRO 4.5



$$Q = 2013.1h_o^{2.759} \quad (4.3)$$

Dónde:

h_o (m): Calado Experimental (GREYLINE 4.0) del Aforador Palmer Bowlus, y

Q (l/s): Caudal Experimental (GREYLINE 4.0).

4.3.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE VARIACIÓN DEL CAUDAL EN UN TIEMPO DETERMINADO (T = 2 HORAS) TOMANDO DATOS CADA MINUTO.

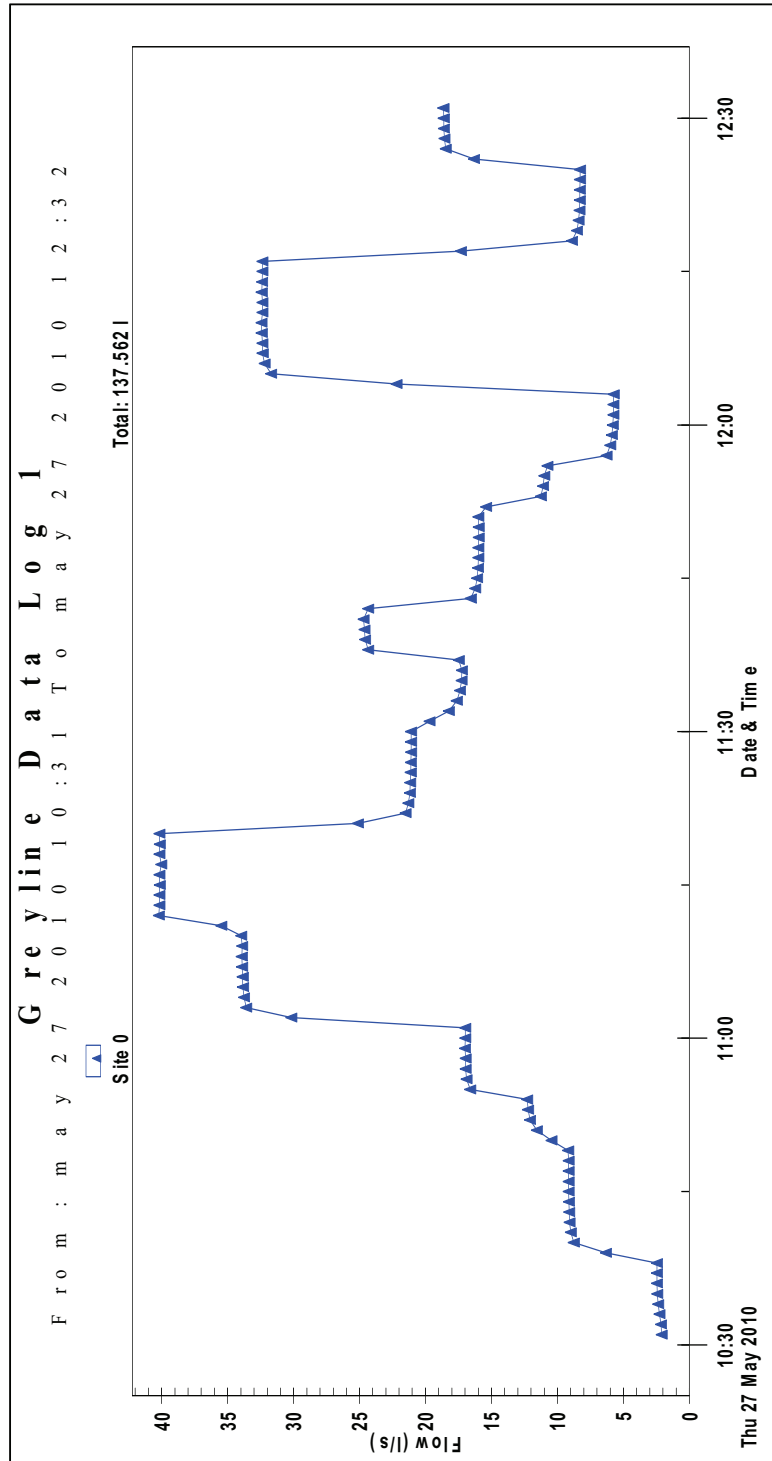
CUADRO 4.6

RESULTADOS OBTENIDOS DEL MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0

Greyline Datos de Registro 1		DE: Mayo 27 2010 10:31 a mayo 27 2010 12:32			
Fecha y Hora	Caudal (l/s)	Fecha y Hora	Caudal (l/s)	Fecha y Hora	Caudal (l/s)
27/05/2010 10:31	2,098	27/05/2010 11:12	40,218	27/05/2010 11:08	33,929
27/05/2010 10:32	2,135	27/05/2010 11:13	40,177	27/05/2010 11:09	33,897
27/05/2010 10:33	2,258	27/05/2010 11:14	40,157	27/05/2010 11:10	33,979
27/05/2010 10:34	2,353	27/05/2010 11:15	40,136	27/05/2010 11:11	35,476
27/05/2010 10:35	2,423	27/05/2010 11:16	40,157	27/05/2010 11:53	11,249
27/05/2010 10:36	2,46	27/05/2010 11:17	40,037	27/05/2010 11:54	11,077
27/05/2010 10:37	2,46	27/05/2010 11:18	40,157	27/05/2010 11:55	10,999
27/05/2010 10:38	2,464	27/05/2010 11:19	40,136	27/05/2010 11:56	10,756
27/05/2010 10:39	6,33	27/05/2010 11:20	40,169	27/05/2010 11:57	6,277
27/05/2010 10:40	8,765	27/05/2010 11:21	25,119	27/05/2010 11:58	5,997
27/05/2010 10:41	8,979	27/05/2010 11:22	21,516	27/05/2010 11:59	5,874
27/05/2010 10:42	9,078	27/05/2010 11:23	21,29	27/05/2010 12:00	5,8
27/05/2010 10:43	9,111	27/05/2010 11:24	21,187	27/05/2010 12:01	5,758
27/05/2010 10:44	9,131	27/05/2010 11:25	21,158	27/05/2010 12:02	5,75
27/05/2010 10:45	9,148	27/05/2010 11:26	21,117	27/05/2010 12:03	5,73
27/05/2010 10:46	9,139	27/05/2010 11:27	21,109	27/05/2010 12:04	22,207
27/05/2010 10:47	9,135	27/05/2010 11:28	21,088	27/05/2010 12:05	31,708
27/05/2010 10:48	9,144	27/05/2010 11:29	21,096	27/05/2010 12:06	32,198
27/05/2010 10:49	9,185	27/05/2010 11:30	21,096	27/05/2010 12:07	32,35
27/05/2010 10:50	10,439	27/05/2010 11:31	19,706	27/05/2010 12:08	32,366
27/05/2010 10:51	11,55	27/05/2010 11:32	18,246	27/05/2010 12:09	32,42
27/05/2010 10:52	12,076	27/05/2010 11:33	17,629	27/05/2010 12:10	32,428
27/05/2010 10:53	12,228	27/05/2010 11:34	17,386	27/05/2010 12:11	32,366
27/05/2010 10:54	12,298	27/05/2010 11:35	17,267	27/05/2010 12:12	32,358
27/05/2010 10:55	16,617	27/05/2010 11:36	17,238	27/05/2010 12:13	32,42
27/05/2010 10:56	16,876	27/05/2010 11:37	17,469	27/05/2010 12:14	32,387
27/05/2010 10:57	16,959	27/05/2010 11:38	24,329	27/05/2010 12:15	32,366
27/05/2010 10:58	16,967	27/05/2010 11:39	24,576	27/05/2010 12:16	32,366
27/05/2010 10:59	17,00	27/05/2010 11:40	24,63	27/05/2010 12:17	17,308
27/05/2010 11:00	16,987	27/05/2010 11:41	24,687	27/05/2010 12:18	8,897
27/05/2010 11:01	16,987	27/05/2010 11:42	24,329	27/05/2010 12:19	8,518
27/05/2010 11:02	30,178	27/05/2010 11:43	16,576	27/05/2010 12:20	8,399
27/05/2010 11:03	33,58	27/05/2010 11:44	16,239	27/05/2010 12:21	8,337
27/05/2010 11:04	33,748	27/05/2010 11:45	16,087	27/05/2010 12:22	8,309
27/05/2010 11:05	33,839	27/05/2010 11:46	16,017	27/05/2010 12:23	8,296
27/05/2010 11:06	33,859	27/05/2010 11:47	15,988	27/05/2010 12:24	8,292
27/05/2010 11:07	33,909	27/05/2010 11:48	15,988	27/05/2010 12:25	8,288

FIGURA 4.7

REGISTRO DE DATOS DEL MONITOR DE FLUJO GREYLINE OCF 4.0 ENTRE LAS 10H31 Y LAS 12H25



4.3.3 ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE CARGA EN LOS AFORADORES PARSHALL Y PALMER-BOWLUS.

Para encontrar las pérdidas de carga de cada aforador, se tomaron medidas de calado en dos secciones, a la entrada y salida de cada aforador. Las mediciones se realizaron con limnímetros para determinar el calado, además, se utilizó el monitor de flujo para encontrar el caudal. Posteriormente se realizaron los cálculos respectivos para encontrar las pérdidas de energía.

CUADRO 4.7

CALADOS Y CAUDAL MEDIDO EN LOS AFORADORES, PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDA DE ENERGÍA

CANAL PARSALL		CANAL PALMER-BOWLUS		Q (m ³ /s)	Q (l/s)
y1 (m)	y2 (m)	y1 (m)	y2 (m)		
0.1252	0.0254	0.1269	0.0346	0.0071	7.0714
0.1707	0.0366	0.1456	0.0468	0.0114	11.4335
0.2129	0.0461	0.1713	0.0611	0.0161	16.1024
0.2483	0.0541	0.1892	0.0740	0.0204	20.4377
0.2797	0.0638	0.2029	0.0825	0.0246	24.5806
0.3186	0.0777	0.2167	0.0939	0.0301	30.0780

CUADRO 4.8

PÉRDIDAS DE ENERGÍA CALCULADAS EN LOS AFORADORES.

CAUDAL Q (l/s)	CANAL PARSHALL			CANAL PALMER-BOWLUS		
	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)	E1 (m)	E2 (m)	ΔE (m)
7.0714	0.1306	0.1251	0.0055	0.1297	0.0965	0.0331
11.4335	0.1783	0.1686	0.0097	0.1506	0.1280	0.0227
16.1024	0.2226	0.2174	0.0052	0.1779	0.1423	0.0356
20.4377	0.2598	0.2587	0.0011	0.1975	0.1676	0.0299
24.5806	0.2928	0.2776	0.0152	0.2130	0.1826	0.0303
30.0780	0.3337	0.3188	0.0150	0.2296	0.1986	0.0310
	Promedio		0.0086	Promedio		0.0304

4.4 SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

Para realizar el análisis experimental en los modelos de laboratorio tomaremos como base el caudal obtenido con el vertedero triangular 60° que se ubica aguas arriba del Canal de Aforo Parshall, para esto utilizaremos la siguiente fórmula para vertederos triangulares con un ángulo de abertura de 60°:

$$Q = 0,7725h^{2,47} \quad (4.4) \text{ (Mr.V.M. CONE, 1916)}$$

Dónde:

h (m): Carga sobre el Vertedero, y

Q (m³/s): Caudal.

4.4.1 SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES EN EL MODELO CANAL PARSHALL 7.62 cm DEL LABORATORIO

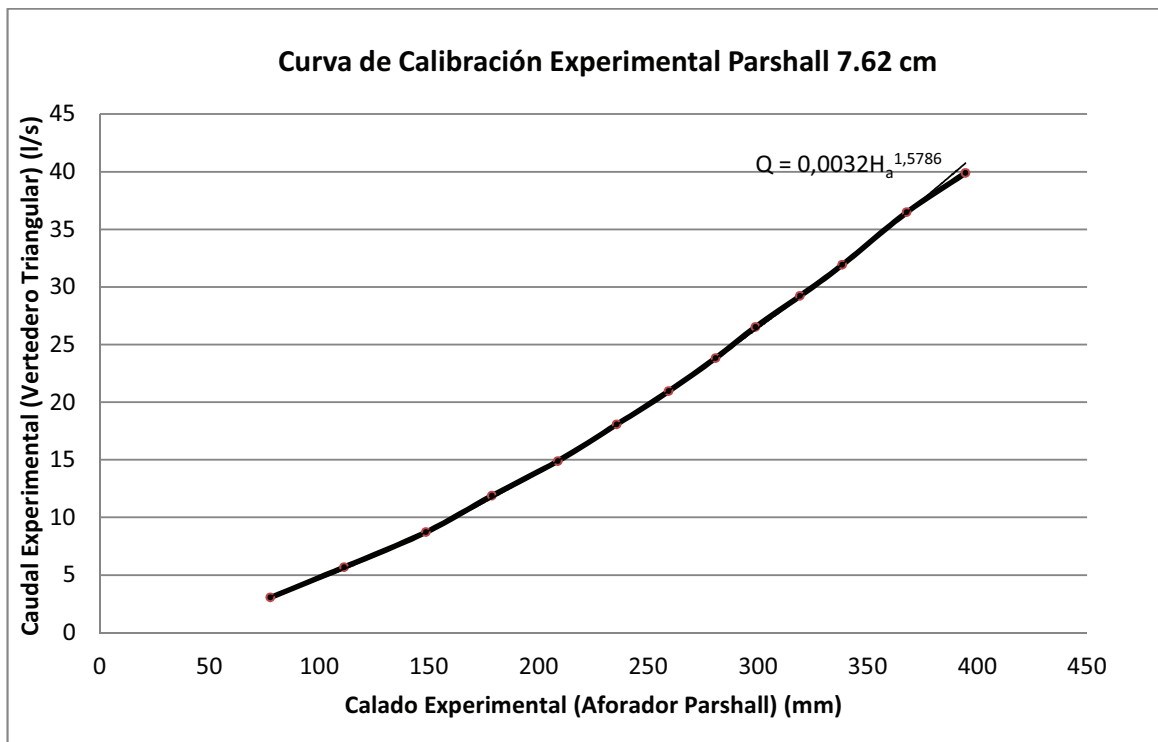
CUADRO 4.9

CALADO OBTENIDO EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PARSHALL 7.62 cm Y CAUDAL CALCULADO CON LA EC. 4.4 DEL VERTEDERO TRIANGULAR 60°

Calado Canal Parshall 7.62 cm			Caudal Vertedero Triangular 60°	
h(cm)	h(m)	h(mm)	Q(m ³ /s)	Q(l/s)
7,7728	0,0777	77,7282	0,0030	3,0462
11,1455	0,1115	111,4545	0,0057	5,6798
14,8709	0,1487	148,7091	0,0087	8,7186
17,8736	0,1787	178,7364	0,0119	11,8823
20,8800	0,2088	208,8000	0,0149	14,8887
23,5667	0,2357	235,6667	0,0181	18,0670
25,9400	0,2594	259,4000	0,0210	20,9597
28,0717	0,2807	280,7167	0,0238	23,8289
29,8850	0,2989	298,8500	0,0265	26,5181
31,9233	0,3192	319,2333	0,0292	29,2209
33,8450	0,3385	338,4500	0,0319	31,9135
36,7867	0,3679	367,8667	0,0365	36,4764
39,4633	0,3946	394,6333	0,0399	39,8917

FIGURA 4.8

CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL (H_A EN mm) OBTENIDA CON LOS VALORES DEL CUADRO 4.7



Por lo tanto el Canal de Aforo Parshall 7.62 cm se puede representar experimentalmente con la siguiente expresión:

$$Q = 0,0032H_a^{1,5786} \quad (4.5)$$

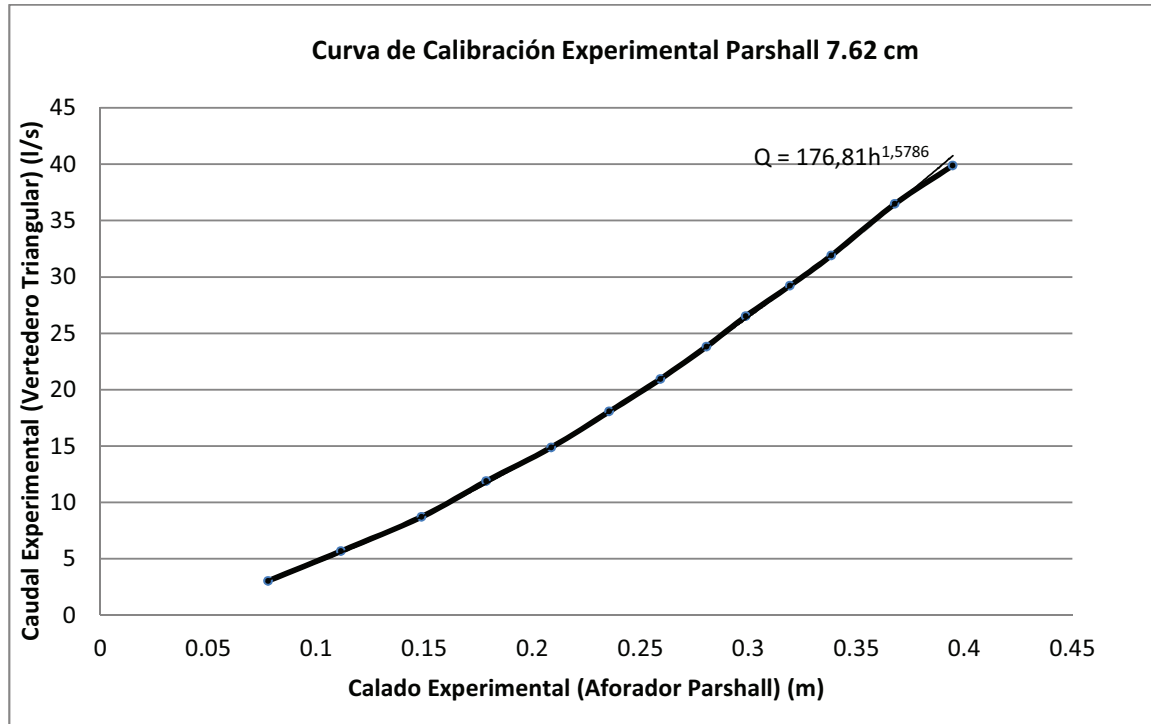
Dónde:

H_a (mm): Calado Experimental del Aforador Parshall

Q (l/s): Caudal

FIGURA 4.9

CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL (H_a en m) OBTENIDA CON LOS VALORES DEL CUADRO 4.7



Por lo tanto el Canal de Aforo Parshall 7.62 cm se puede representar experimentalmente con la siguiente expresión:

$$Q = 176,81H_a^{1,5786} \quad (4.6)$$

Dónde:

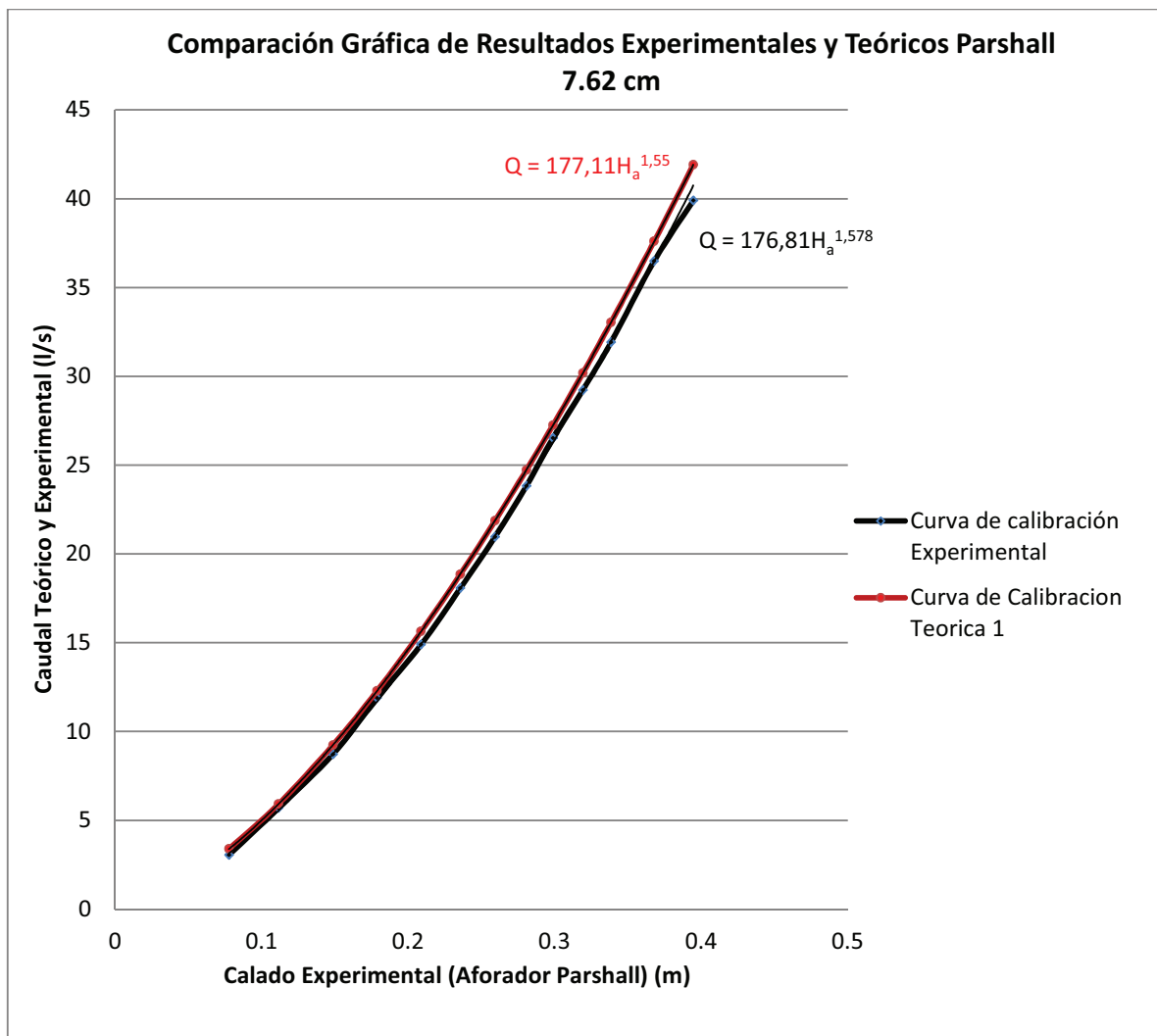
H_a (m): Calado Experimental del Aforador Parshall, y

Q (l/s): Caudal.

Si comparamos la Ec. 4.6 con las ecuaciones teóricas del Capítulo 3 en los puntos 3.5.2.1.7.1 y 3.5.2.1.7.2, nos damos cuenta que los valores de las constantes obtenidos experimentalmente son similares a los teóricos.

FIGURA 4.10

COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS CANAL DE AFORO PARSHALL 7.62 cm



4.4.2 SÍNTESIS DEL PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES EN EL MODELO CANAL PALMER-BOWLUS 33 cm DEL LABORATORIO

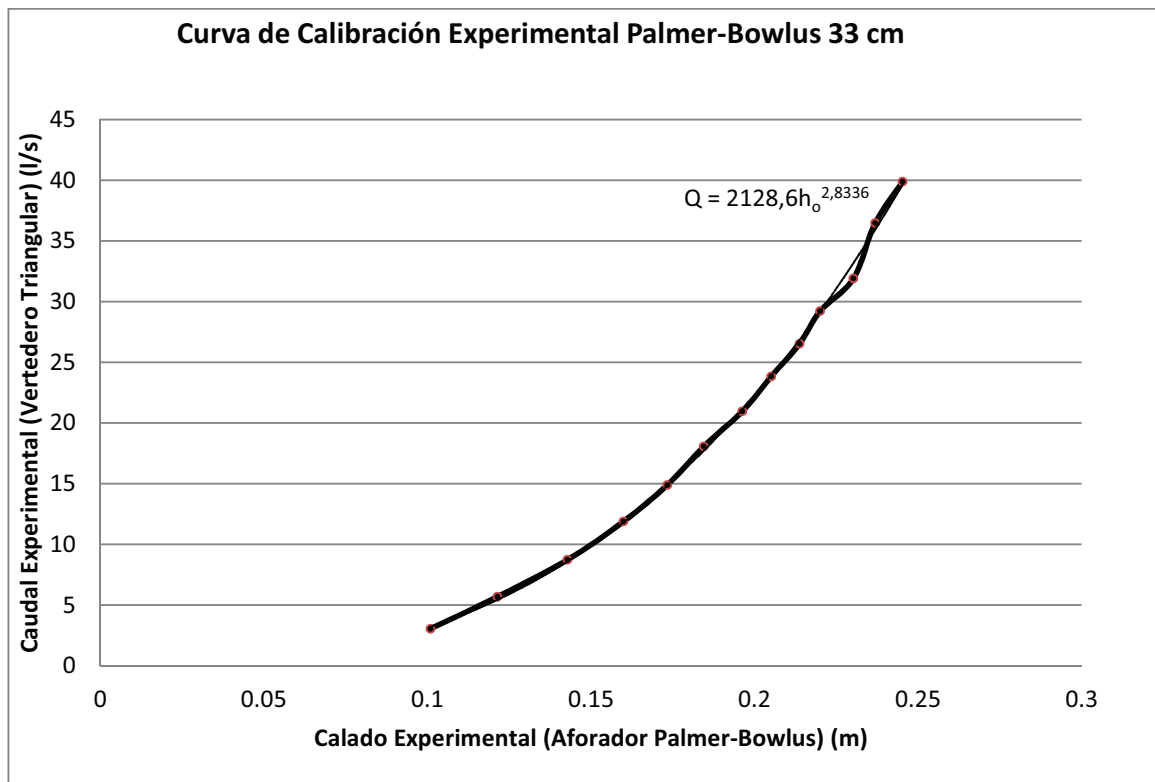
CUADRO 4.10

CALADO OBTENIDO EXPERIMENTALMENTE EN EL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS 33 cm Y CAUDAL CALCULADO CON LA Ec. 4.4 DEL VERTEDERO TRIANGULAR 60°

Calado Canal Palmer-Bowlus 33 cm			Caudal Vertedero Triangular 60°	
h(cm)	h(m)	h(mm)	Q(m ³ /s)	Q(l/s)
10,097	0,101	100,973	0,003	3,046
12,145	0,121	121,445	0,006	5,680
14,280	0,143	142,800	0,009	8,719
15,995	0,160	159,955	0,012	11,882
17,335	0,173	173,350	0,015	14,889
18,452	0,185	184,517	0,018	18,067
19,627	0,196	196,267	0,021	20,960
20,508	0,205	205,083	0,024	23,829
21,375	0,214	213,750	0,027	26,518
22,007	0,220	220,067	0,029	29,221
23,027	0,230	230,267	0,032	31,913
23,688	0,237	236,883	0,036	36,476
24,528	0,245	245,283	0,040	39,892

FIGURA 4.11

CURVA DE CALIBRACIÓN EXPERIMENTAL OBTENIDA CON LOS VALORES DEL CUADRO 4.8



Por lo tanto el Canal de Aforo Palmer Bowlus 33 cm se puede representar experimentalmente con la siguiente expresión:

$$Q = 2128,6h_o^{2,8336} \quad (4.7)$$

Dónde:

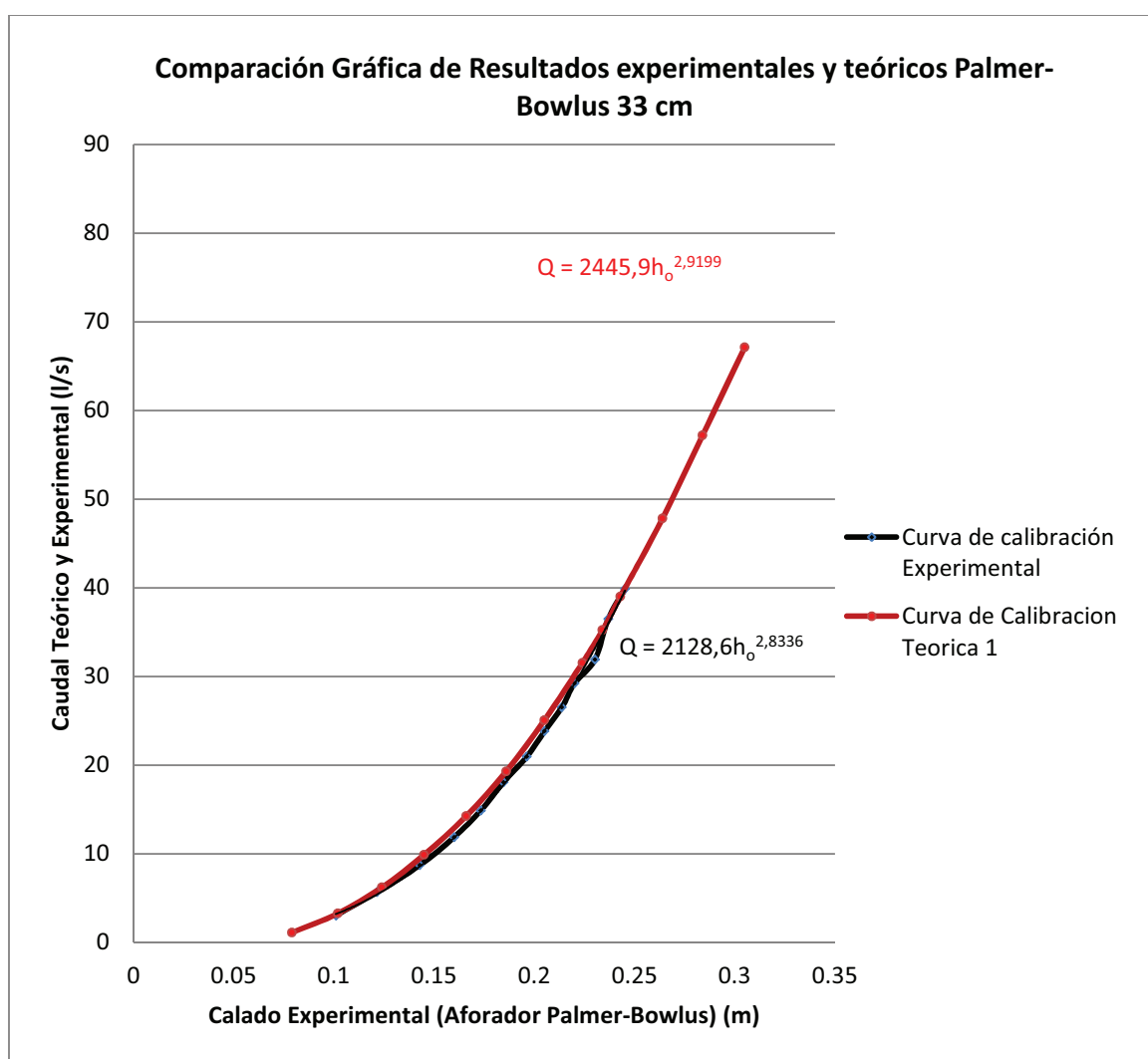
h_o (m): Calado Experimental del Aforador Palmer Bowlus, y

Q (l/s): Caudal.

Si comparamos la Ec 4.7 con la Ec 4.1 calculada en la con la curva de calibración en el punto 4.1.2 podemos decir que las constantes obtenidas experimentalmente son similares a las teóricas.

FIGURA 4.12

COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS



4.5 CONCLUSIONES

Como se muestra en el Cuadro 4.5 los datos tomados experimentalmente en cada uno de los aforadores sin variación de caudal son similares; lo que demuestra que son válidos para realizar mediciones y sus dimensiones son las correctas.

Se puede comprobar la fiabilidad del uso del análisis dimensional en modelos al comparar los resultados del mismo con los resultados teóricos por lo tanto podemos decir que análisis dimensional aplicado a modelos es una herramienta muy útil para encontrar los resultados en cualquier fenómeno y generalizarlos.

En la comparación gráfica de resultados experimentales y teóricos, se verifica el correcto funcionamiento de los modelos ya que los resultados experimentales se asemejan a los resultados teóricos.

El uso de un monitor de flujo para encontrar los datos experimentales, facilita, automatiza y entrega resultados más precisos, además utiliza ecuaciones de calibración para encontrar inmediatamente el caudal que atraviesa el aforador.

CAPÍTULO 5.

GUÍA PARA LA EJECUCIÓN DE LA PRÁCTICA DOCENTE EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

5.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FÍSICO

Las redes de alcantarillado tienen el objetivo primordial de evacuar el agua de las ciudades, sea esta proveniente de precipitaciones o residuos generados por la actividad humana. Las civilizaciones han construido estas redes con el propósito de evitar inundaciones y asegurar la higiene de sus ciudades.

El concepto en el que se ha basado la gestión y dimensionamiento de los sistemas de alcantarillado ha sido el de evacuar lo más rápido el agua residual, y alejarla lo más lejos posible de los asentamientos humanos utilizando la mayoría de veces el medio acuático como receptor.

En los últimos años, al producirse una migración masiva de la población rural hacia los asentamientos urbanos, las ciudades han tenido que realizar una gran inversión en nuevas infraestructuras, siendo una de ellas la red de alcantarillado. Sin embargo por ser la red de alcantarillado subterránea y tener un funcionamiento esporádico, hacen que esta sea una de las más olvidadas a nivel político debido a que la ciudadanía no percibe directamente su funcionamiento, siendo solamente los fallos de esta red lo que atraen el interés público.

Esta falta de preocupación ha provocado que la gestión y mantenimiento de esta infraestructura sea deficiente y algo primitiva. El desarrollo y crecimiento de la red ha estado ligado con el crecimiento urbano, obviando una planificación global del

sistema, resolviendo las insuficiencias de la red en forma puntual sin realizar una gestión moderna que permita conocer las causas y efectos de los problemas que se presentan al urbanizar un territorio.

En el proceso urbanizador se pueden presentar los problemas de impermeabilización del suelo rural, reducción del tiempo de concentración de la cuenca o la modificación de la red natural de drenaje, lo que causa un aumento en el caudal máximo y en el volumen de escorrentía que transporta la red de alcantarillado, así como la reducción del tiempo en el que este se produce.

Por estas razones es importante el monitoreo de caudales que atraviesan las redes colectoras de desagüe cuando se trabaja en el mantenimiento y operación de las mismas, ya que nos da una visión inmediata de lo que está ocurriendo en el área de drenaje que está siendo estudiada.

Cuando se quiere cuantificar volúmenes de descargas en áreas de drenaje nuevas, es aplicable el aforo y monitoreo de colectores, para conocer por medición directa, los volúmenes de descarga en un período determinado.

5.2 CONDICIONES HIDRÁULICAS A LA ENTRADA Y A LA SALIDA PARA ESTAS ESTRUCTURAS

En los aforadores tipo Parshall y Palmer-Bowlus, el flujo de entrada debe tener un régimen subcrítico, es decir que el número de Froude debe ser menor a 1. En el régimen subcrítico, se tiene un flujo lento con bajas pendientes; características hidráulicas típicas en las redes de alcantarillado.

En estas estructuras la velocidad de llegada no debería ser menor a 0,3 m/s para garantizar que no exista el desarrollo de maleza y azolve. La velocidad de circulación a la entrada no debe ser superior a la raíz cuadrada de la aceleración de la gravedad, multiplicada por el nivel del agua.

Antes del aforador se debe tener un tramo recto y sin obstáculos para tener una uniformidad en la corriente. Es preciso tener un flujo laminar (caudal horizontal, agua estancada sin remolinos) y no deben existir obstrucciones en la boca de entrada ni en la salida del canal.

En la garganta de los aforadores tipo Parshall y Palmer-Bowlus, debido a la reducción de la sección, el régimen de flujo pasa a ser crítico y llega a ser supercrítico a la salida, con un número de Froude mayor a 1, velocidades altas y pequeños calados.

5.3 GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO DE UN MEDIDOR DE CAUDAL

5.3.1 CANAL DE AFORO PARSHALL

Los aforadores se desarrollan en varios tamaños. Se debe tener cuidado en construir los aforadores exactamente de acuerdo con las dimensiones estructurales para cada canal, ya que los aforadores no son modelos a escala hidráulicos uno para el otro. La longitud de la garganta y la pendiente abajo la garganta se mantiene constante para la serie de canales de flujo, mientras que otras dimensiones son variadas, cada canal es un dispositivo completamente diferente.

En base al ancho de la garganta, los aforadores Parshall han sido, un tanto arbitrariamente, clasificados en tres grupos principales para comodidad de discutirlos, la selección de tamaños y la determinación de las descargas.

Estos tres grupos son:

- Muy pequeños, para aforadores de 2.54 cm a 7.62 cm
- Pequeños, para aforadores de 15.54 cm a 2.43 m
- Grandes, para aforadores de 3.48 m hasta más de 15.24 m (USBR, 1971).

Para seleccionar el tamaño de aforador a utilizar, se debe conocer las condiciones de caudal y calado en las que va a funcionar. En las siguientes tablas se indican las características de descarga y dimensiones para diferentes tamaños de aforadores Parshall.

CUADRO 5.1

CARACTERÍSTICAS DE DESCARGA PARA AFORADORES PARSHALL

Garganta W (m)	Garganta W (cm)	Garganta W (plg,pies)	Rango de Descarga Q (m ³ /s x 10 ⁻³)		Ecuación de Descarga Q = KHa ⁿ Q(m ³ /s), h(m)	Rango de Carga (m)		Limite Modular Ha/Hb
			Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	
0,0254	2,54	1"	0.09	5.4	Q=0.0604Ha ^{1.55}	0.015	0.21	0.50
0,0508	5,08	2"	0.18	13.2	Q=0.1207Ha ^{1.55}	0.015	0.24	0.50
0,0762	7,62	3"	0.77	42	Q=0.1771 Ha ^{1.55}	0.03	0.40	0.50
0,1524	15,24	6"	1.50	111	Q=0.3812 Ha ^{1.58}	0.03	0.45	0.60
0,2286	22,86	9"	2.50	251	Q=0.5354 Ha ^{1.53}	0.03	0.61	0.60
0,3048	30,48	1'	3.32	457	Q=0.6909 Ha ^{1.522}	0.03	0.76	0.70
0,4572	45,72	1'6"	4.80	695	Q=1.056 Ha ^{1.538}	0.03	0.76	0.70
0,6096	60,96	2'	12.1	937	Q=1.428 Ha ^{1.55}	0.046	0.76	0.70
0,9144	91,44	3'	17.6	1427	Q=2.184h Ha ^{1.566}	0.046	0.76	0.70
1,2192	121,92	4'	35.8	1923	Q=2.953h Ha ^{1.578}	0.06	0.76	0.70
1,524	152,4	5'	44.1	2424	Q=3.732 Ha ^{1.587}	0.06	0.76	0.70
1,8288	182,88	6'	74.1	2929	Q=4.519 Ha ^{1.595}	0.076	0.76	0.70
2,1336	213,36	7'	85.8	3438	Q=5.312 Ha ^{1.601}	0.076	0.76	0.70
2,4384	243,84	8'	97.2	3949	Q=6.112 Ha ^{1.607}	0.076	0.76	0.70
			Q en (m ³ /s)					
3,048	304,8	10'	0.16	8.28	Q=7.463 Ha ^{1.60}	0.09	1.07	0.80
3,6576	365,76	12'	0.19	14.68	Q=8.859 Ha ^{1.60}	0.09	1.37	0.80
4,572	457,2	15'	0.23	25.02	Q=10.96 Ha ^{1.60}	0.09	1.67	0.80
6,096	609,6	20'	0.31	37.97	Q=14.45 Ha ^{1.60}	0.09	1.83	0.80
7,62	762	25'	0.38	47.14	Q=17.94 Ha ^{1.60}	0.09	1.83	0.80
9,144	914,4	30'	0.46	56.33	Q=21.44 Ha ^{1.60}	0.09	1.83	0.80
12,192	1219,2	40'	0.60	74.70	Q=28.43 Ha ^{1.60}	0.09	1.83	0.80
15,24	1524	50'	0.75	93.04	Q=35.41h Ha ^{1.60}	0.09	1.83	0.80

FUENTE: DISCHARGE MEASUREMENT STRUCTURES (M. G. BOS)

CUADRO 5.2

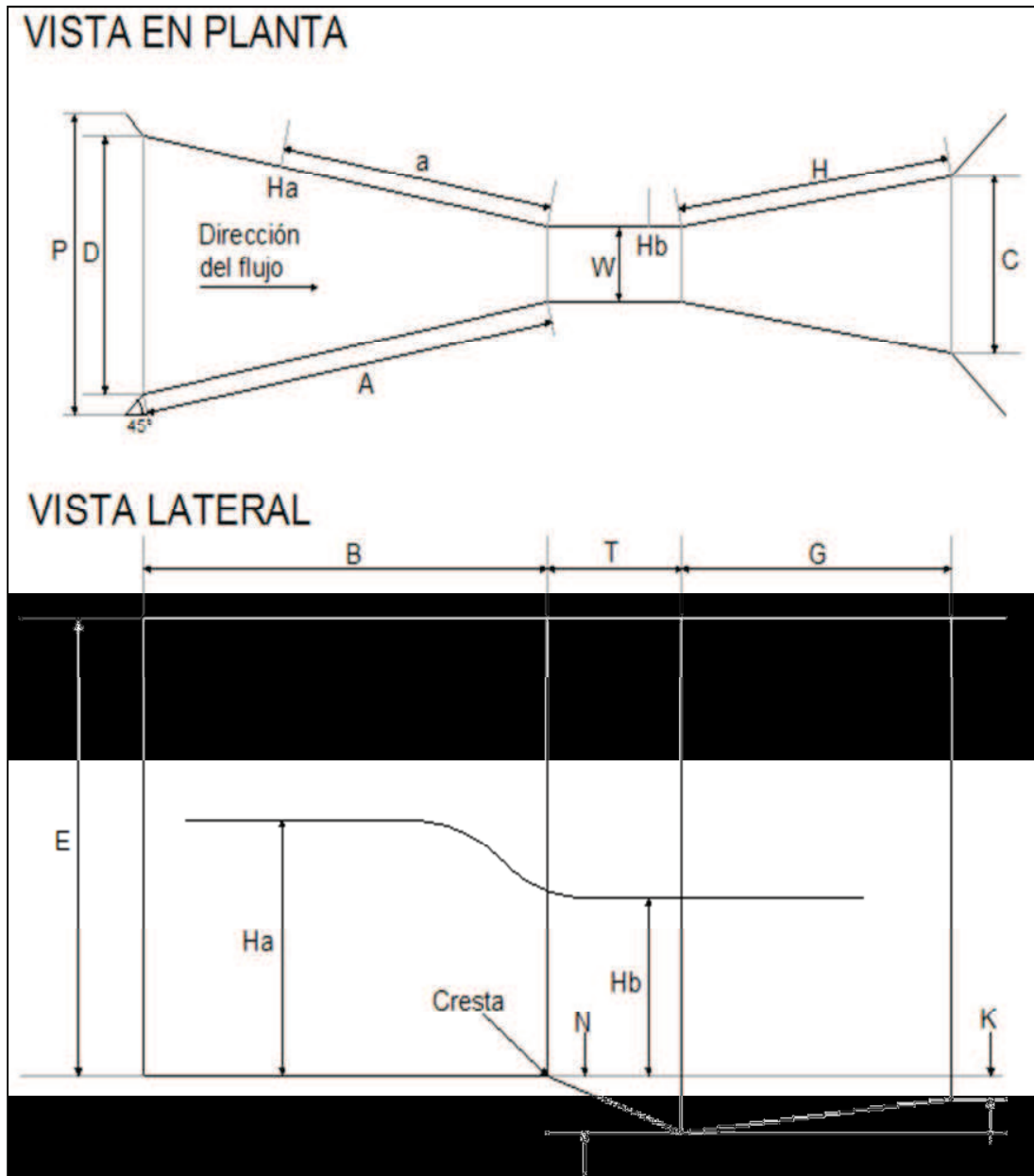
DIMENSIONES ESTÁNDAR DE LOS AFORADORES PARSHALL

W	A	a	B	C	D	E	T	G	K	M	N	P	R	X	Y	
																Dimensiones en milímetros (mm)
pulg	mm															
1"	25.4	363	242	355	93	167	229	76	203	19	-	29	-	8	13	
2"	50.8	414	276	406	135	214	254	114	254	22	-	43	-	16	25	
3"	76.2	467	311	457	178	259	457	152	305	25	-	57	-	25	38	
6"	152.4	621	414	610	394	397	610	305	610	76	305	114	902	406	51	76
9"	228.6	879	587	664	381	575	762	305	457	76	305	114	1060	406	51	76
Dimensiones en metros (m)																
pies	m															
1'	1.419	1.372	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
16"	0.457	1.448	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
2'	0.6096	1.524	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
3'	0.9144	1.676	1.116	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
4'	12.192	1.829	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
5'	15.240	1.981	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
6'	18.288	2.134	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
7'	21.336	2.286	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
8'	24.384	2.438	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
10'	30.480	27.432	1.829	4.267	3.658	4.756	1.219	0.914	1.829	0.152	-	0.343	-	-	0.305	0.229
12'	36.580	30.480	2.032	4.877	4.470	5.607	1.524	0.914	2.438	0.152	-	0.343	-	-	0.305	0.229
15'	45.720	35.052	2.337	7.620	5.588	7.620	1.829	1.219	3.048	0.229	-	0.457	-	-	0.305	0.229
20'	60.960	42.672	2.845	7.620	7.315	9.144	2.134	1.829	3.658	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229
25'	76.200	50.292	3.353	7.620	6.941	10.666	2.134	1.829	3.962	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229
30'	91.440	57.912	3.861	7.925	10.566	12.313	2.134	1.829	4.267	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229
40'	12.192	73.152	4.877	8.230	13.818	15.481	2.134	1.829	4.877	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229
50'	15.240	88.392	5.893	8.230	17.272	18.529	2.134	1.829	6.096	0.305	-	0.686	-	-	0.305	0.229

FUENTE: Serie Autodidáctica de medición CANAL PARSHALL (Edmundo Pedroza Gonzales)

FIGURA 5.1

DIMENSIONES AFORADOR PARSHALL COMO SE MUESTRA EN EL CUADRO 5.2



FUENTE: PEDROZA, Serie Autodidáctica de Medición, 1992.

5.3.2 CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS

Para dimensionar este tipo de estructuras, se deben conocer las condiciones de caudal y calado en las que va a trabajar el aforador. En la siguiente tabla se indican los tamaños más comunes de estos aforadores y sus características de descarga.

CUADRO 5.3

CARACTERÍSTICAS DE DESCARGA PARA AFORADORES PALMER-BOWLUS

Diámetro D (cm)	Diámetro D (m)	Diámetro D (plg)	Rango de Descarga Q (l/s)		Ecuación de Descarga $Q = Kho^n$	Rango de Carga (mm)	
			Mín.	Máx.	Q(l/s), h(mm)	Mín.	Máx.
10,16	0,1016	4"	0.003446	3.459	$Q=0.00092345ho^{1.9}$	2	76
15,24	0,1524	6"	0.004394	8.298	$Q=0.0011773ho^{1.9}$	2	106
20,32	0,2032	8"	0.005220	19.07	$Q=0.0013987ho^{1.9}$	2	150
25,4	0,254	10"	0.005966	30.81	$Q=0.0015985ho^{1.9}$	2	180
30,48	0,3048	12"	0.006671	48.72	$Q=0.0017875ho^{1.9}$	2	216
38,1	0,381	15"	0.007639	88.88	$Q=0.0020467ho^{1.9}$	2	276
45,72	0,4572	18"	0.008525	131.4	$Q=0.0022843ho^{1.9}$	2	320
53,34	0,5334	21"	0.009332	199.3	$Q=0.0025003ho^{1.9}$	2	380
60,96	0,6096	24"	0.05781	267.9	$Q=0.0027163ho^{1.9}$	5	425
121,92	1,2192	48"	0.08411	2223	$Q=0.0039037ho^{1.907}$	5	1040

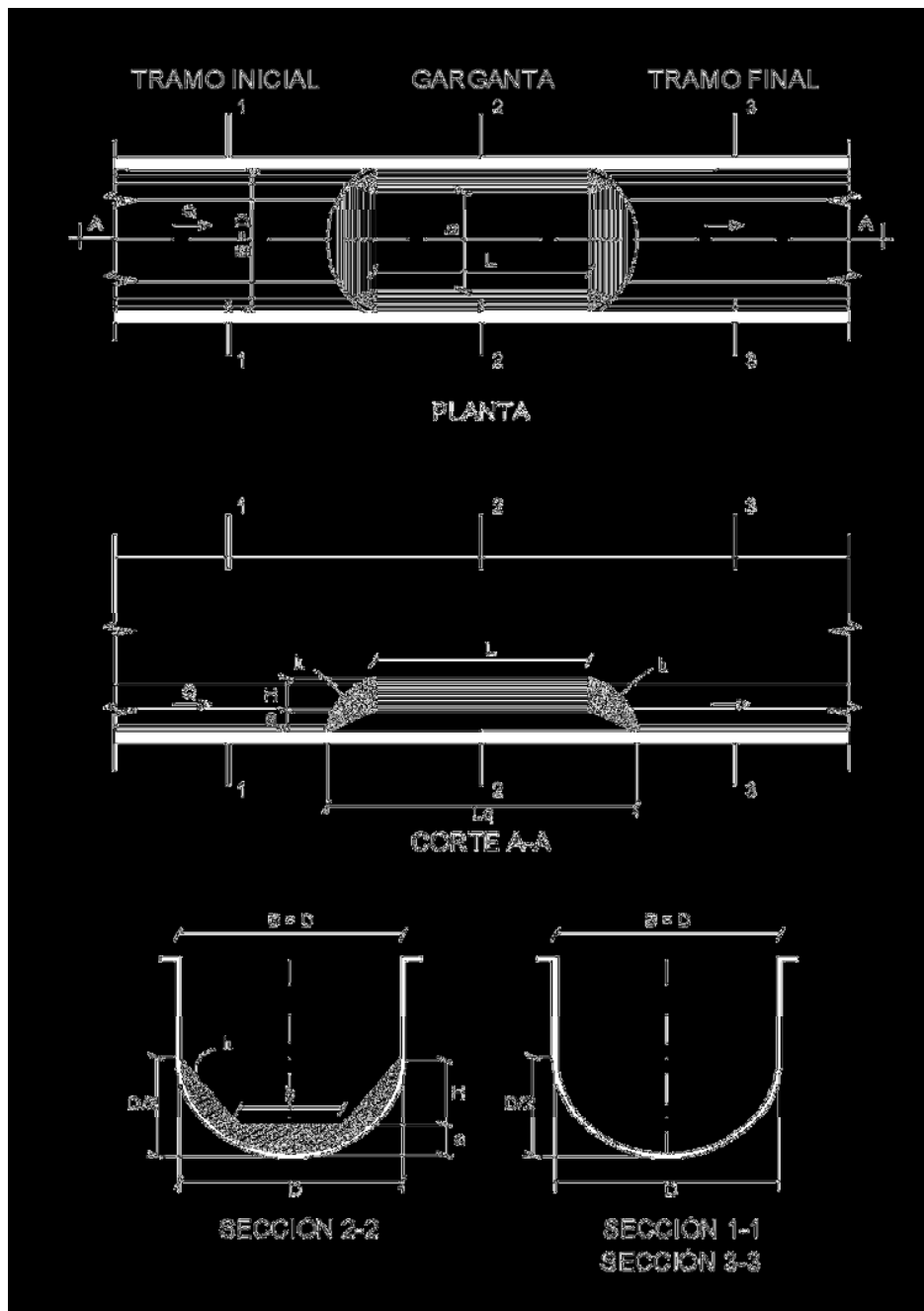
FUENTE: GREYLINE INSTRUMENTS INC.

Los aforadores tipo Palmer-Bowlus están compuestos de dos tipos de secciones transversales; la que corresponde al tramo inicial y final del aforador, de sección

semicircular-rectangular; y la sección donde se ubica la garganta con un estrechamiento vertical y horizontal.

FIGURA 5.2

DIMENSIONES AFORADOR PALMER-BOWLUS



FUENTE: AFORADOR PALMER-BOWLUS (POTEL JUNOT, 2002)

En el tramo inicial y final del aforador, la sección transversal está formada por dos partes:

- a) Sección semicircular del fondo del canal, de diámetro **D**, que llega hasta la altura **D/2**.
- b) Sección rectangular de ancho **B = D**, a partir de la altura **D/2**, limitada por las paredes verticales, hasta el coronamiento de las mismas.

La sección transversal de la garganta es constante en toda la longitud de esta, salvo en las transiciones longitudinales (inicial y final). Como se muestra en la Figura 5.2.

La sección transversal constante de la garganta tiene dos sectores: el inferior de sección trapezoidal, y el superior que continúa verticalmente con sección rectangular.

Las dimensiones características de esta sección como se muestran en la figura 5.2, son las siguientes:

- Diámetro de la sección semicircular del canal: **D** (m).
- Sobreelevación de la garganta respecto del fondo de sección semicircular del canal: **a** (m).

$$a = \frac{1}{6}D \quad (5.1)$$

- Ancho menor o base de la sección trapezoidal de la garganta: **b** (m).

$$b = \frac{D}{2} \quad (5.2)$$

- Ancho mayor o superficial de la sección trapezoidal: **B** (m).

$$B = D = \text{ancho del canal} \quad (5.3)$$

- Inclinación de los lados del sector trapezoidal de la garganta: I_T (m/m).

$$I_T = 2:1 \text{ (vertical: horizontal)} \quad (5.4)$$

- Pendiente de las transiciones longitudinales desde la sobreelevación a hasta el fondo del canal: I_L (m/m).

$$I_L = 1:3 \text{ (vertical: horizontal)} \quad (5.5)$$

- Altura del sector trapezoidal de la garganta: H (m).

$$H = \frac{(B-b) \cdot I_T}{2} \quad (5.6)$$

- Longitud del fondo plano horizontal de la sobreelevación de la garganta: L (m).

$$L = D \text{ a } 1.5D \quad (5.7)$$

- Longitud del tramo sobreelevado de la garganta, incluyendo las transiciones: Lq (m).

$$Lq = L + \frac{2a}{I_L} \quad (5.8)$$

5.4 CONCLUSIONES

Debido a las secciones circulares de entrada y salida del aforador Palmer-Bowlus su uso es óptimo en sistemas de alcantarillado. Se deben verificar los caudales

máximos y mínimos en el punto de instalación del aforado para elegir el tamaño correcto del aforador.

Las dimensiones establecidas para cada uno de los tamaños de los aforadores tipo Parshall o Palmer-Bowlus, deben regir en la construcción, para evitar errores en los datos tomados, principalmente cuando se trata de aforadores pequeños.

Es importante garantizar las condiciones hidráulicas a la entrada y salida de los aforadores tipo Parshall y Palmer-Bowlus, para que sea correcto el funcionamiento de los mismos.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL CANAL DE AFORO PARSHALL

El canal de aforo Parshall tiene la ventaja de operar con pérdidas de carga relativamente bajas, por lo que para el presente estudio se las consideró despreciables. Para un mismo caudal, las pérdidas de carga pueden ser menores en un 72 % aproximadamente, en relación a otros medidores de caudal, actuando en las mismas condiciones de descarga libre.

El aforador Parshall tiene la ventaja de auto limpieza, debido al incremento en la velocidad de flujo cuando este ingresa en el aforador. Esto evita la formación de azolve y la acumulación de sedimentos, por lo que este tipo de aforadores necesita poco mantenimiento.

El diseño de los aforadores Parshall permite el uso de sensores, para automatizar las mediciones, por lo que se recomienda la colocación de este tipo de instrumentos para obtener mayor precisión en los resultados.

El principal inconveniente con los aforadores Parshall es que se deben construir siguiendo medidas estándar, esto encarece su construcción y dificulta la colocación en sitio, principalmente si se desea realizar el aforo de un río.

El canal de aforo Parshall es adecuado para la medición del caudal en canales de riego o en las corrientes naturales con una pendiente suave.

6.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS

En el canal de aforo Palmer-Bowlus se tiene una mayor libertad en su diseño y construcción, ya que a diferencia de los aforadores Parshall sus dimensiones no son tan rigurosas. Debido a esto pueden insertarse fácilmente en conductos, ya sean estos abiertos (canales) o cerrados (cañerías); esto los hace excelentes para su utilización en sistemas de alcantarillado.

En este aforador las pérdidas de carga en la garganta son mucho menores que en otros aforadores, habitualmente estas pérdidas de carga son despreciables por tener valores de 0.03 m aproximadamente.

Al igual que en los aforadores Parshall tienen un sistema auto limpiante, lo que reduce mantenimiento y gastos de operación.

Se pueden aplicar en conductos donde es dificultosa la medición de caudales, como es el caso de una boca de registro de un sistema de alcantarillado. Permiten ahorrar costos de obra cuando se les utiliza como medidores de caudal en lagunas de depuración en sistemas de alcantarillado, situación que significa menores excavaciones y terraplenes.

Pueden prefabricarse y adaptarse a conductos existentes o a diseñar o construir. Pueden ser instalados temporalmente, ya sea para obtener información estadística o para diseñar un aforador definitivo con los datos obtenidos.

La medición de caudal no es tan precisa como en un aforador Parshall. Debido a la pequeña pérdida de carga ocasionada en el escurrimiento por la garganta, se requiere instrumentos de medición más sensibles que los utilizados en otros aforadores.

6.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

El estudio de este tipo de aforadores es necesario para conocer su funcionamiento y poder utilizarlo en nuestro medio, ya que en nuestro país se presta una mínima importancia en el control y mantenimiento de los sistemas de alcantarillado y riego.

Con la construcción de los modelos de laboratorio se realizarán prácticas estudiantiles, con las que se pretende el aprendizaje y correcta utilización de los aforadores y el monitor de flujo. Es recomendable previo a la realización de la práctica tener un conocimiento teórico del funcionamiento de los aforadores.

El monitor de flujo es una buena herramienta para obtener y registrar datos, debido a que se lo programa para que trabaje en intervalos de tiempo y no es necesaria la presencia de un operador. Los datos registrados pueden ser descargados mediante un computador o enviados automáticamente desde la estación de monitoreo, mediante redes telefónicas. El monitor de flujo puede registrar datos de caudales máximos, mínimos y promedio en un intervalo de tiempo programado; además del registro de datos continuo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTRO DELGADO, M.: Análisis Dimensional y Modelación Física en Hidráulica, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental EPN, Ecuador.
- WORKING GROUP ON SMALL HYDRAULIC STRUCTURES, 1978. Discharge Measurement Structures, M. G. BOS, Wageningen,
- SOTELO. Hidráulica General, Limusa-Noriega Editores, México.
- POTEL JUNOT, M, 2003. Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS, Argentina.
- PEDROZA, 1992. Serie Autodidáctica de Medición.
- NAUDASCHER, E., CASTRO, M, 2000. Hidráulica de Canales, Limusa-Noriega Editores, México.
- ROUSE, H, 1960. Mecánica de los Fluidos para Ingenieros Hidráulicos, McGraw Hill Co., New York.
- ROUSE, H, 1950. Hidráulica, McGraw Hill Co. Ed., New York.
- CHOW, V.T, 1959. Hidráulica de los Canales Abiertos, McGraw Hill Ed. Co., New York – Bogotá.
- CHANSON, H, 2002. Hidráulica del Flujo en Canales Abiertos, McGraw Hill Interamericana de Colombia Ed.
- DOMÍNGUEZ, F, 1950. Hidráulica, Santiago de Chile.
- SALDARRIAGA, J., 2003. Hidráulica de Acueductos, Ed. McGraw Hill, New York – Bogotá.
- SHAMES IRVING, H, 1995. Mecánica de Fluidos, Tercera Edición, McGraw Hill, New York – Bogotá.

ANEXO 1

GUÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LA PRÁCTICA

MEDICION DE CAUDALES A TRAVES DE UN CANAL DE AFORO PARSHALL Y UN CANAL DE AFORO PALMER-BOWLUS.

OBJETIVOS

- Realizar una comparación de resultados entre los dos aforadores.
- Determinar la curva de descarga de cada aforador.
- Establecer una ecuación exponencial que nos permita calcular el caudal Q en función del calado h para cada aforador.
- Aprender el funcionamiento del Medidor de Flujo GREYLINE OCF 4.0 y obtener los resultados de este en un computador.

SINTESIS TEORICA

Es posible medir el caudal al interior de un conducto con flujo a superficie libre por medio de canaletas o aforadores, que poseen medidas geométricas estándar y que están calibradas para que, por medio de un cálculo matemático y utilizando la medición de la altura del agua, se estime o calcule el caudal.

Este tipo de dispositivo o de estructura de control tiene la ventaja de minimizar el gasto de recurso humano en lo que se refiere a limpieza, pues permite el libre paso de agua y no necesita estancamiento de la misma; además, de que es un dispositivo fijo en el punto de toma de muestra y medición de caudal.

Son varios los equipos o dispositivos que se pueden utilizar para este fin. Se conocen, por ejemplo: vertederos, Canaletas Parshall, Canaletas Palmer Bowlus y sensores de nivel para profundidades seleccionadas de agua, entre otros.

Hay varios requerimientos para la instalación física de estos equipos de medición, los mismos que dependen de cada dispositivo en particular. En canales de superficie libre, la altura piezométrica debe medirse en lugares donde la altura de velocidad sea despreciable, lo cual se logra donde el agua escurre con flujo subcrítico o donde el agua se encuentra estancada.

Canaleta de aforo Parshall

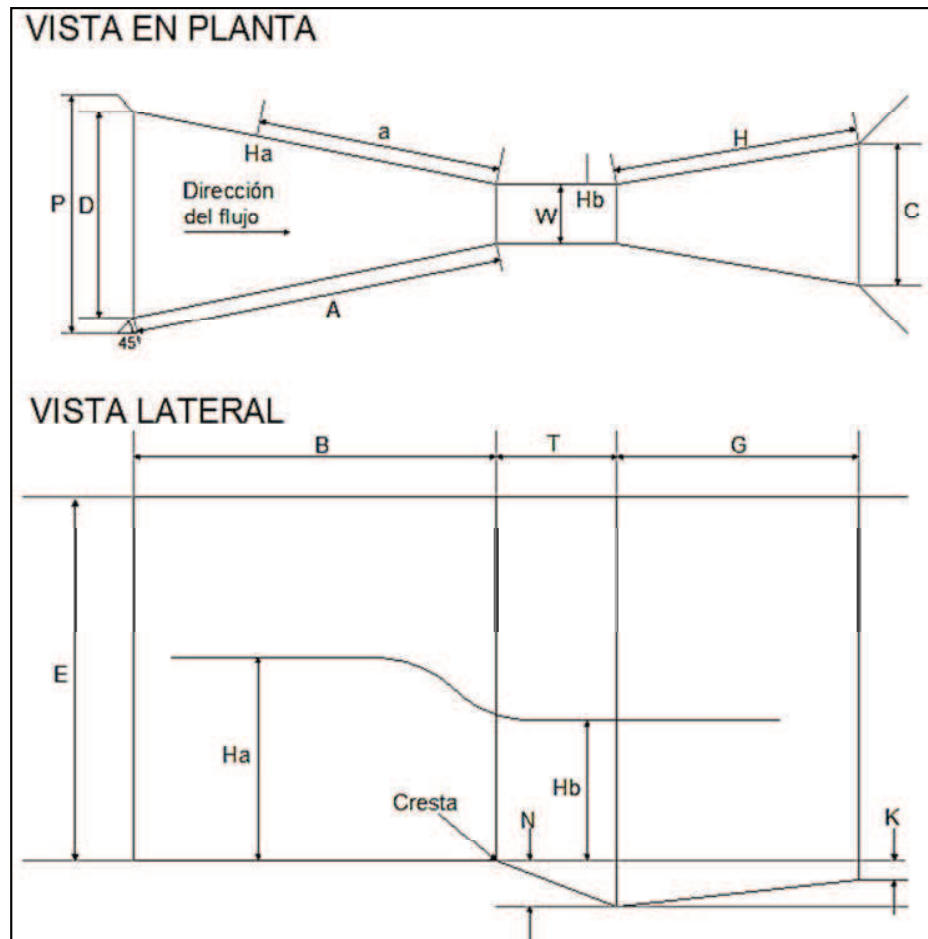


Figura 1. Canal de Aforo Parshall

Los aforadores Parshall son instrumentos calibrados para determinar el caudal en cauces abiertos en función de la medida de la profundidad de agua. Se describen técnicamente como un aforador de profundidad crítica.

Las principales ventajas del aforador Parshall son: (i) sólo existe una pequeña pérdida de carga a través del aforador, (ii) deja pasar fácilmente sedimentos o desechos, (iii) no necesita condiciones especiales de acceso o una poza de amortiguación y (iv) tampoco necesita correcciones hasta para una sumergencia de hasta un 60%. En consecuencia, es adecuado para la medición del caudal en canales de riego o en corrientes naturales con una pendiente suave.

El medidor consiste en una sección convergente con el fondo a nivel, una sección de garganta con el fondo de pendiente descendente y una sección divergente con el fondo con pendiente ascendente. Gracias a ello el agua escurre a velocidad crítica a través de la garganta.

Canaleta de Aforo Palmer-Bowlus

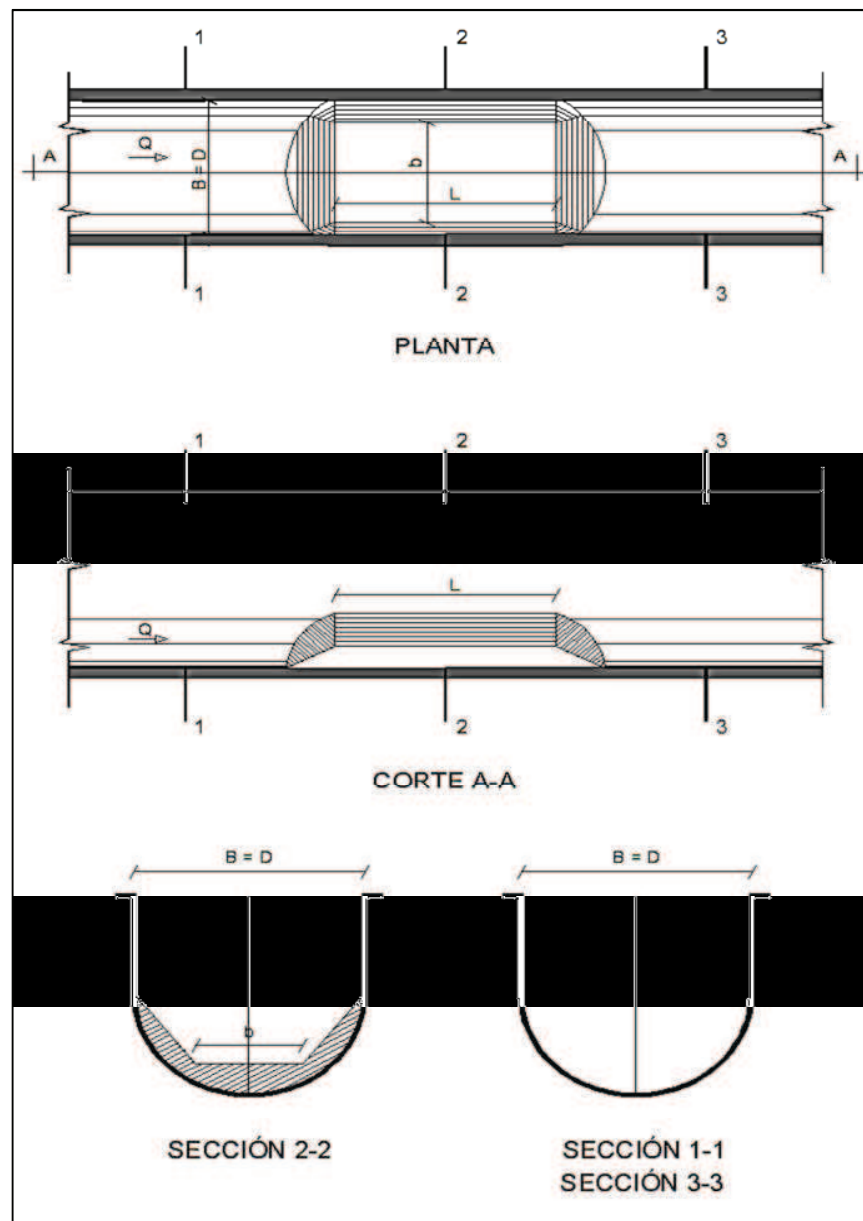


Figura 2. Canal de Aforo Palmer-Bowlus.

El canal o aforador tipo Palmer & Bowlus se caracteriza por su conexión circular que permite una fácil instalación en tuberías.

Este canal o aforador está indicado para medidas en la escala de 20-100 % del denominado caudal nominal. Ninguna fórmula simple se puede utilizar para los canales Palmer & Bowlus; las formulas vienen definidas individualmente para cada canal.

ECUACION PARA LA DETERMINACIÓN DEL CAUDAL

Tomaremos como base el caudal obtenido con el vertedero triangular 60° que se ubica aguas arriba del Canal de Aforo Parshall, para esto utilizaremos la siguiente fórmula para vertederos triangulares con un ángulo de abertura de 60°:

$$Q = 0,7725h^{2,47} \quad 1 \text{ (Mr.V.M. CONE, 1916)}$$

Dónde:

h (m): Carga sobre el Vertedero

Q (m³/s): Caudal

PRUEBAS A REALIZARSE

1. Determinar los coeficientes de descarga para el Canal de aforo Parshall, en la ecuación:

$$Q = k(H_a)^n \quad 2 \text{ (PEDROZA, 1992)}$$

Dónde:

Q = caudal (para condiciones de descarga libre)

H_a = es la profundidad del agua en la ubicación determinada del aforador Parshall.

K y n = coeficientes del aforador Parshall diferentes para cada tamaño de aforador.

2. Determinar los coeficientes de descarga para el Canal de aforo Palmer-Bowlus, en la ecuación:

$$Q = k(h_o)^n$$

3 (POTEL JUNOT, 2002)

Dónde:

Q = caudal (para condiciones de descarga libre)

h_o = es la profundidad del agua en la ubicación determinada del aforador Palmer-Bowlus.

K y n = coeficientes del aforador Palmer-Bowlus diferentes para cada tamaño de aforador.

5.1. INSTRUMENTACIÓN

Vertedero Triangular 60°.

Piezometro.

Limnometro.

Canal de Aforo Parshall ancho de garganta 3”.

Canal de Aforo Palmer-Bowlus diámetro 33 cm

Monitor de Flujo Greyline OCF 4.0

5.2. PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS

Para poder realizar las pruebas correspondientes a la práctica es necesario calibrar el monitor de flujo GREYLINE OCF 4.0, para cada aforador de la siguiente manera:

- Calibración en el Canal de Aforo Parshall para realizar mediciones con el Monitor de Flujo GREYLINE OCF 4.0

Se deberá seleccionar en el monitor de flujo el canal de aforo Parshall con un ancho de garganta de 3”. Luego se introducirá manualmente los datos de rangos de operación del instrumento.

RANGO MÁXIMO PARSHALL = 81,29 cm

RANGO MÍNIMO PARSHALL = 40 cm

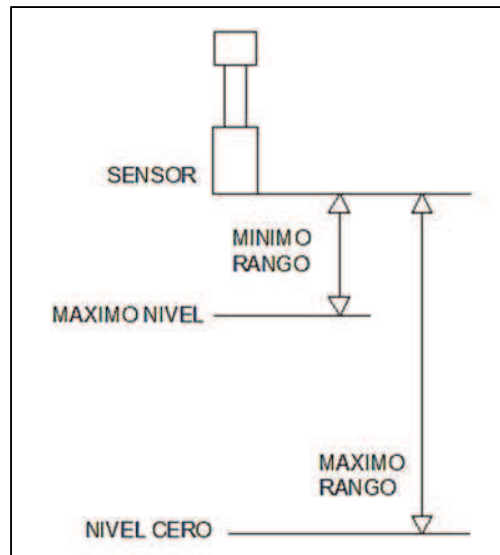


Figura 3. Distancias de Calibración.

- Calibración en el Canal de Aforo Palmer-Bowlus para realizar mediciones con el Monitor de Flujo GREYLINE OCF 4.0

Ya que este aforador no está predeterminado en el instrumento se debe introducir las constantes K y n dadas por el programa FINDK&n.exe que viene junto con el monitor de flujo.

$K = 2,5469$

$n = 2,6928$

Luego de igual manera que en el Canal Parshall se introducirá los datos de rangos de operación del instrumento.

RANGO MÁXIMO PALMER-BOWLUS = 69,32 cm

RANGO MÍNIMO PALMER-BOWLUS = 40 cm

Prueba N° 1

En el vertedero triangular con la ayuda del piezómetro encontrar el Calado h y con la ecuación 1 encontrar el Caudal Q

En el canal de Aforo Parshall medir el Calado H_a y el Caudal Q con la ayuda del Monitor de flujo Greyline OCF 4.0.

Realizar para varios caudales el mismo procedimiento abriendo la válvula ubicada en la tubería que viene del tanque elevado.

Prueba N° 2

En el vertedero triangular con la ayuda del piezómetro encontrar el Calado h y con la ecuación 1 encontrar el Caudal Q

En el canal de Aforo Palmer-Bowlus medir el Calado h_o y el Caudal Q con la ayuda del Monitor de flujo Greyline OCF 4.0.

Realizar para varios caudales el mismo procedimiento abriendo la válvula ubicada en la tubería que viene del tanque elevado.

Prueba N° 3

Manteniendo el caudal tomar datos de Calado y Caudal en cada aforador con el monitor de flujo GREYLINE OCF 4.0

Realizar esta prueba para diferentes caudales

Prueba N° 4

Configurar el monitor en modo registro de datos durante 15 minutos para que tome un dato cada 30 segundos. Luego de terminada la toma de todos los datos descargar esta información en un computador.

PROCESAMIENTO DE DATOS

- ☞ Con los datos tomados en las Pruebas 1 y 2 realizar la curva de descarga para cada aforador, tomando como Caudal Q el obtenido en el vertedero triangular 60° . Para el aforador Parshall encontrar la curva Q vs H_a y para el

- aforador Palmer-Bowlus la curva Q vs h_o . Luego encontrar la ecuación potencial para cada caso mediante el ajuste de la curva.
- ☞ Comparar los resultados de caudal obtenidos con el vertedero, con los resultados de caudal tomados del monitor de flujo en las Pruebas 1 y 2
 - ☞ Comparar los resultados de caudal obtenidos para cada aforador en la Prueba N°3
 - ☞ Presentar los gráficos y tablas tomados del registro de datos del monitor de flujo en la prueba 4.

CONCLUSIONES

1. Exprese sus conclusiones y recomendaciones con relación a los resultados obtenidos y los fenómenos observados en el desarrollo de la práctica.
2. Sugiera pruebas ampliatorias que usted crea conveniente se puede desarrollar en esta práctica.

5.3. BIBLIOGRAFIA

- ☞ MECANICA DE FLUIDOS PARA INGENIEROS, N. B. Webber
- ☞ HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS, Ven Te Chow
- ☞ HIDRAULICA, F.J. Domínguez
- ☞ AFORADOR PALMER-BOWLUS (AIDIS), M.A.Potel Junot
- ☞ CANAL PARSHALL SERIE AUTODIDACTICA DE MEDICIÓN, Pedroza Gonzales

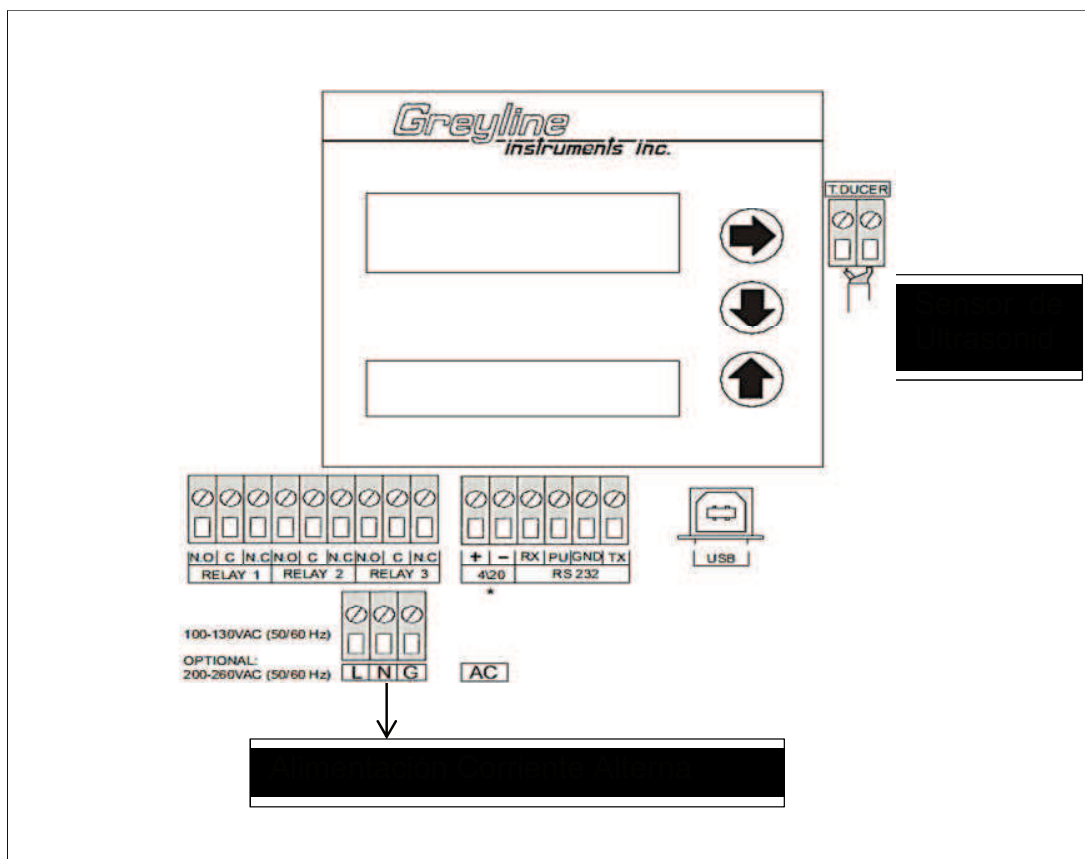
ANEXO 2

**MANUAL DE OPERACIÓN MONITOR DE FLUJO GREYLINE
OCF 4.0**

INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DEL MONITOR DE FLUJO PARA CANALES ABIERTOS GREYLINE OCF 4.0

I. CONEXIONES

Potencia de entrada: el modelo estándar requiere de una alimentación de corriente alterna entre 100-130V 50/60Hz. Ningún ajuste es necesario para cualquier voltaje dentro de este rango.



Sensor: el sensor debe ser conectado en los terminales T.DUCER como se muestra en la figura.

II. POSICIONAMIENTO TÍPICO DEL SENSOR PARA AFORADORES Y VERTEDEROS

La ubicación del sensor es fundamental para la medición exacta del flujo.

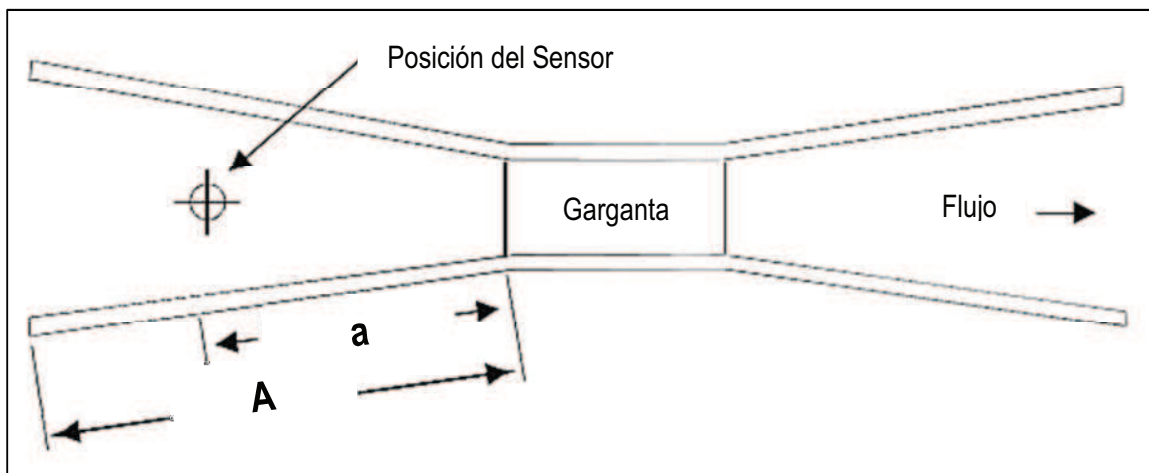
La base del sensor debe estar a una altura de 8" (203mm) o más por encima del nivel máximo de agua.

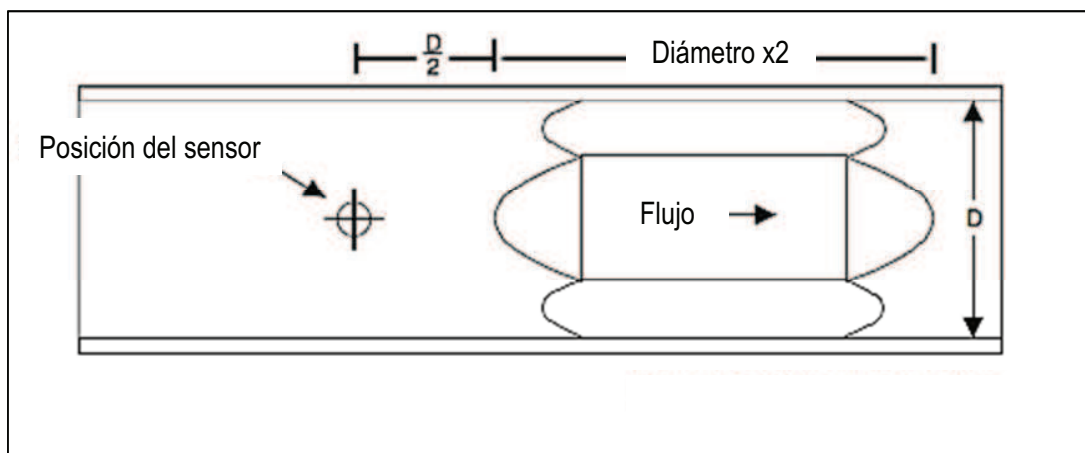
A continuación se presentan la posición en la cual debe ser instalado el sensor para los diferentes tipos de aforadores.

Aforador PARSHALL

El sensor debe ser colocado en el centro de la sección transversal del aforador y a una distancia $a = (2/3) A$ en la sección convergente, la distancia "a" debe ser medida desde el inicio de la garganta; como se muestra en la figura.

- Aforador PALMER-BOWLUS

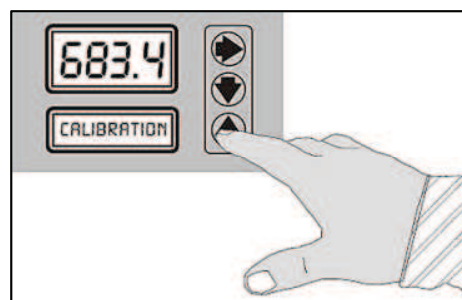




El sensor debe ser colocado en el centro de la sección transversal del aforador y una distancia igual a la mitad del diámetro del mismo, aguas arriba del inicio de la contracción.

III. SISTEMA DE TECLADO

El monitor de flujo OCF 4.0 tiene un sistema de calibración sencilla de 3 botones. Los modos de funcionamiento y calibración se muestran en una pantalla alfanumérica de 16 dígitos. El teclado se utiliza para desplazarse por el menú para calibrar el OCF 4.0, y para ver el modo de funcionamiento y funciones. Una señal acústica suena cuando cada tecla que se presiona. Si el teclado no se utiliza durante 2 minutos, el OCF 4.0 pasará automáticamente al modo **RUN** (pantalla de desplazamiento). Use el teclado para explorar los menús y familiarizarse con sus características.



IV. DIAGRAMA DE FLUJO DEL MENÚ

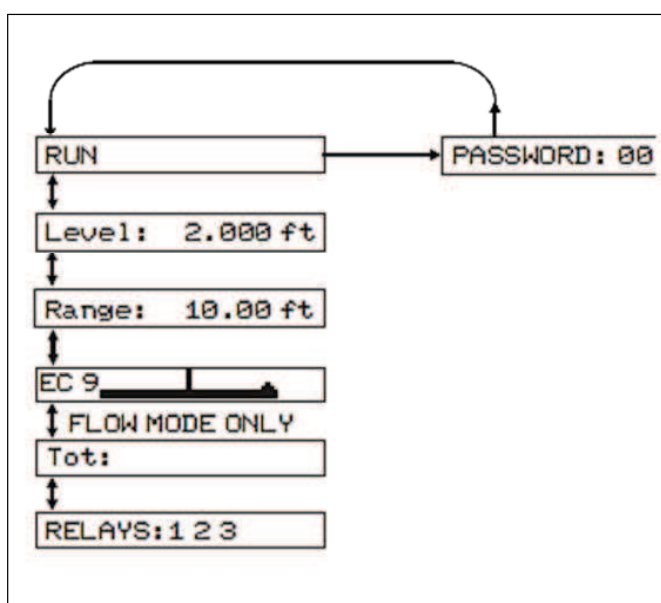
El siguiente diagrama muestra el sistema del menú del monitor de flujo OCF 4.0. Las flechas muestran las tres direcciones para dejar un cuadro. Al presionar el botón con la flecha correspondiente se trasladará a la casilla en la dirección indicada. Mueva el cursor (o subrayado) bajo los números para aumentar o disminuir el número con las teclas **↑** **↓**. En la parte inferior de cada columna del menú se encuentra una casilla que contiene en su interior las palabras store? Yes. Para almacenar los valores de calibración en forma permanente (incluso a través de un corte de energía), mueva el cursor debajo de Yes y pulse la tecla **↑** o **↓**. Si la tecla se presiona **↓** con el cursor en la store?, los cambios no serán almacenados y el sistema volverá a la parte superior de la columna de Menú.

MENÚ RUN (Ejecutar)

Dentro de este menú en la pantalla se van mostrando las unidades seleccionadas en la columna UNITS/MODE, el modo de operación (nivel, rango, flujo), el valor total del volumen de líquido que ha atravesado el aforador y la temperatura en la localización del sensor.

FIGURA 2

DIAGRAMA DE FLUJO: MENÚ EJECUTAR (RUN)



Use los botones \uparrow o \downarrow para desplazarse a través del menú RUN.

- **LECTOR DE NIVEL (Level)**

Indica el tirante o calado en el aforador medido por el instrumento.

- **LECTOR DE RANGO (Range)**

Indica el rango medido por el instrumento. Rango es la distancia desde la parte inferior del sensor a la superficie del agua.

- **INTENSIDAD DE ECO (Ec)**

La intensidad de eco es ajustada automáticamente por el OCF 4.0 en respuesta a las condiciones de operación en las aplicaciones.

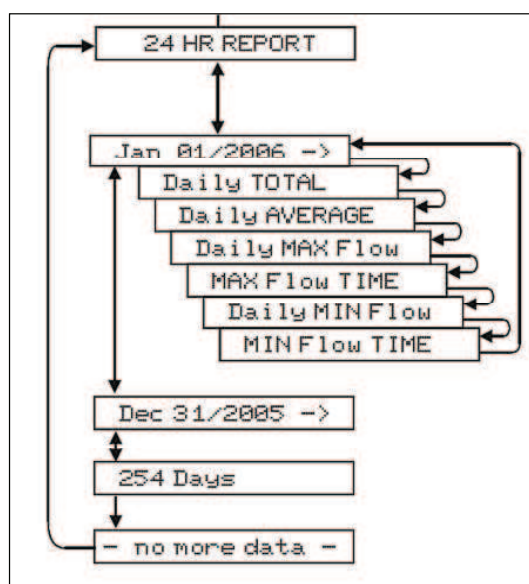
- **TOTALIZADOR (Tot)**

El totalizador está únicamente disponible cuando el OCF 4.0 está calibrado en modo FLOW (flujo). El totalizador muestra el volumen de agua que pasa por el aforador y se actualiza cada 2 segundos cuando pasa un volumen mayor a 1 litro.

V. REPORTE DE FLUJO EN 24 HORAS (24 HR REPORT)

FIGURA 3

DIAGRAMA DE FLUJO: MENÚ REPORTE 24 HR



El reporte de flujo en 24 horas es creado automáticamente por el OCF 4.0. Presionando ↓ se elige la fecha del reporte y presionando ➡ se desplaza a través de las opciones: TOTAL DIARIO ➡ PROMEDIO DIARIO ➡ FLUJO MÁXIMO ➡ HORA DEL FLUJO MÁXIMO ➡ FLUJO MÍNIMO ➡ HORA DE FLUJO MÍNIMO.

Mediante este menú se pueden obtener los datos de flujo del día en curso, más los últimos 254 días.

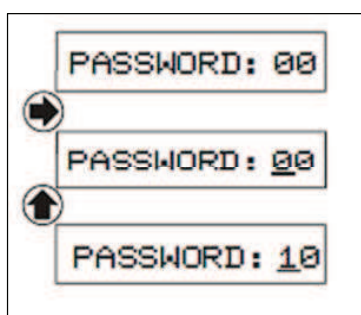
VI. CONTRASEÑA (PASSWORD)

La contraseña (un numero de 00 a 99) previene un acceso no autorizado al menú de calibración.

Desde el menú Ejecutar (RUN) al presionar ➡ se ingresará a la pantalla para introducir la contraseña. Presione ➡ para posicionar el cursor debajo de los dígitos y ⬆ o ⬇ para cambiar el número y luego ➡ para proceder a la calibración.

FIGURA 4

INGRESO DE CONTRASEÑA



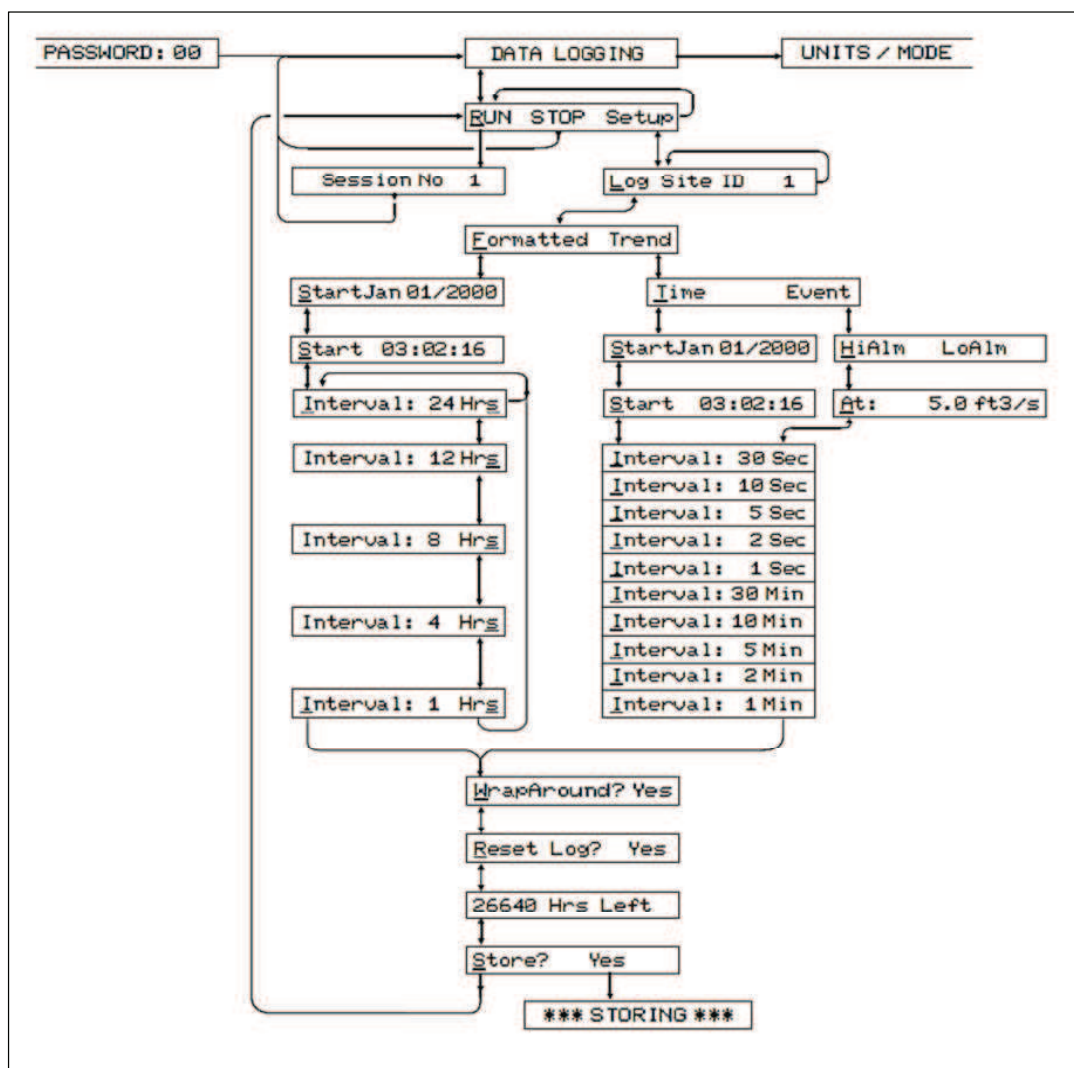
La contraseña por defecto es 00. La contraseña puede ser cambiada en el menú de funciones especiales (SPECIAL FUNCTION).

VII. REGISTRO DE DATOS (DATA LOGGING)

Si se está poniendo en marcha y calibrando por primera vez el instrumento OCF 4.0, omita este menú por ahora y proceda con el menú de calibración de unidades y modos (UNITS/MODE). Una vez que el medidor de flujo este calibrado usted puede regresar al menú de registro de datos y configurar la toma de datos como se indica a continuación:

FIGURA 5

DIAGRAMA DE FLUJO: MENÚ REGISTRO DE DATOS



- **CONFIGURACIÓN (Setup)**

Desde RN STOP SETUP presione ➡ hasta SETUP y luego presione ⬇ hacia la identificación del registro de sitio (Log Site ID 0). Presione ➡ para colocar el curso sobre el numeral, y utilice ⬇ o ⬆ para cambiar los numerales. El número de identificación de sitio se conserva con las sesiones de registro de datos para identificar los registros almacenados en diferentes localizaciones.

- **DATOS CON FORMATO (Formatted)**

Presione **↓** desde Log Site ID y presione **↓** desde Formatted.

El registro de datos tipo “Formato” almacena un resumen de las lecturas de flujo durante un período de tiempo seleccionable por el usuario. El resumen incluye:

- Fecha y Hora en la que fueron tomados los datos.
- Volumen total
- Promedio de flujo
- Flujo máximo en el intervalo
- Hora en la que ocurrió el flujo máximo
- Flujo mínimo en el intervalo
- Hora en la que ocurrió el flujo mínimo

Como se muestra en la Figura 5 la configuración del modo de registro de datos tipo “Formato”, permite establecer la fecha, la hora y el intervalo de registro.

Al finalizar la configuración, el OCF 4.0 reportará en la pantalla `xxxx Hrs left` indicando la cantidad de tiempo disponible de registro con la configuración actual.

Para terminar la configuración se debe presionar **↓** y se mostrarán en la pantalla las opciones:

Wraparound? Yes, al seleccionar esta opción los datos almacenados en sesiones anteriores serán sustituidos por los datos más recientes. Si esta opción no es seleccionada el registro de datos se detendrá automáticamente cuando la memoria este llena.

Reset Log? Yes, esta opción permite restablecer el registro y borrar todas las sesiones anteriores y los valores guardados.

Las opciones Wraparound? Yes y Reset Log? Yes, están disponibles para todos los tipos de configuración de registro de datos.

Para comenzar con el registro de datos, después de aceptar la configuración ingresada, el menú del sistema regresará a `RUN STOP SETUP`. Presione **➡** para

posicionar el cursor bajo RUN y presione ↓ para activar el registrado de datos, el cual iniciara a la fecha y hora seleccionada en la configuración.

- **REGISTRO DE DATOS POR TIEMPO (Time)**

El registro de datos por tiempo permite ingresar los instantes de inicio y finalización de la toma de datos, además de un intervalo de registro.

- **REGISTRO DE DATOS POR EVENTO (Event)**

El registro de datos por evento almacena los datos de registro solamente cuando se ha alcanzado un punto máximo o mínimo de flujo, el cual es definido por el usuario.

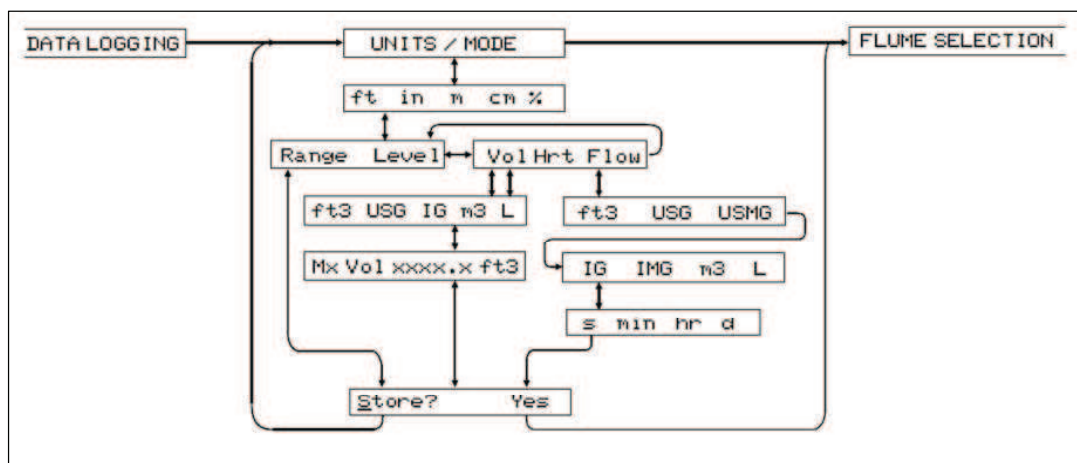
- **Sesiones de registro**

Cada vez que seleccione STOP en el menú de registro de datos, el registrador de datos almacenará los datos actuales en la memoria como una "SESION N° XX", automáticamente numerado de "1" a "10". Si reanuda la sesión mediante la selección de RUN, el registrador de datos informará de que una nueva sesión de registro se inicia y se titula "SESION N° XX". Estos datos pueden ser descargados en una PC usando el software "Greyline Logger", cada sesión se abrirá como una gráfica separada o tabla titulada "Greyline Data Log xx".

VIII. UNIDADES Y MODOS DE OPERACIÓN (UNITS/MODE)

FIGURA 6

DIAGRAMA DE FLUJO: UNIDADES / MODOS DE OPERACIÓN



Al acceder al menú de unidades y modos de operación, se deberá escoger inicialmente la unidad de longitud. Presione **➡** hasta que el cursor se encuentre bajo la unidad deseada. Las unidades de longitud disponibles para seleccionar son: pies (ft), pulgadas (in), metros (m), centímetros (cm), porcentaje (%).

Presione **⬇** para continuar con la configuración y seleccionar el modo de operación. Los modos de operación disponibles se presentan en el siguiente cuadro:

CUADRO 1**MODOS DE OPERACIÓN – MONITOR DE FLUJO OCF 4.0**

Rango (R<u>an</u>ge)	Muestra la distancia desde el sensor hasta el objetivo o la superficie del líquido como una cinta métrica. modalidad de alcance es útil para medir la distancia exacta desde el sensor hasta el nivel cero durante la calibración, o el espacio libre en un tanque.
Nivel (L<u>e</u>vel)	Se puede utilizar para medir el nivel de agua en un tanque en unidades lineales, o la carga (altura de flujo) en un canal abierto para la comparación con las tablas de flujo, ya sea el canal construido o prefabricado.
Volumen (V<u>o</u>l)	Indica el volumen de agua en un tanque en unidades de ingeniería como litros o galones.
Tanque cilíndrico (H<u>rt</u>)	Calcula e indica el volumen en un tanque cilíndrico horizontal.
Flujo (F<u>l</u>ow)	Calcula el caudal que pasa a través de un canal abierto en un aforador o vertedero.

Presione **↓** cuando el cursor se encuentre bajo una de las opciones para seleccionar el modo de operación. Cuando elige uno de los modos de operación: Vol, Hrt o Flow; le dará la opción adicional de escoger las siguientes unidades de volumen: pies cúbicos (ft³), galones EEUU (USG), millones de galones EEUU (USMG), galones imperiales (IG), millones de galones imperiales (IMG), metros cúbicos (m³) y litros (L).

En los modos Vol y Hrt, se le pedirá también que introduzca el valor del volumen máximo del tanque.

En el modo Flujo (Flow) se ofrecerá adicionalmente la selección de las siguientes unidades de tiempo: segundos (s), minutos (min), horas (hr) y días (d).

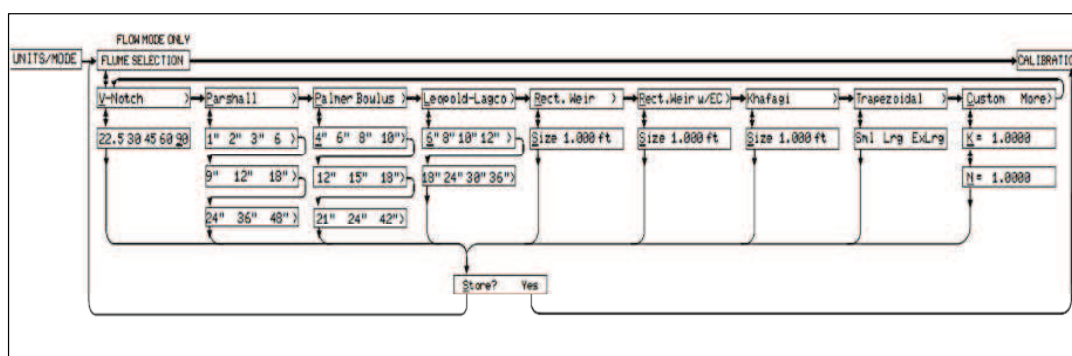
El instrumento monitor de flujo OCF 4.0, mostrará en la pantalla un error de unidades (ILLEGAL UNITS), si con las unidades escogidas se excede el valor de 9'999'999.

IX. SELECCIÓN DEL AFORADOR (FLUME SELECTION)

El menú de selección del aforador aparece solamente en el modo flujo.

FIGURA 7

DIAGRAMA DE FLUJO: SELECCIÓN DEL AFORADOR



Use los botones de dirección para seleccionar el aforador a ser utilizado y su tamaño. Si el aforador deseado no se encuentra entre los predeterminados del monitor de flujo, se podrá escoger el aforador personalizado (Custom).

Para los aforadores personalizados se pedirá introducir el valor de las constantes K y n, constantes de la curva de calibración de cada aforador.

Utilice el programa utilitario Greyline **FIND K&n.exe** (incluido con cada OCF 4.0), para determinar las constantes K y n a partir de datos experimentales o empíricos de calado y flujo.

FIGURA 8

PANTALLA DE INICIO DEL PROGRAMA GREYLINE FIND K&n.exe

#	HEAD mm	FLOW L/s	Flow Units	Head Units
1			US Gallons	Inches
2			US MGallons	Feet
3			Imp Gallons	Millimeters
4			Imp MGallons	
5			per	
6			Second	
7			Minute	
8			Hour	
9			Day	
10			Cubic Meters	
			Liters	
			Cubic Feet	

Results of Last Fit:

Instructions

- Use ARROW keys to move cursor.
- Select Head and Flow units.
- Enter data pairs under Head and Flow.
- F4 for a new data pair.
- SHIFT-F4 erases a data pair.
- F1 displays the Help Screen.
- F2 previews entered data.
- F3 fits the curve.
- F10 quits the program.

FindK&N V1.0, (c) 1992 Greyline Instruments, Inc.

FIGURA 9

PANTALLA DE RESULTADOS DEL PROGRAMA GREYLINE FIND K&n.exe
PARA UN AFORADOR PERSONALIZADO

#	HEAD mm	FLOW L/s	Flow Units	Head Units
1	20	.41	US Gallons	Inches
2	40	1.21	US MGallons	Feet
3	60	2.26	Imp Gallons	Millimeters
4	80	3.53	Imp MGallons	
5	100	4.99	per	
6	120	6.62	Second	
7	140	8.41	Minute	
8	160	10.34	Hour	
9	180	12.41	Day	
10	200	14.62	Cubic Meters	
			Liters	
			Cubic Feet	

Results of Last Fit: FLOW = kH^n
 $k = .992001$
 $n = 1.55045$
Deviation = 0.0164197534 %

Instructions

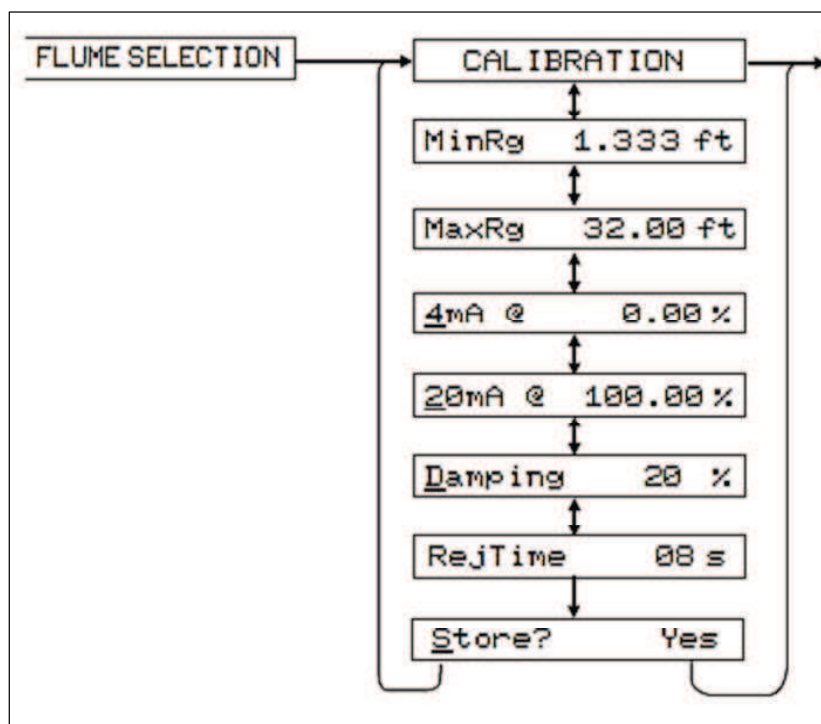
- Use ARROW keys to move cursor.
- Select Head and Flow units.
- Enter data pairs under Head and Flow.
- F4 for a new data pair.
- SHIFT-F4 erases a data pair.
- F1 displays the Help Screen.
- F2 previews entered data.
- F3 fits the curve.
- F10 quits the program.

FindK&N V1.0, (c) 1992 Greyline Instruments, Inc.

X. CALIBRACIÓN (CALIBRATION)

FIGURA 10

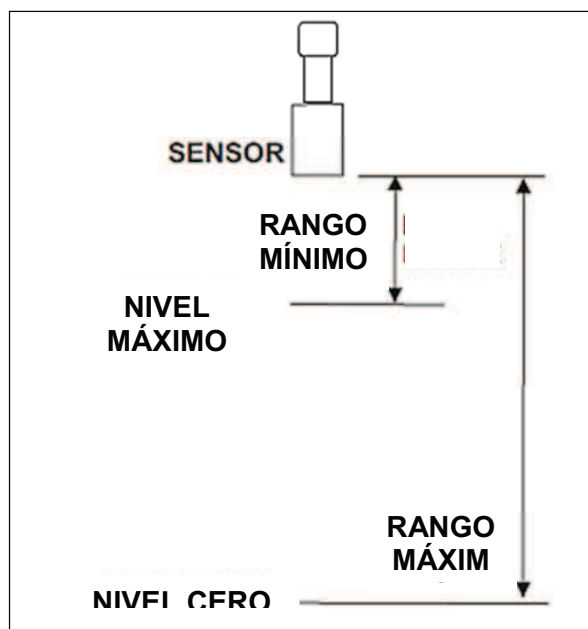
DIAGRAMA DE FLUJO: SELECCIÓN DEL AFORADOR



Antes de empezar con la calibración determine:

- Rango Máximo ($MaxRg$): Distancia desde el sensor al punto de nivel cero o fondo del canal.
- Nivel máximo: máximo nivel de alcanza el líquido en el aforador.
- Rango mínimo ($MinRg$): Distancia desde el sensor hasta el nivel máximo.
El nivel mínimo debe ser por lo menos 203mm o 8".

El OCF 4.0 no detectará objetivos más allá del rango máximo seleccionado.

FIGURA 11**DISTANCIAS DE CALIBRACIÓN**

Se debe introducir los valores de rango máximo y rango mínimo en las unidades elegidas anteriormente.

- **AMORTIGUACIÓN (Damping)**

La mínima amortiguación permite una respuesta rápida a los cambios de nivel. El aumento de la amortiguación ralentiza la respuesta a los cambios de nivel y es ideal para suavizar la muestra y toma de datos en condiciones turbulentas.

El valor de amortiguamiento es presentado en porcentaje (0 – 99%). En algunas experimentaciones es necesario seleccionar un valor de amortiguamiento óptimo. El valor de 20% es recomendado para la mayoría de aplicaciones.

Para cambios rápidos de nivel (sobre los 13mm/s), el valor de amortiguamiento recomendado es 1%.

Si el sensor no puede obtener respuesta repetidamente el valor de amortiguamiento es ajustado automáticamente a 1% por el instrumento.

- **TIEMPO DE RECHAZO (RejTime)**

El ajuste de tiempo de rechazo es una poderosa función que permite al instrumento suprimir ecos falsos y los efectos de los objetivos transitorios como agitadores, salpicaduras y turbulencia.

El tiempo de rechazo se muestra en segundos. El valor de tiempo representa el número de segundos en que el instrumento debe recibir ecos repetidos procedentes de un nuevo objetivo ante de indicar la lectura.

El valor predeterminado es 8 segundos y debe ser ideal para la mayoría de aplicaciones. La disminución de este valor permite al instrumento responder más rápidamente a los cambios de nivel, y aumentar el valor de tiempo permite rechazar falsos ecos producidos por salpicaduras, fuertes turbulencias y vapor. La configuración mínima es de 1 segundo (por cambios de nivel rápido de hasta ½ pulgada/s ó 13 mm/s). La configuración máxima es de 85 segundos.

Si el sensor no puede obtener respuesta repetidamente el valor de tiempo de rechazo es ajustado automáticamente a 1 segundo por el instrumento.

ANEXO 3
DATOS EXPERIMENTALES

DATOS TOMADOS EXPERIMENTALMENTE						
	Canal Parshall		Canal Palmer-Bowlus		Vertedero	
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	7,810	3,417	10,110	3,698	10,910	3,046
1	7,816	3,424	10,110	3,697		
2	7,803	3,413	10,100	3,689		
3	7,795	3,408	10,100	3,682		
4	7,781	3,398	10,100	3,680		
5	7,743	3,373	10,090	3,679		
6	7,751	3,378	10,090	3,676		
7	7,761	3,384	10,090	3,671		
8	7,758	3,382	10,090	3,672		
9	7,758	3,382	10,090	3,679		
10	7,725	3,360	10,100	3,686		
PROMEDIO	7,773	3,393	10,097	3,683		
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	11,130	5,911	12,140	6,043	14,040	5,680
1	11,120	5,906	12,160	6,069		
2	11,140	5,917	12,150	6,060		
3	11,140	5,917	12,150	6,061		
4	11,130	5,917	12,150	6,061		
5	11,150	5,927	12,140	6,051		
6	11,150	5,925	12,150	6,054		
7	11,160	5,933	12,140	6,052		
8	11,160	5,937	12,140	6,044		
9	11,160	5,933	12,140	6,041		
10	11,160	5,940	12,130	6,036		
PROMEDIO	11,145	5,924	12,145	6,052		

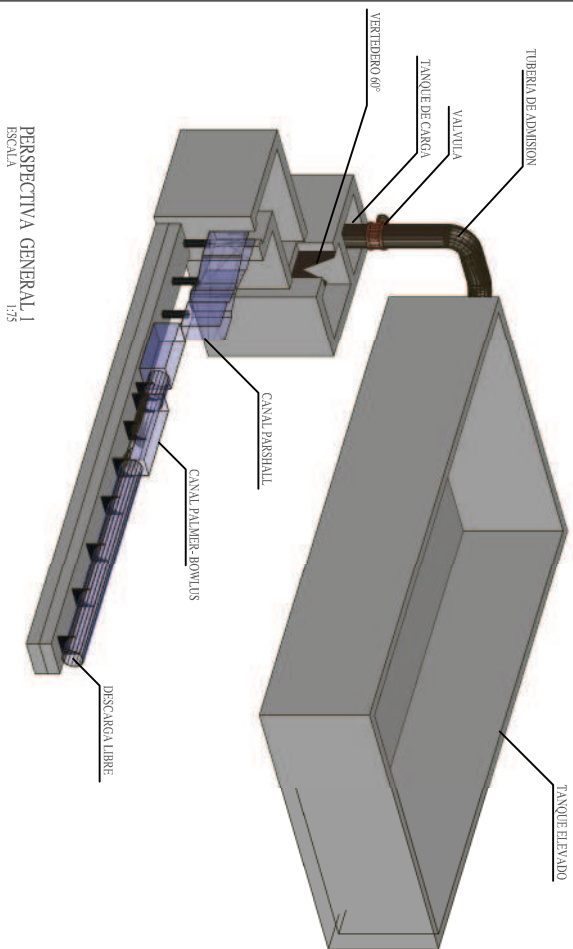
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	14,870	9,255	14,280	9,360	16,700	8,719
1	14,880	9,264	14,270	9,347		
2	14,880	9,270	14,270	9,347		
3	14,870	9,259	14,280	9,359		
4	14,860	9,247	14,280	9,360		
5	14,870	9,256	14,280	9,357		
6	14,870	9,252	14,290	9,365		
7	14,870	9,257	14,280	9,360		
8	14,870	9,255	14,280	9,357		
9	14,870	9,253	14,280	9,364		
10	14,870	9,258	14,290	9,370		
PROMEDIO	14,871	9,257	14,280	9,359		
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	17,870	12,290	15,990	12,700	18,930	11,882
1	17,880	12,310	15,990	12,690		
2	17,870	12,290	15,990	12,690		
3	17,870	12,300	15,990	12,700		
4	17,870	12,300	16,000	12,720		
5	17,880	12,310	15,990	12,700		
6	17,870	12,300	16,000	12,720		
7	17,870	12,300	16,000	12,710		
8	17,880	12,310	16,000	12,710		
9	17,880	12,310	16,000	12,710		
10	17,870	12,300	16,000	12,710		
PROMEDIO	17,874	12,302	15,995	12,705		
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	20,900	15,670	17,320	15,740	20,740	14,889
1	20,860	15,630	17,340	15,790		
2	20,880	15,640	17,340	15,800		
3	20,880	15,650	17,340	15,790		
4	20,880	15,640	17,330	15,770		
5	20,880	15,640	17,340	15,790		
PROMEDIO	20,880	15,645	17,335	15,780		

Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	23,620	18,930	18,450	18,660	22,430	18,067
1	23,580	18,890	18,450	18,670		
2	23,560	18,860	18,450	18,660		
3	23,550	18,850	18,460	18,680		
4	23,550	18,840	18,450	18,650		
5	23,540	18,830	18,450	18,660		
PROMEDIO	23,567	18,867	18,452	18,663		
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	25,920	21,870	19,630	22,060	23,820	20,960
1	25,960	21,910	19,620	22,010		
2	25,940	21,890	19,600	21,980		
3	25,950	21,900	19,620	22,030		
4	25,930	21,870	19,650	22,110		
5	25,940	21,890	19,640	22,090		
PROMEDIO	25,940	21,888	19,627	22,047		
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	28,070	24,720	20,480	24,730	25,090	23,829
1	28,080	24,740	20,520	24,860		
2	28,070	24,730	20,550	24,960		
3	28,070	24,720	20,520	24,860		
4	28,070	24,730	20,490	24,750		
5	28,070	24,730	20,490	24,750		
PROMEDIO	28,072	24,728	20,508	24,818		
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	29,870	27,220	21,360	27,700	26,200	26,518
1	29,880	27,230	21,370	27,720		
2	29,890	27,250	21,380	27,770		
3	29,880	27,240	21,390	27,780		
4	29,900	27,270	21,380	27,740		
5	29,890	27,260	21,370	27,730		
PROMEDIO	29,885	27,245	21,375	27,740		

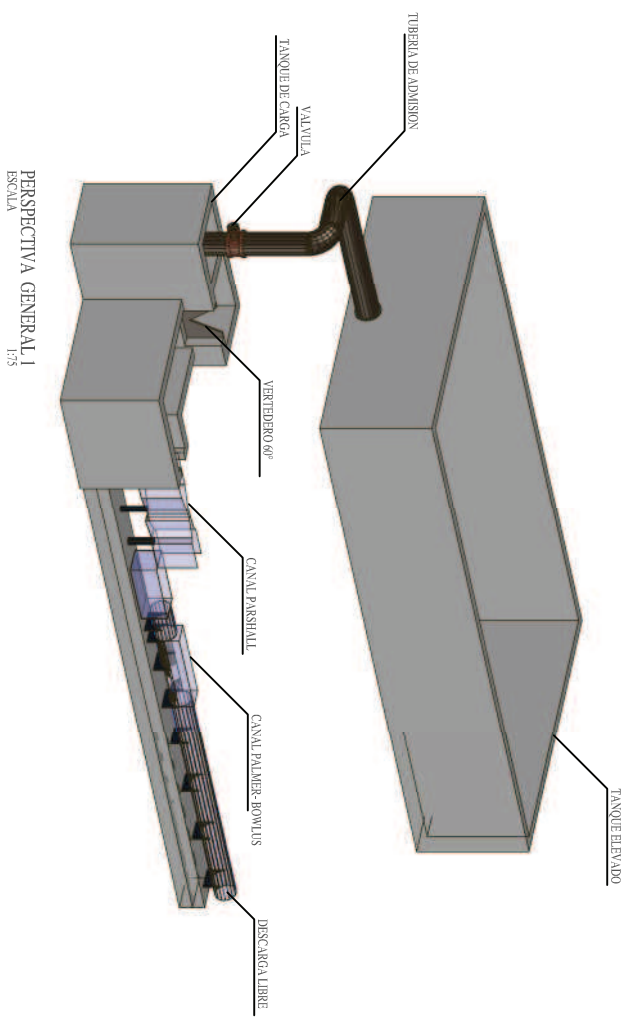
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	31,920	30,170	22,010	30,020	27,250	29,221
1	31,930	30,180	22,010	30,030		
2	31,920	30,170	22,010	30,000		
3	31,920	30,170	21,990	29,950		
4	31,930	30,180	22,010	30,000		
5	31,920	30,160	22,010	30,020		
PROMEDIO	31,923	30,172	22,007	30,003		
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	33,840	33,020	23,020	33,850	28,240	31,913
1	33,850	33,030	23,030	33,900		
2	33,860	33,050	23,020	33,870		
3	33,850	33,030	23,020	33,880		
4	33,830	33,000	23,040	33,930		
5	33,840	33,020	23,030	33,900		
PROMEDIO	33,845	33,025	23,027	33,888		
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	36,790	37,580	23,680	36,550	29,810	36,476
1	36,800	37,590	23,690	36,570		
2	36,780	37,560	23,700	36,620		
3	36,780	37,570	23,690	36,590		
4	36,790	37,580	23,690	36,580		
5	36,780	37,570	23,680	36,550		
PROMEDIO	36,787	37,575	23,688	36,577		
Minuto	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)	h(cm)	Q(l/s)
0	39,470	41,910	24,540	40,250	30,910	39,892
1	39,470	41,900	24,540	40,240		
2	39,460	41,880	24,540	40,200		
3	39,460	41,890	24,530	40,180		
4	39,460	41,890	24,510	40,110		
5	39,460	41,890	24,510	40,100		
PROMEDIO	39,463	41,893	24,528	40,180		

ANEXO 4

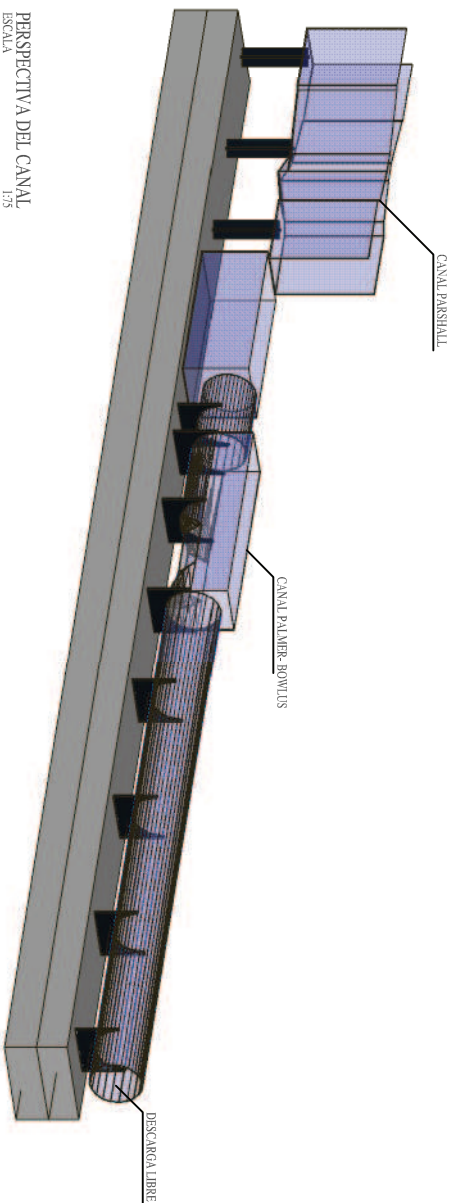
PLANOS



PERSPECTIVA GENERAL 1
ESCALA 1/75



PERSPECTIVA GENERAL 1
ESCALA 1/75



PERSPECTIVA DEL CANAL
ESCALA 1/75



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO

ALUMNO:

ANÁLISIS DE MEDIDORES DE CAUDAL PARA FLUJO
SUBCRÍTICO EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

CONTIENE:

INSTALACIONES DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA FICSA
MODELOS PARA MEDICIÓN DE CAUDAL

ALUMNO:

CRISTINA ALEXANDRA TORRES JACOBOWITZ - EDUARDO MAURICIO VASQUEZ FALCONES

DIRECTOR:

DR. ING. MARCO CASTRO DELGADO

ESCALA: INDICADAS

FECHA: AGOSTO 2010

ARCHIVO: ANEXO 4

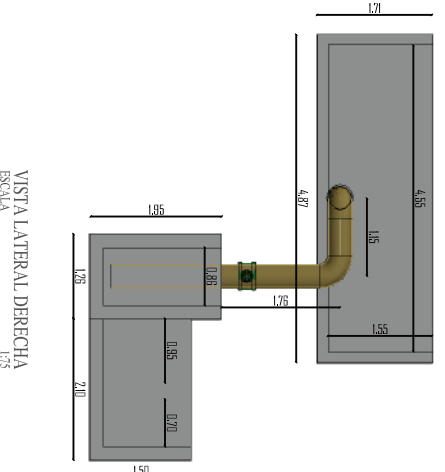
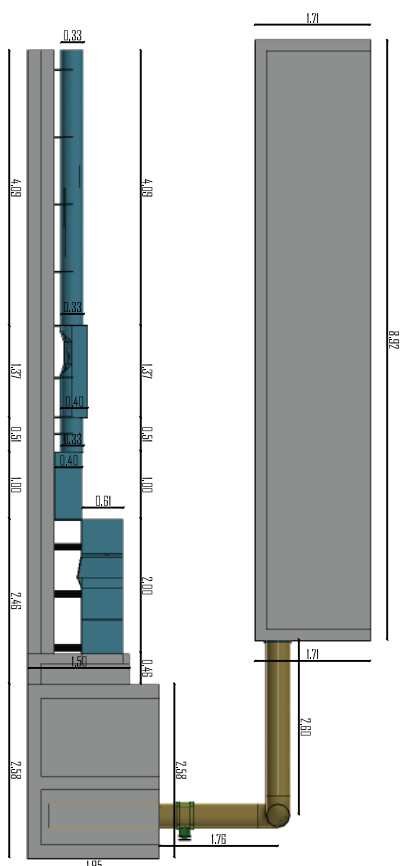
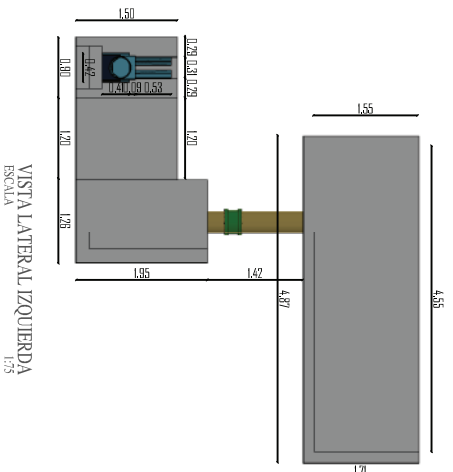
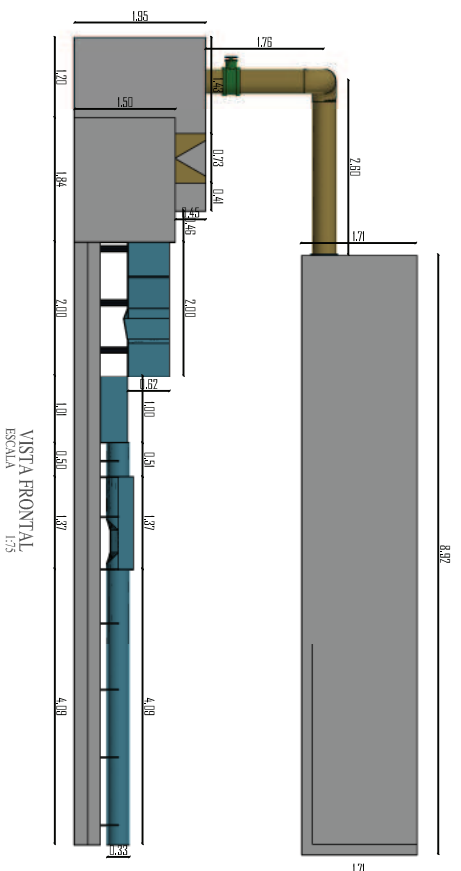
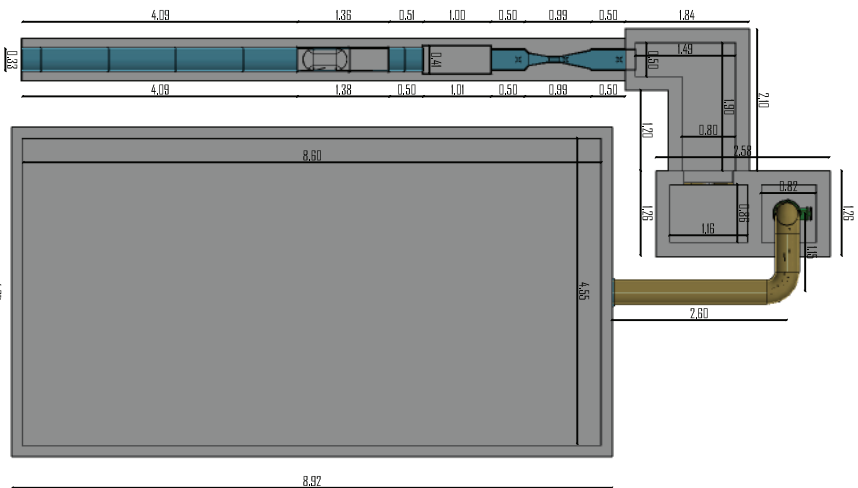
LÁMINA N°: 1 DE 4



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO



ALUMNO:

ANÁLISIS DE MEDIDORES DE CAUDAL PARA FLUJO SUBCRÍTICO EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

CONTIENE:

INSTALACIONES DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA FICCA
MODELOS PARA MEDICION DE CAUDAL

ALUMNO:

CRISTINA ALEXANDRA TORRES JACOBOWITZ - EDUARDO MAURICIO VASQUEZ FALCONES

DIRECTOR:

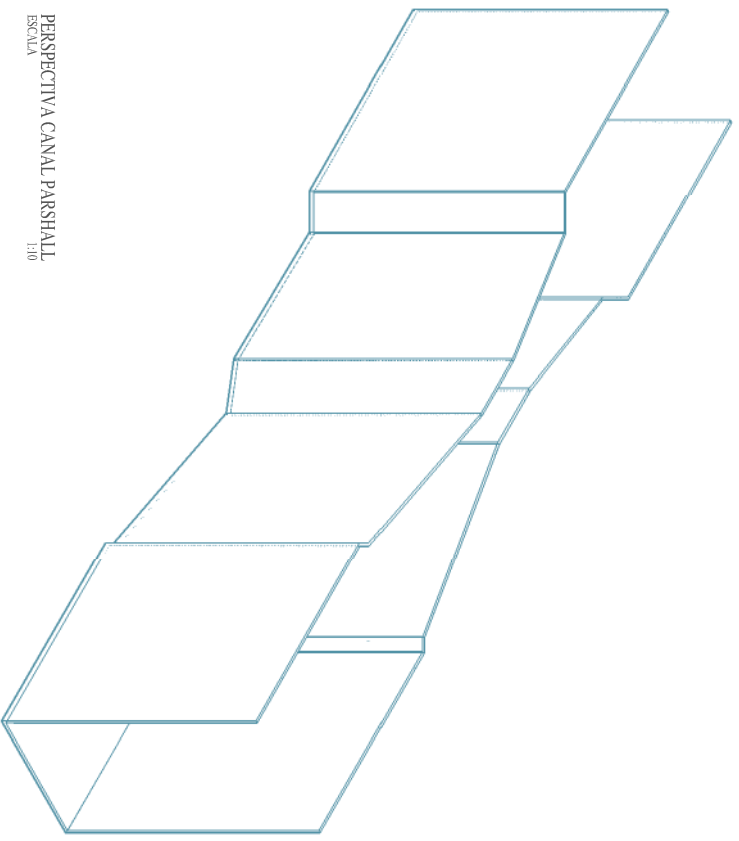
DR. ING. MARCO CASTRO DELGADO

ESCALA: INDICADAS

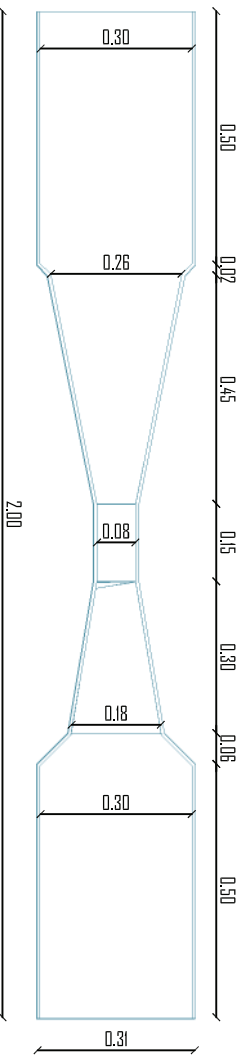
FECHA: AGOSTO 2010

ARCHIVO: ANEXO 4

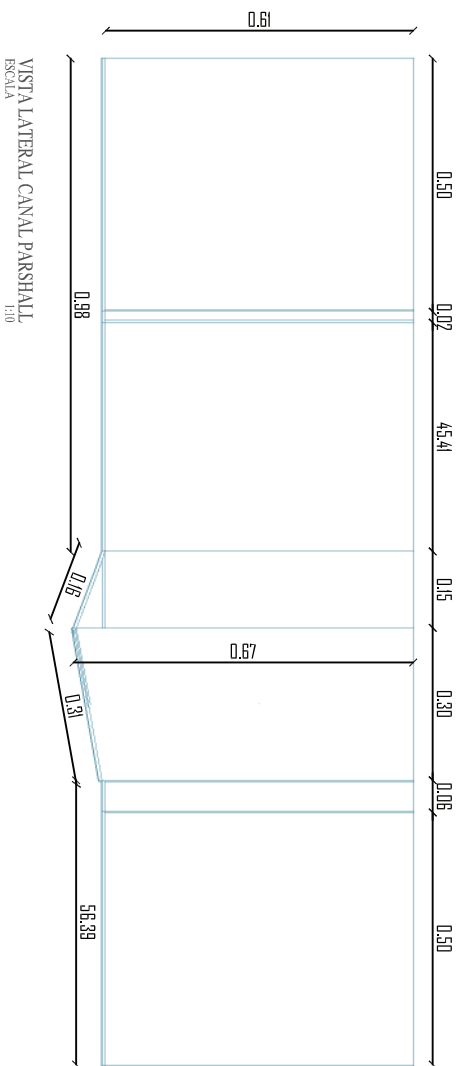
LÁMINA N°: 2 DE 4



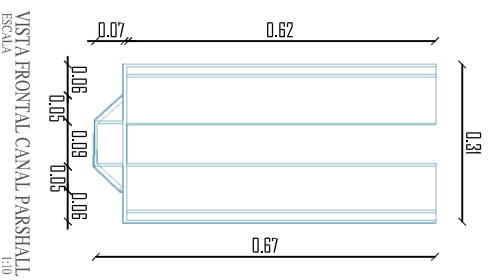
PERSPECTIVA CANAL PARSHALL
ESCALA 1:10



PLANTA CANAL PARSHALL
ESCALA 1:10



VISTA LATERAL CANAL PARSHALL
ESCALA 1:10



VISTA FRONTAL CANAL PARSHALL
ESCALA 1:10



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO

ALUMNO:

CONTIENE:

CANAL DE AFORO - PARSHALL

ANÁLISIS DE MEDIDORES DE CAUDAL PARA FLUJO
SUBCRÍTICO EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

ALUMNO:

CRISTINA ALEXANDRA TORRES JACOBOWITZ - EDUARDO MAURICIO VASQUEZ FALCONES

DIRECTOR:

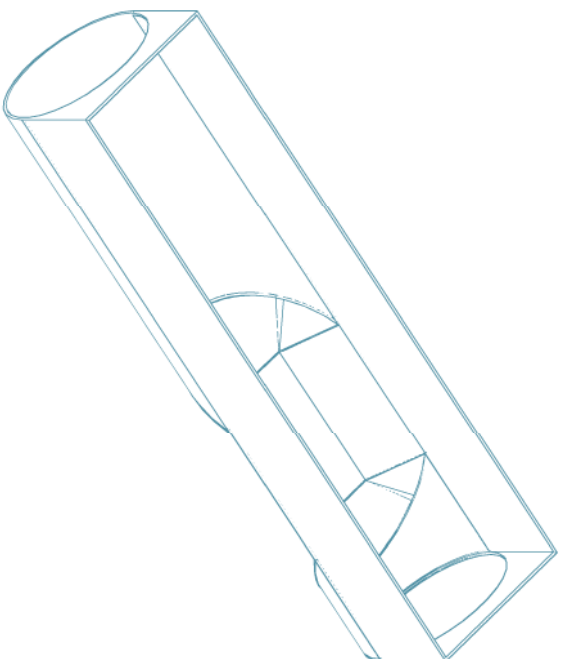
DR. ING. MARCO CASTRO DELGADO

ESCALA: INDICADAS

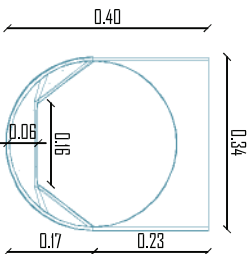
FECHA: AGOSTO 2010

ARCHIVO: ANEXO 4

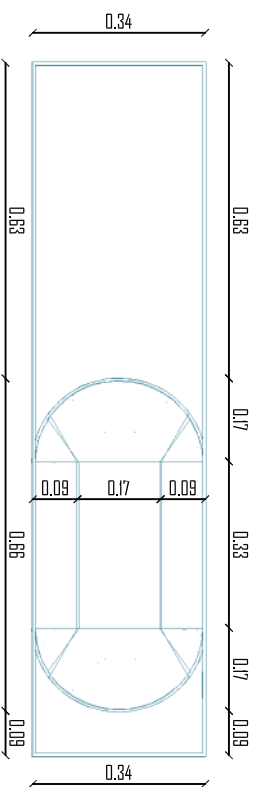
LÁMINA Nº: 3 DE 4



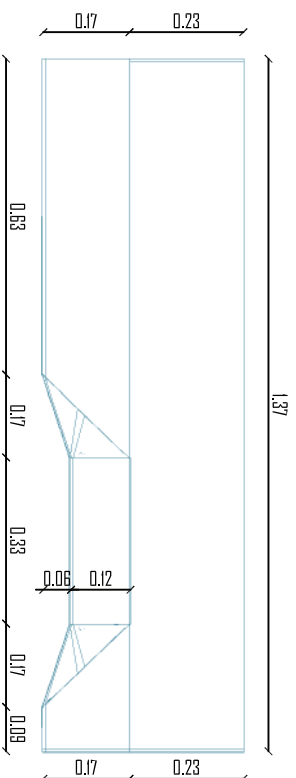
PERSPECTIVA DEL CANAL PALMER - BOWLUS
ESCALA 1:10



VISTA LATERAL DEL CANAL PALMER - BOWLUS
ESCALA 1:10



PLANTA DEL CANAL PALMER BOWLUS
ESCALA 1:10



VISTA LATERAL DEL CANAL PALMER BOWLUS
ESCALA 1:10



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO

ALUMNO:

ANÁLISIS DE MEDIDORES DE CAUDAL PARA FLUJO
SUBCRÍTICO EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO

CONTIENE:

CANAL DE AFORO PALMER - BOWLUS

ESCALA: INDICADAS

FECHA: AGOSTO 2010

ARCHIVO: ANEXO 4

ALUMNO:
CRISTINA ALEXANDRA TORRES JACOBOWITZ - EDUARDO MAURICIO VASQUEZ FALCONES

DIRECTOR:
DR. ING. MARCO CASTRO DELGADO

LÁMINA N.º: 4 DE 4