



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

In Scientia Et Fide Est Fortitudo Nostra

FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL Y DEL
AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

MODELAMIENTO HIDRÁULICO PARA EL ESTUDIO DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN CIMACIOS CON TRAMPOLINES

T E S I S

PARA OPTAR EL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JUAN MANUEL PÉRCY COAGUILA RODRÍGUEZ

ASESOR DE TESIS:

ING. VICTOR OSCAR RENDÓN DÁVILA

AREQUIPA-PERÚ

2016



AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios por haberme guiado por todo el camino a lo largo de mi vida; en segundo lugar a cada uno de los que son parte de mi familia a mi MADRE Maria Rodríguez Zeballos, mi PADRE Juan Coaguila López, , mi segunda madre MI ABUELA Luz María Zeballos Galarza, por siempre motivarme a salir hacia adelante.

A mis hermanos María Alejandra y Josué Coaguila Rodríguez; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora. Y no puedo dejar de mencionar a mi asesor el Ingeniero Victor Rendón Dávila quien me guio a lo largo de todo el proyecto y también al Ingeniero Wilson Rojas Gómez que gracias a su apoyo pude iniciar este trabajo.

Juan Manuel Pércy Coaguila Rodríguez



DEDICATORIA

La concepción de este proyecto está dedicada a mis
padres Juan Coaguila Lopez y María Rodríguez
Zeballos, mi Mama Luz María Zeballos Galarza,
pilares fundamentales en mi vida. Sin ellos, jamás
hubiese podido conseguir lo que tengo hasta ahora. Su
tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran
ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para
mis hermanos. También a todos mis amigos haciendo
una mención especial a Fernando Calla Deza y Jeniffer
Torres Almirón, quienes estuvieron siempre conmigo
a lo largo de toda mi carrera universitaria.

Juan Manuel Pércy Coaguila Rodríguez



RESUMEN

La presente investigación está relacionada con el modelamiento hidráulico en aliviaderos tipo cimacio de presas que presenten como su disipador de energía el trampolín de lanzamiento, con el motivo principal de evaluar la disipación de energía, variando los caudales tomando valores desde 4.256 l/s a 27.256 l/s, también se varió el radio del chucharón radio de 5cm a 15 cm y su ángulo de salida de 30° a 45°, además se comparó la influencia que tiene la presencia de deflectores rectangulares. Para las pruebas fueron construidos un sistema de recirculación de flujos que incluye: una piscina de almacenamiento de hasta 1600 l, un canal de 6.60m de largo 0.40m de ancho y una altura que va de 0.70m a 0.20m, un sistema de tuberías con bombas y un perfil de cimacio de 0.30m de ancho y 0.40m de alto.

Además para la disipación de energía se realizaron pruebas con una piscina de inmersión, donde caía el chorro de agua después de haber sido lanzado por el trampolín realizando pruebas en las que se varió la altura de la piscina desde 0 hasta 20 cm.

Se midieron también las longitudes y alturas máximas alcanzadas por el chorro de agua lanzado por el trampolín, comparándolas con las ecuaciones básicas de la cinemática, también se midieron las presiones máximas que se dan en el cucharón comparándolas con ecuaciones de estudios empíricos realizados por otros autores.

Para la cantidad de energía disipada se obtuvo que hubo una variación del 77% al 91% para todos los tipos de trampolín, concluyendo que el factor más significativo de la disipación de energía es la presencia de la piscina de inmersión.

Los otros factores como el radio y ángulo de salida, se deberán diseñar en base a parámetros como el caudal unitario, y la trayectoria que se desee que siga el chorro de agua.

La presencia de los deflectores hace que el chorro de agua sea lanzado por dos ángulos diferentes, por lo que al momento de alcanzar la superficie de cauce abarca una mayor área dando como resultado una menor socavación.



ABSTRACT

This research is related to the hydraulic modeling spillways Creager type of dam presenting as its energy dissipators the deflector Bucket, with the main reason for assessing the energy dissipation varying flows taking values from 4.256 l / s to 27,256 l / s, the radius of 5cm Bucket was also varied to 15 cm and its exit angle of 30° to 45°, also the influence of the presence of rectangular teeth are compared. For the tests were constructed a recirculation system flow including: a plunge pool of up to 1600 l, a channel of 6.60m long 0.40m wide and a height ranging from 0.70m a 0.20m, a piping system with bomb and spillway profile of 0.30m 0.40m wide and high.

In addition to energy dissipation tests were performed with a plunge pool where the water jet fell after being released by the trampoline conducting tests in which the height of the pool ranges from 0-20 cm.

lengths and maximum heights reached by the jet of water released by the trampoline, comparing them with the basic equations of kinematics were also measured, the maximum pressure given in the bucket by other authors were also measured by comparing them with equations of empirical studies .

For the amount of dissipated energy was obtained which was a variation of 77% to 91% for all types of trampoline, concluding that the most significant factor of energy dissipation is the presence of the plunge pool.

Other factors such as the radius and angle output should be designed based on parameters such as flow rate, and the path you want to follow the stream of water.

The presence of teeth makes the water jet is released by two different angles, so when reaching the surface channel covers greater resulting in lower undercut area.



CONTENIDO

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
DEFINICIONES.....	XII
LISTADO DE FIGURAS.....	XV
LISTADO DE TABLAS.....	XIX
LISTADO DE FOTOGRAFÍAS.....	XXII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Marco teórico.....	2
1.2.1. Introducción:.....	2
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN.....	3
2.1. Objetivo principal.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. ALIVIADEROS EN PRESAS.....	4
3.1. Introducción.....	4
3.2. Partes de un aliviadero.....	4
3.3. Tipos de Aliviaderos.....	5
3.4. Diseño de un aliviadero que se ajusta a la lámina vertiente.....	11
4. DISIPADORES DE ENERGIA EN PRESAS.....	17
4.1. Definición de disipador de energía.....	17
4.2. Tipos de disipadores de energía.....	17
5. CARACTERÍSTICAS DE LOS TRAMPOLINES DE LANZAMIENTO.....	23
5.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS.....	23
5.1.1. RADIO DE CURVATURA DEL CUCHARÓN.....	23
5.1.2. ÁNGULO DE LANZAMIENTO.....	26
5.1.3. ELEVACION DEL LANZAMIENTO.....	31
5.2. CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS.....	32
5.2.1. PRESIONES EN EL CUCHARÓN.....	32
5.2.2. VELOCIDADES SOBRE EL TRAMPOLÍN.....	36
5.2.2.1. VELOCIDAD DEL FLUJO DE APROXIMACIÓN.....	36
5.2.2.2. VELOCIDAD SOBRE EL CUCHARÓN DEL TRAMPOLÍN.....	37
6. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS PARA LA REALIZACIÓN DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO.....	38
6.1. INTRODUCCIÓN.....	38
6.2. DISEÑO.....	38



6.2.1.	DIMENSIONES DEL CANAL	38
6.2.2.	CAUDAL.....	40
6.2.3.	ALIVIADERO QUE SE AJUSTA A LA LÁMINA VERTIENTE	48
6.3.	CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN	53
6.3.1.	CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL CANAL	53
6.3.1.1.	Herramientas.....	53
6.3.1.2.	Materiales	53
6.3.1.3.	Procedimiento de construcción.....	53
6.3.2.	INSTALACIÓN DE LA PISCINA DE ALMACENAMIENTO	56
6.3.3.	INSTALACIÓN DE LAS BOMBAS, TUBERÍAS DE SUCCIÓN, TUBERÍAS DE IMPULSIÓN Y ACCESORIOS.....	56
6.3.3.1.	Herramientas.....	56
6.3.3.2.	Materiales	56
6.3.3.3.	Procedimiento de construcción.....	57
6.3.4.	CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LOS MODELOS EN PERFIL DE CIMACIO.....	59
6.3.4.1.	Construcción	59
6.3.4.2.	Instalación	62
7.	ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD.....	66
7.1.	INTRODUCCIÓN.....	66
7.2.	DEFINICIONES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	67
7.3.	TEOREMA DE BUCKINGHAN-PI	68
7.3.1.	Aplicación práctica del teorema	68
7.3.2.	Expresión de las magnitudes físicas en los sistemas $\{[M] [L][T][\theta]\}$ ó $\{[F][L][T][\theta]\}$	70
7.4.	SIMILITUD HIDRÁULICA	71
7.4.1.	Introducción.....	71
7.4.2.	Tipos de similitud	72
7.4.2.1.	Similitud geométrica.....	72
7.4.2.2.	Similitud cinemática	74
7.4.2.3.	Similitud dinámica	74
7.4.3.	Similitud de Froude	76
7.4.4.	Similitud de Reynolds	77
7.4.5.	Relaciones de escala en los problemas de similitud	78
7.5.	ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA EL MODELAMIENTO DE UN CIMACIO CON TRAMPOLÍN.....	79



7.5.1.	ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA LA ENERGÍA DISIPADA	79
7.5.2.	ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA LA PRESIÓN SOBRE EL CUCHARÓN DEL TRAMPOLÍN	83
7.5.3.	CÁLCULO DE LOS CAUDALES EN EL PROTOTIPO SEGÚN LA SIMILITUD DE FROUDE	86
8.	MODELAMIENTO EN CIMACIOS CON TRAMPOLINES DE LANZAMIENTO	87
8.1.	INTRODUCCIÓN	87
8.2.	MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS	87
8.2.1.	CAUDAL	87
8.2.1.1.	BOMBA 2" X 2" Nro 1.....	89
8.2.1.2.	BOMBA 3" X 3" Nro 2.....	89
8.2.1.3.	BOMBA 3" X 3".....	89
8.2.2.	VELOCIDAD	90
8.2.2.1.	Velocidad Media.....	90
8.2.3.	TIRANTE	90
8.3.	DATOS OBTENIDOS DEL MODELAMIENTO	90
8.3.1.	MODELO DE CONTROL	91
8.3.1.1.	Sin piscina de inmersión.....	91
8.3.1.2.	Con piscina de inmersión h=0.10m.....	92
8.3.1.3.	Con piscina de inmersión h=0.20m.....	92
8.3.2.	TIRANTES AGUAS ABAJO GENERADOS POR LOS TRAMPOLINES	92
8.3.2.1.	RADIO IGUAL A 5.00 cm	93
8.3.2.1.1.	ANGULO IGUAL A 30°	93
8.3.2.1.1.1.	Sin deflectores	93
8.3.2.1.1.2.	Con deflectores.....	93
8.3.2.1.2.	ANGULO IGUAL A 45°	93
8.3.2.1.2.1.	Sin deflectores	93
8.3.2.1.2.2.	Con deflectores.....	94
8.3.2.2.	RADIO IGUAL A 10.00 cm	94
8.3.2.2.1.	ANGULO IGUAL A 30°	94
8.3.2.2.1.1.	Sin deflectores	94
8.3.2.2.1.2.	Con deflectores.....	94
8.3.2.2.2.	ANGULO IGUAL A 45°	95
8.3.2.2.2.1.	Sin deflectores	95
8.3.2.2.2.2.	Con deflectores.....	95
8.3.2.3.	RADIO IGUAL A 15.00 cm	95



8.3.2.3.1.	ANGULO IGUAL A 30°	95
8.3.2.3.1.1.	Sin deflectores	95
8.3.2.3.1.2.	Con deflectores.....	96
8.3.2.3.2.	ANGULO IGUAL A 45°	96
8.3.2.3.2.1.	Sin deflectores	96
8.3.2.3.2.2.	Con deflectores.....	96
8.3.2.4.	Con piscina de inmersión h=0.10m.....	97
8.3.2.5.	Con piscina de inmersión h=0.00m.....	97
8.3.3.	PRESIONES SOBRE EL CUCHARÓN.....	97
8.3.3.1.	RADIO IGUAL A 5.00 cm	97
8.3.3.1.1.	ANGULO IGUAL A 30°.....	97
8.3.3.1.1.1.	Sin deflectores	97
8.3.3.1.1.2.	Con deflectores.....	98
8.3.3.1.2.	ANGULO IGUAL A 45°	98
8.3.3.1.2.1.	Sin deflectores	98
8.3.3.1.2.2.	Con deflectores.....	98
8.3.3.2.	RADIO IGUAL A 10.00 cm	99
8.3.3.2.1.	ANGULO IGUAL A 30°	99
8.3.3.2.1.1.	Sin deflectores	99
8.3.3.2.1.2.	Con deflectores.....	99
8.3.3.2.2.	ANGULO IGUAL A 45°	99
8.3.3.2.2.1.	Sin deflectores	99
8.3.3.2.2.2.	Con deflectores.....	100
8.3.3.3.	RADIO IGUAL A 15.00 cm	100
8.3.3.3.1.	ANGULO IGUAL A 30°	100
8.3.3.3.1.1.	Sin deflectores	100
8.3.3.3.1.2.	Con deflectores.....	100
8.3.3.3.2.	ANGULO IGUAL A 45°	101
8.3.3.3.2.1.	Sin deflectores	101
8.3.3.3.2.2.	Con deflectores.....	101
8.3.4.	LONGITUDES ALCANZADAS Y ALTURAS MÁXIMAS DEL FLUJO LANZADO	101
8.3.4.1.	RADIO IGUAL A 5.00 cm	102
8.3.4.1.1.	ANGULO IGUAL A 30°	102
8.3.4.1.1.1.	Sin deflectores	102
8.3.4.1.1.2.	Con deflectores.....	102



8.3.4.1.2.	ANGULO IGUAL A 45°	103
8.3.4.1.2.1.	Sin deflectores	103
8.3.4.1.2.2.	Con deflectores.....	103
8.3.4.2.	RADIO IGUAL A 10.00 cm	103
8.3.4.2.1.	ANGULO IGUAL A 30°	103
8.3.4.2.1.1.	Sin deflectores	103
8.3.4.2.1.2.	Con deflectores.....	103
8.3.4.2.2.	ANGULO IGUAL A 45°	104
8.3.4.2.2.1.	Sin deflectores	104
8.3.4.2.2.2.	Con deflectores.....	104
8.3.4.3.	RADIO IGUAL A 15.00 cm	104
8.3.4.3.1.	ANGULO IGUAL A 30°	104
8.3.4.3.1.1.	Sin deflectores	104
8.3.4.3.1.2.	Con deflectores.....	104
8.3.4.3.2.	ANGULO IGUAL A 45°	105
8.3.4.3.2.1.	Sin deflectores	105
8.3.4.3.2.2.	Con deflectores.....	105
8.3.5.	TIRANTES DEL FLUJO DE APROXIMACIÓN AL CUCHARÓN	105
8.4.	NOTAS.....	105
9.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	106
9.1.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DISIPACION DE ENERGIA EN LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DEL TRAMPOLIN	110
9.2.	COMPARACION DE LAS PRESIONES EXPERIMENTALES PRESENTADAS SOBRE EL CUCHARÓN Y LAS PRESIONES TEÓRICAS DADAS EN LAS ECUACIONES 5.26 Y 5.27	119
9.2.1.	RADIO IGUAL A 5cm.....	119
9.2.2.	RADIO IGUAL A 10cm.....	121
9.2.3.	RADIO IGUAL A 15cm.....	123
9.3.	COMPARACION DE LAS ALTURAS Y LONGITUDES MÁXIMAS ALCANZADAS DEL MODELAMIENTO.....	125
9.3.1.	RADIO IGUAL A 15.00 CM	125
9.3.2.	RADIO IGUAL A 10.00 CM	126
9.3.3.	RADIO IGUAL A 5.00 CM	127
9.4.	COMPARACION DE LAS ALTURAS Y LONGITUDES MÁXIMAS ALCANZADAS EXPERIMENTALES Y TEÓRICAS DE LA ECUACIÓN 5.14.....	128
9.4.1.	RADIO 5.00 CM ANG. 30° SIN DEFLECTORES	128
9.4.2.	RADIO 5.00 CM ANG. 45° SIN DEFLECTORES	129



9.4.3.	RADIO 5.00 CM ANG. 30° CON DEFLECTORES	130
9.4.4.	RADIO 5.00 CM ANG. 45° CON DEFLECTORES	131
9.4.5.	RADIO 10.00 CM ANG. 30° SIN DEFLECTORES	132
9.4.6.	RADIO 10.00 CM ANG. 45° SIN DEFLECTORES	133
9.4.7.	RADIO 10.00 CM ANG. 30° CON DEFLECTORES	134
9.4.8.	RADIO 10.00 CM ANG. 45° COM DEFLECTORES.....	135
9.4.9.	RADIO 15.00 CM ANG. 30° SIN DEFLECTORES	136
9.4.10.	RADIO 15.00 CM ANG. 45° SIN DEFLECTORES	137
9.4.11.	RADIO 15.00 CM ANG. 30° CON DEFLECTORES	138
9.4.12.	RADIO 15.00 CM ANG. 45° CON DEFLECTORES	139
9.5.	COMPARACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON RESPECTO A LA VARIACIÓN DE TODOS LOS PARÁMETROS ESTUDIADOS	140
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	146
11.	BIBLIOGRAFÍA	151



DEFINICIONES

- **Aliviadero:**
Es una estructura hidráulica que forma parte de la presa la cual permite evacuar el agua sobrante así como el agua de las avenidas que no cabe en el volumen de almacenamiento disponible del embalse.
- **Cimacio:**
Es un tipo de aliviadero el cual tiene la forma de una “S” y permite evacuar de una manera segura el agua proveniente del embalse de la presa ajustándose su forma al perfil del agua vertiente que llega al él.
- **Capa Límite:**
Es la capa de agua por debajo de una línea imaginaria trazada en un flujo que discurre por un canal la cual representa la variación de la distribución de velocidades debido a la rugosidad de contorno.
- **Canal:**
Es un conducto por el cual el agua fluye con una superficie libre.
- **Comprensibilidad:**
La comprensibilidad de un fluido es una medida del cambio de volumen (y por lo tanto de su densidad) cuando se somete a diversas presiones.
- **Densidad:**
La densidad representa la masa de fluido contenida en una unidad de volumen, matemáticamente la densidad en un punto queda definida como:
$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V}$$
- **Disipador de energía:**
Es una estructura presente en la mayoría aliviadero de presas, la cual tiene como función disminuir la cantidad de energía que presenta el agua a la salida del aliviadero para evitar posibles deterioros de la estructura de la presa así como erosiones al pie de esta.
- **Embalse:**
Es la masa de agua contenida por la presa la cual puede ser destinada a diversos usos como: abastecimiento de agua a poblaciones, riego de terrenos, producción de fuerza motriz, etc.
- **Flujo:**
Se denomina flujo al movimiento de un fluido pudiendo este darse en condiciones de presión o con una superficie libre.
- **Fluido:**
Se define fluido como una sustancia que sufre una deformación continua cuando se le aplica un esfuerzo cortante muy pequeño.
- **Fluido Newtoniano:**
Se llama fluido Newtoniano a aquellos en los cuales el esfuerzo tangencial es proporcional al gradiente transversal de velocidades $\partial v / \partial y$; matemáticamente se puede expresar:



$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y}$$

Donde la constante de proporcionalidad μ es una magnitud característica de la viscosidad del fluido y se conoce como viscosidad dinámica.

- **Flujo Uniforme:**

Es el flujo en el cual su profundidad es la misma en cada sección del canal o su tirante permanece constante a lo largo de un espacio determinado.

- **Flujo Gradualmente Variado**

Es un tipo de flujo variado (no uniforme) permanente en el cual la profundidad del agua cambia de manera gradual a lo largo de una distancia.

- **Flujo Rápidamente Variado**

- Es un tipo de flujo variado (no uniforme) permanente en el cual la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias relativamente cortas. También se conoce como fenómeno local, algunos ejemplos son el resalto hidráulico y la caída hidráulica.

- **Número de Froude:**

Es el número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales y se expresa como:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}}$$

Donde “v” es la velocidad media del flujo, “g” es la constante gravitacional y “l” es la longitud característica.

Este número tiene importancia en flujos con velocidades grandes que ocurren por la acción exclusiva de la gravedad.

- **Número de Reynolds:**

Es el número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas y se expresa como:

$$Re = \frac{vl}{\nu}$$

Donde “v” es la velocidad media del flujo, “ ν ” es la viscosidad cinemática y “l” es la longitud característica.

Este número tiene importancia en flujos con poca velocidad donde las fuerzas viscosas son las más importantes.

- **Número de Weber:**

Es el número adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas de tensión superficial se expresa como:

$$We = \frac{v^2}{\sigma/\rho l}$$

Donde “v” es la velocidad media del flujo, “ σ ” es la viscosidad cinemática, “ ρ ” la densidad del fluido y “l” es la longitud característica.

- **Peso Específico:**

Representa el peso del fluido por unidad de volumen y se relaciona con la densidad como:

$$\gamma = \rho g$$

- **Presa:**

Es una estructura hidráulica que se construye para almacenar agua en periodos de abundancia y utilizarla cuando escasee.

- **Rugosidad:**



Es el conjunto de irregularidades que presenta una superficie.

▪ **Sedimentación:**

La sedimentación es el proceso por el cual el sedimento en movimiento se deposita. Un tipo común de sedimentación ocurre cuando el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo de un río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para ese fin.

▪ **Socavación:**

La socavación es el resultado de la acción erosiva del flujo de agua que arranca y acarrea material de lecho y de las bancas de un cauce.

▪ **Vertedero:**

Es una estructura hidráulica que consiste en un muro o una placa y existe una descarga de líquido por encima de este, su principal función es el aforo de caudales en canales o estructuras que presenten una superficie libre.

▪ **Viscosidad:**

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a fluir, como resultado de la interacción y cohesión de sus moléculas.





LISTADO DE FIGURAS

CAPÍTULO 01

FIGURA 1.1 Cimacio en una presa con su disipador en salto de esquí presenta por debajo del salto la central eléctrica.....	1
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

CAPÍTULO 03

FIGURA 3.1 Disposición de un aliviadero en caída libre.....	5
FIGURA 3.2 Aliviadero en canal lateral con cuenco disipador.....	6
FIGURA 3.3 Aliviadero tipo orificio con compuertas.....	7
FIGURA 3.4 Aliviadero en Caliz o Morning Glory.....	8
FIGURA 3.5 Aliviadero de Laberinto de 3 módulos.....	9
FIGURA 3.6 Aliviadero en conducción Cerrada o Tunel.....	9
FIGURA 3.7 Aliviadero escalonado.....	10
FIGURA 3.8 Elementos de perfil de un vertedero estricto.....	11
FIGURA 3.9 Elementos de descarga de un vertedero estricto con paramento Vertical.....	13
FIGURA 3.10 Coeficientes que definen el perfil de un vertedero estricto.....	14
FIGURA 3.11 Coeficientes que definen el perfil de un vertedero estricto.....	15
FIGURA 3.12 Perfil de un vertedero estricto definido por composición de Curvas circulares.....	16

CAPÍTULO 04

FIGURA 4.1 Aliviadero de la presa Sayano Susenskaya-Argentina.....	18
FIGURA 4.2 Cuenco disipador tipo I	18
FIGURA 4.3 Cuenco disipador tipo II	19
FIGURA 4.4 Cuenco disipador tipo III	19
FIGURA 4.5 Cuenco disipador tipo III	20
FIGURA 4.6 Trampolín de la presa Srisailam-India	21
FIGURA 4.7 Trampolín de la presa Ralco-Chile	21
FIGURA 4.8 Partes Involucradas en el lanzamiento de un chorro por un Trampolín.....	22



CAPÍTULO 05

FIGURA 5.1	Nomenclatura utilizada para la definición del radio de la curvatura de un trampolín expresada gráficamente.....	25
FIGURA 5.2	Trayectorias de lanzamiento por un trampolín para diferentes ángulos de salida.....	28
FIGURA 5.3	Representación gráfica de la variación de la distancia horizontal con respecto a la pendiente de lanzamiento del labio de un trampolín para pendientes mayores a 1.....	29
FIGURA 5.4	Representación gráfica de la variación de la distancia horizontal con respecto a la pendiente de lanzamiento del labio de un trampolín para pendientes menores a 1.....	29
FIGURA 5.5	Comparación de chorros lanzados por distintos ángulos.....	30
FIGURA 5.6	Abaco que indica los valores de elevación de un trampolín para que exista o no sumergencia de este aguas abajo.....	31
FIGURA 5.7	Representación gráfica de la nomenclatura utilizada en la Fig.5.6....	31
FIGURA 5.8	Diagrama de distribución de presiones en curvatura cóncava.....	32
FIGURA 5.9	Presiones teóricas en un trampolín.....	34
FIGURA 5.10	Presiones en un trampolín según modelo y prototipo.....	35
FIGURA 5.11	Curvas para determinar la velocidad del flujo de aproximación.....	36
FIGURA 5.12	Representación gráfica de la nomenclatura utilizada para definir la velocidad de flujo en el cucharón de un trampolín.....	37

CAPÍTULO 06

FIGURA 6.1	Dimensiones del canal utilizado para el modelamiento.....	39
FIGURA 6.2	Dibujo en elevación del sistema de recirculación.....	41
FIGURA 6.3	Dibujo en 3D del sistema de recirculación.....	42
FIGURA 6.4	Diagrama universal de Moddy.....	44
FIGURA 6.5	Longitud de coronación del aliviadero con estribos del modelo a escala 1/50.....	48
FIGURA 6.6	Curva compuesta de la figura 3.11 con los radios en el prototipo....	51
FIGURA 6.7	Perfil del aliviadero a ser modelado.....	52
FIGURA 6.8	Perfiles que se construyeron en madera.....	59

CAPÍTULO 07

FIGURA 7.1	Similitud dinámica entre dos flujos del modelo y el prototipo (a y b)	73
FIGURA 7.2	Nomenclatura expresada gráficamente para el análisis dimensional	80
FIGURA 7.3	Cálculo de los caudales para diferentes escalas.....	86



CAPÍTULO 08

FIGURA 8.1	Aforado del Caudal.....	88
FIGURA 8.2	Control del caudal durante los ensayos mediante la altura de carga..	88
FIGURA 8.3	Medición de la longitud del alcance del flujo lanzado.....	102

CAPÍTULO 09

FIGURA 9.1	Calados modelo de control-Sección 01(2.00m).....	110
FIGURA 9.2	Calados modelo de control-Sección 02(2.50m).....	110
FIGURA 9.3	Calados trampolín con radio=5.00cm Sección 01 (2.00m).....	111
FIGURA 9.4	Calados trampolín con radio=5.00cm Sección 02 (2.50m).....	111
FIGURA 9.5	Calados trampolín con radio=10.00cm Sección 01 (2.00m).....	112
FIGURA 9.6	Calados trampolín con radio=10.00cm Sección 02 (2.50m).....	112
FIGURA 9.7	Calados trampolín con radio=15.00cm Sección 01 (2.00m).....	113
FIGURA 9.8	Calados trampolín con radio=15.00cm Sección 02 (2.50m).....	113
FIGURA 9.9	Calados trampolín Áng. 45° Sin deflec. Sección 01(2.00m).....	114
FIGURA 9.10	Calados trampolín Áng. 45° Sin deflec. Sección 02(2.50m).....	114
FIGURA 9.11	Calados trampolín Áng. 30° Sin deflec. Sección 01(2.00m).....	115
FIGURA 9.12	Calados trampolín Áng. 30° Sin deflec. Sección 02(2.50m).....	115
FIGURA 9.13	Calados trampolín Áng. 45° Con deflec. Sección 01(2.00m).....	116
FIGURA 9.14	Calados trampolín Áng. 45° Con deflec. Sección 02(2.50m).....	116
FIGURA 9.15	Calados trampolín Áng. 30° Con deflec. Sección 01(2.00m).....	117
FIGURA 9.16	Calados trampolín Áng. 30° Con deflec. Sección 02(2.50m).....	117
FIGURA 9.17	Calados trampolín Piscina de Inmersión Sección 01(2.00m).....	118
FIGURA 9.18	Calados trampolín Piscina de Inmersión Sección 02(2.50m).....	118
FIGURA 9.19	Presión mínima trampolín con radio=5.00cm.....	119
FIGURA 9.20	Presión máxima trampolín con radio=5.00cm.....	120
FIGURA 9.21	Presión mínima trampolín con radio=10.00cm.....	121
FIGURA 9.22	Presión máxima trampolín con radio=10.00cm.....	122
FIGURA 9.23	Presión mínima trampolín con radio=15.00cm.....	123
FIGURA 9.24	Presión máxima trampolín con radio=15.00cm.....	124
FIGURA 9.25	Altura máxima trampolín con radio=15.00cm.....	125



FIGURA 9.26	Longitud máxima trampolín con radio=15.00cm.....	125
FIGURA 9.27	Altura máxima trampolín con radio=10.00cm.....	126
FIGURA 9.28	Longitud máxima trampolín con radio=10.00cm.....	126
FIGURA 9.29	Altura máxima trampolín con radio=5.00cm.....	127
FIGURA 9.30	Longitud máxima trampolín con radio=5.00cm.....	127
FIGURA 9.31	Altura máxima Exp. vs Teórica R=5.00cm Áng.=30° Sin Deflec.	128
FIGURA 9.32	Longitudes Exp. vs Teórica R=5.00cm Áng.=30° Sin Deflec.	128
FIGURA 9.33	Altura máxima Exp. vs Teórica R=5.00cm Áng.=45° Sin Deflec.	129
FIGURA 9.34	Longitudes Exp. vs Teórica R=5.00cm Áng.=45° Sin Deflec.	129
FIGURA 9.35	Altura máxima Exp. vs Teórica R=5.00cm Áng.=30° Con Deflec.	130
FIGURA 9.36	Longitudes Exp. vs Teórica R=5.00cm Áng.=30° Con Deflec.	130
FIGURA 9.37	Altura máxima Exp. vs Teórica R=5.00cm Áng.=45° Con Deflec.	131
FIGURA 9.38	Longitudes Exp. vs Teórica R=5.00cm Áng.=45° Con Deflec.	131
FIGURA 9.39	Altura máxima Exp. vs Teórica R=10.00cm Áng.=30° Sin Deflec.	132
FIGURA 9.40	Longitudes Exp. vs Teórica R=10.00cm Áng.=30° Sin Deflec.	132
FIGURA 9.41	Altura máxima Exp. vs Teórica R=10.00cm Áng.=45° Sin Deflec.	133
FIGURA 9.42	Longitudes Exp. vs Teórica R=10.00cm Áng.=45° Sin Deflec.	133
FIGURA 9.43	Altura máxima Exp. vs Teórica R=10.00cm Áng.=30° Con Deflec.	134
FIGURA 9.44	Longitudes Exp. vs Teórica R=10.00cm Áng.=30° Con Deflec.	134
FIGURA 9.45	Altura máxima Exp. vs Teórica R=10.00cm Áng.=45° Con Deflec.	135
FIGURA 9.46	Longitudes Exp. vs Teórica R=10.00cm Áng.=45° Con Deflec.	135
FIGURA 9.47	Altura máxima Exp. vs Teórica R=15.00cm Áng.=30° Sin Deflec.	136
FIGURA 9.48	Longitudes Exp. vs Teórica R=15.00cm Áng.=30° Sin Deflec.	136
FIGURA 9.49	Altura máxima Exp. vs Teórica R=15.00cm Áng.=45° Sin Deflec.	137
FIGURA 9.50	Longitudes Exp. vs Teórica R=15.00cm Áng.=45° Sin Deflec.	137
FIGURA 9.51	Altura máxima Exp. vs Teórica R=15.00cm Áng.=30° Con Deflec.	138
FIGURA 9.52	Longitudes Exp. vs Teórica R=15.00cm Áng.=30° Con Deflec.	138
FIGURA 9.53	Altura máxima Exp. vs Teórica R=15.00cm Áng.=45° Con Deflec.	139
FIGURA 9.54	Longitudes Exp. vs Teórica R=15.00cm Áng.=45° Con Deflec.	139
FIGURA 9.55	Variación de la energía de disipación con respecto al caudal	145



LISTADO DE TABLAS

CAPÍTULO 06

TABLA 6.1	Muestra los puntos para dibujar la forma del Aliviadero.....	50
------------------	--------------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 07

TABLA 7.1	Expresión de las magnitudes físicas en 2 sistemas de unidades.....	70
TABLA 7.2	Relaciones de similitud con distintas leyes.....	78

CAPÍTULO 08

TABLA 8.1	Cálculo del Caudal Bombeado por aforo.....	89
TABLA 8.2	Cálculo del Caudal Bombeado por aforo.....	89
TABLA 8.3	Cálculo del Caudal Bombeado por aforo.....	89
TABLA 8.4	Calados de la corriente aguas abajo para modelo de control.....	91
TABLA 8.5	Calados de la corriente aguas abajo para modelo de control.....	92
TABLA 8.6	Calados de la corriente aguas abajo para modelo de control.....	92
TABLA 8.7	Calados A.A. radio igual a 5cm ángulo igual a 30° sin deflectores....	93
TABLA 8.8	Calados A.A. radio igual a 5cm ángulo igual a 30° con deflectores....	93
TABLA 8.9	Calados A.A. radio igual a 5cm ángulo igual a 45° sin deflectores....	93
TABLA 8.10	Calados A.A. radio igual a 5cm ángulo igual a 45° con deflectores....	94
TABLA 8.11	Calados A.A. radio igual a 10cm ángulo igual a 30° sin deflectores	94
TABLA 8.12	Calados A.A. radio igual a 10cm ángulo igual a 30° con deflectores	94
TABLA 8.13	Calados A.A. radio igual a 10cm ángulo igual a 45° sin deflectores	95
TABLA 8.14	Calados A.A. radio igual a 10cm ángulo igual a 45° con deflectores	95
TABLA 8.15	Calados A.A. radio igual a 15cm ángulo igual a 30° sin deflectores	95
TABLA 8.16	Calados A.A. radio igual a 15cm ángulo igual a 30° con deflectores	96
TABLA 8.17	Calados A.A. radio igual a 15cm ángulo igual a 45° sin deflectores	96
TABLA 8.18	Calados A.A. radio igual a 15cm ángulo igual a 45° con deflectores	96
TABLA 8.19	Calados A.A. radio igual a 15cm ángulo igual a 45° con deflectores Con piscina de inmersión h=0.10m.....	97
TABLA 8.20	Calados A.A. radio igual a 15cm ángulo igual a 45° con deflectores Con piscina de inmersión h=0.00m.....	97



TABLA 8.21	Presiones radio igual a 5cm ángulo igual a 30° sin deflectores....	97
TABLA 8.22	Presiones radio igual a 5cm ángulo igual a 30° con deflectores....	98
TABLA 8.23	Presiones radio igual a 5cm ángulo igual a 45° sin deflectores....	98
TABLA 8.24	Presiones radio igual a 5cm ángulo igual a 45° con deflectores....	98
TABLA 8.25	Presiones radio igual a 10cm ángulo igual a 30° sin deflectores	99
TABLA 8.26	Presiones radio igual a 10cm ángulo igual a 30° con deflectores	99
TABLA 8.27	Presiones radio igual a 10cm ángulo igual a 45° sin deflectores	99
TABLA 8.28	Presiones radio igual a 10cm ángulo igual a 45° con deflectores	100
TABLA 8.29	Presiones radio igual a 15cm ángulo igual a 30° sin deflectores	100
TABLA 8.30	Presiones radio igual a 15cm ángulo igual a 30° con deflectores	100
TABLA 8.31	Presiones radio igual a 15cm ángulo igual a 45° sin deflectores	101
TABLA 8.32	Presiones radio igual a 15cm ángulo igual a 45° con deflectores	101
TABLA 8.33	Altura y longitudes radio 5cm ángulo 30° sin deflectores	102
TABLA 8.34	Altura y longitudes radio 5cm ángulo 30° con deflectores	102
TABLA 8.35	Altura y longitudes radio 5cm ángulo 45° sin deflectores	103
TABLA 8.36	Altura y longitudes radio 5cm ángulo 45° con deflectores	103
TABLA 8.37	Altura y longitudes radio 10cm ángulo 30° sin deflectores	103
TABLA 8.38	Altura y longitudes radio 10cm ángulo 30° con deflectores	103
TABLA 8.39	Altura y longitudes radio 10cm ángulo 45° sin deflectores	104
TABLA 8.40	Altura y longitudes radio 10cm ángulo 45° con deflectores	104
TABLA 8.41	Altura y longitudes radio 15cm ángulo 30° sin deflectores	104
TABLA 8.42	Altura y longitudes radio 15cm ángulo 30° con deflectores	104
TABLA 8.43	Altura y longitudes radio 15cm ángulo 45° sin deflectores	105
TABLA 8.44	Altura y longitudes radio 15cm ángulo 45° con deflectores	105
TABLA 8.45	Tirantes del flujo de aproximación al cucharón	105

CAPÍTULO 09

TABLA 9.1	Calados promedios radio 5cm ángulo 45° con deflectores.....	106
TABLA 9.2	Calados promedios radio 5cm ángulo 45° sin deflectores.....	106
TABLA 9.3	Calados promedios radio 5cm ángulo 30° con deflectores.....	106



TABLA 9.4	Calados promedios radio 5cm ángulo 30° sin deflectores.....	106
TABLA 9.5	Calados promedios radio 10cm ángulo 45° con deflectores.....	107
TABLA 9.6	Calados promedios radio 10cm ángulo 45° sin deflectores.....	107
TABLA 9.7	Calados promedios radio 10cm ángulo 30° con deflectores.....	107
TABLA 9.8	Calados promedios radio 10cm ángulo 30° sin deflectores.....	107
TABLA 9.9	Calados promedios radio 15cm ángulo 45° con deflectores.....	107
TABLA 9.10	Calados promedios radio 15cm ángulo 45° sin deflectores.....	107
TABLA 9.11	Calados promedios radio 15cm ángulo 30° con deflectores.....	108
TABLA 9.12	Calados promedios radio 15cm ángulo 30° sin deflectores.....	108
TABLA 9.13	Calados promedios radio 15cm ángulo 45° con deflectores Altura de piscina de inmersión H=0.00.....	108
TABLA 9.14	Calados promedios radio 15cm ángulo 45° con deflectores Altura de piscina de inmersión H=0.10.....	108
TABLA 9.15	Calados promedios Modelo de control Altura de piscina de inmersión H=0.00.....	108
TABLA 9.16	Calados promedios Modelo de control Altura de piscina de inmersión H=0.10.....	108
TABLA 9.17	Calados promedios Modelo de control Altura de piscina de inmersión H=0.20.....	109
TABLA 9.18	Energía disipada radio 5cm ángulo 45° con deflectores.....	140
TABLA 9.19	Energía disipada radio 5cm ángulo 30° con deflectores.....	140
TABLA 9.20	Energía disipada radio 5cm ángulo 45° sin deflectores.....	140
TABLA 9.21	Energía disipada radio 5cm ángulo 30° sin deflectores.....	140
TABLA 9.22	Energía disipada radio 10cm ángulo 45° con deflectores.....	141
TABLA 9.23	Energía disipada radio 10cm ángulo 30° con deflectores.....	141
TABLA 9.24	Energía disipada radio 10cm ángulo 45° sin deflectores.....	141
TABLA 9.25	Energía disipada radio 10cm ángulo 30° sin deflectores.....	142
TABLA 9.26	Energía disipada radio 15cm ángulo 45° con deflectores.....	142
TABLA 9.27	Energía disipada radio 15cm ángulo 30° con deflectores.....	142
TABLA 9.28	Energía disipada radio 15cm ángulo 45° sin deflectores.....	143
TABLA 9.29	Energía disipada radio 15cm ángulo 30° sin deflectores.....	143
TABLA 9.30	Energía disipada R 15cm áng. 45° Con deflec. Pisc. H=0.....	143
TABLA 9.31	Energía disipada R 15cm áng. 45° Con deflec. Pisc. H=0.10cm.....	144
TABLA 9.32	Energía disipada Modelo de control.....	144



LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

CAPÍTULO 06

FOTOGRAFÍA 6.1	Construcción en taller de la estructura del canal.....,,,,,,	54
FOTOGRAFÍA 6.2	Estructura metálica del canal instalada en el lugar del Modelamiento.....	54
FOTOGRAFÍA 6.3	Canal con planchas de acrílico y planchas de cemento.....	55
FOTOGRAFÍA 6.4	Extensión del canal.....	55
FOTOGRAFÍA 6.5	Piscina de almacenamiento.....	56
FOTOGRAFÍA 6.6	Tuberías de impulsión.....	57
FOTOGRAFÍA 6.7	Válvulas de pie de 3 y 2 pulg.....	57
FOTOGRAFÍA 6.8	Bombas centrífugas.....	57
FOTOGRAFÍA 6.9	Tuberías de conducción.....	58
FOTOGRAFÍA 6.10	Tuberías de entrega del flujo perforadas.....	58
FOTOGRAFÍA 6.11	Piezas de madera a ser cortada.....	60
FOTOGRAFÍA 6.12	Cortadora utilizada para generar las curvas de los perfiles..	60
FOTOGRAFÍA 6.13	Modelo en madera del perfil del cimacio.....	61
FOTOGRAFÍA 6.14	Piezas intercambiables de madera que se colocaron a Continuación del cimacio.....	61
FOTOGRAFÍA 6.15	Modelo del Aliviadero instalado en el canal.....	62
FOTOGRAFÍA 6.16	Ensamblado de uno de los tipos de aliviadero con trampolín	62
FOTOGRAFÍA 6.17	Moldeado de la lámina de acrílico por calor.....	63
FOTOGRAFÍA 6.18	Vista trasera del aliviadero, se muestran también los estribos que en el modelo tienen una medida de 5cm.....	63
FOTOGRAFÍA 6.19	Instalación completa del modelo del aliviadero.....	64
FOTOGRAFÍA 6.20	Piezómetros Instalados	64
FOTOGRAFÍA 6.21	Deflectores de madera utilizados en los modelos.....	65
FOTOGRAFÍA 6.22	Piscina de inmersión instalada en el canal.....	65

CAPÍTULO 08

FOTOGRAFÍA 8.1	Medición del tirante con vernier.....	90
FOTOGRAFÍA 8.2	Modelo de control en funcionamiento.....	91
FOTOGRAFÍA 8.3	Modelo de control.....	91
FOTOGRAFÍA 8.4	Modelo con trampolín.....	92

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

- A principios del siglo XX, los ingenieros en Francia consideraron varios diseños para las instalaciones de centrales hidroeléctricas proyectados en valles muy estrechos donde no se podría ubicar el aliviadero y las estructuras de la planta de energía uno al lado del otro. Fue entonces que Ing. André Coyne, quien propuso un novedoso diseño con un compacto arreglo entre el aliviadero y la planta eléctrica, localizados uno encima del otro.
- La Planta eléctrica fue ubicada en la base de la presa con el aliviadero por encima de esta, el techo de la planta eléctrica dio la forma circular que sirve para desviar la gran velocidad del flujo de agua del aliviadero hacia arriba en forma de un proyectil. Figura 01.

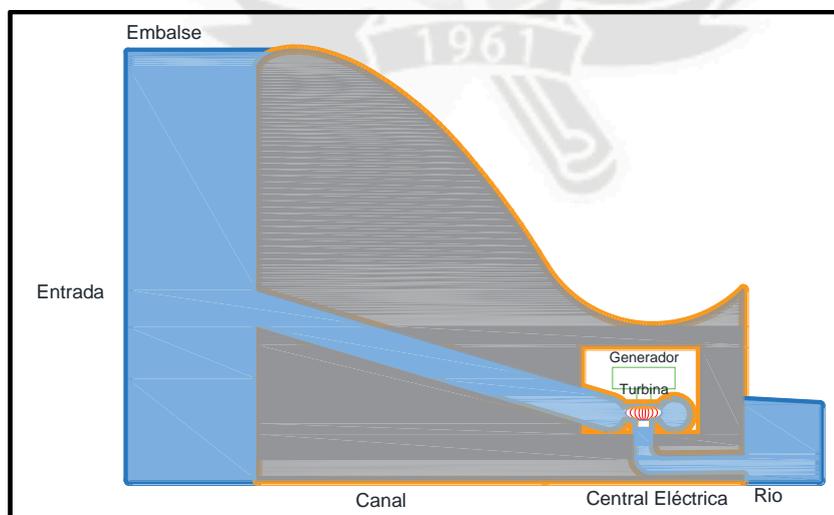


Fig. 1.1 Cimacio en una presa con su disipador en salto de esquí que presenta por debajo del salto la central eléctrica

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



1.2. Marco teórico

1.2.1. Introducción:

- Los disipadores de energía del tipo trampolines o también llamados de salto de esquí son comúnmente utilizados en presas por su buen desempeño hidráulico al momento de disminuir la energía del flujo de agua proveniente del embalse, y también porque su construcción es relativamente económica.
- En este tipo de aliviadero la salida se diseña en forma de un labio grande especial o cubeta, la cual lanza el chorro completo de flujo al aire. Parte de la energía del chorro se disipa en el aire, pero en cualquier caso este cae nuevamente al río a una distancia segura de la presa.
- Para un diseño eficiente de un trampolín se deben establecer las siguientes condiciones¹:
 - **Lanzamiento óptimo.** En principio, suele coincidir con el de máxima distancia, pero hay casos en los que se desea que la caída se sitúe en un lugar determinado, que puede no ser la más distante alcanzable. Otras condiciones a cumplir pueden ser la mejor incidencia con las laderas o en el cauce, la repartición del agua en una amplia zona de caída (para aminorar la energía cinética por m²) y una buena emulsión de aire, que rebaja la energía cinética por el doble efecto de frenado y de la disminución de densidad.
 - **Estabilidad del cuenco de erosión en la zona de caída.** La erosión puede ser progresiva pero hay que asegurarse de que a partir de unas ciertas dimensiones el cuenco formado es amortiguador, estable y sin peligro para las laderas u otras obras. En este sentido hay que cerciorarse de que la barra o barras que puedan formarse en el cauce no perjudiquen el funcionamiento del propio trampolín ni de otros órganos de desagüe de la presa o de la central hidroeléctrica ni tampoco en caso existieran representen riesgo para cultivos o propiedades aguas abajo por aterramiento o por la posible rotura de una de las barras.
 - **El chorro lanzado ha de tener completa ventilación.** Por la parte superior de la lámina está asegurada, pero si por la inferior fuera insuficiente la gran velocidad del chorro produciría una depresión que tiraría de él hacia abajo, acortando la velocidad de lanzamiento y pudiendo dar lugar a inestabilidad de la lámina. Para evitarlo, el borde de lanzamiento deberá estar a suficiente altura sobre el máximo nivel del agua en el cauce cuando esté en pleno funcionamiento el aliviadero, y debe tenerse en cuenta el posible remanso producible por una barra de erosión en el cuenco.



2. OBJETIVOS DEL PROYECTO DE TITULACIÓN

2.1. Objetivo principal

Evaluar las pérdidas de energía por fricción y turbulencia, en aliviaderos de presas con perfil de cimacio y que presente como su estructura terminal trampolines, experimentando con diversos parámetros en estos, para establecer el más eficiente en términos hidráulicos.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar ensayos experimentales en un modelo físico en escala 1/50, utilizando un canal de pendiente variable, sobre el cual se realizara el montaje de un cimacio con trampolín para determinar el porcentaje de energía que se disipa.
- Analizar la viabilidad de la clase de disipador en trampolín según las características de la presa.
- Experimentar con ángulos de salida del trampolín de 30° y 45 °, y comparar las diferencias que puede existir debido a la variación de este ángulo.
- Experimentar con deflectores que se pueden colocar en el labio terminal del trampolín y verificar su desempeño hidráulico.
- Obtener curvas comparativas que relacionen la pérdida de energía con la carga sobre el cimacio y el calado crítico para los caudales ensayados.
- Fomentar a la investigación y el interés de estudiantes de ingeniería civil en el ámbito de la hidráulica.



3. ALIVIADEROS EN PRESAS

3.1. Introducción

- El aliviadero es una de las estructuras más importantes en el proyecto de una presa, permite liberar el exceso de agua o el agua de avenida de un modo controlado (presencia de compuertas) o no controlado para asegurar la seguridad del proyecto.
- Es de vital importancia para las instalaciones del aliviadero que sean diseñadas con la capacidad suficiente para evitar el desbordamiento de la presa, especialmente cuando es una presa de tierra o escollera.

3.2. Partes de un aliviadero

En un aliviadero se presentan 3 componentes bien diferenciados entre sí:

- Embocadura:** o toma de agua debe tener la forma y dimensiones adecuadas para derivar el caudal del proyecto.
- Conducción:** o rápida cumple la función de transportar el flujo de agua desde la embocadura a la obra de restitución al río.
- Obra de restitución:** tiene una función complementaria y contraria a la toma, devolver al río el caudal derivado por ésta. Así mismo al contrario de la embocadura en la cual el ingreso de agua se hace en un régimen tranquilo, la obra de reintegro recibe el agua de conducción a gran velocidad y energía que hay que amortiguar en lo posible para que no produzca erosiones perjudiciales al cauce a la misma presa, es por eso que se debe implementar un dissipador de energía.

3.3. Tipos de Aliviaderos

- Muchos tipos de aliviaderos pueden ser considerados dependiendo de factores como: el costo, condiciones topográficas, altura de la presa, el suelo de la cimentación y la hidrología, normalmente se clasifican en controlados y no controlados, según estén o no provistos de compuertas. Se describirá brevemente los tipos de aliviaderos más comunes en presas y los criterios por los cuales deben ser elegidos a continuación:

a. Aliviadero en caída libre

- También conocido como pared vertical, en este tipo de aliviadero el agua cae libremente, el agua se puede descargar libremente como el caso de vertederos de pared delgada, o apoyarse a lo largo de una angosta sección de la coronación.
- Este tipo de aliviadero es apropiado para presas de contrafuertes, de arco de débil espesor o en aquellas con el paramento aguas abajo casi vertical.

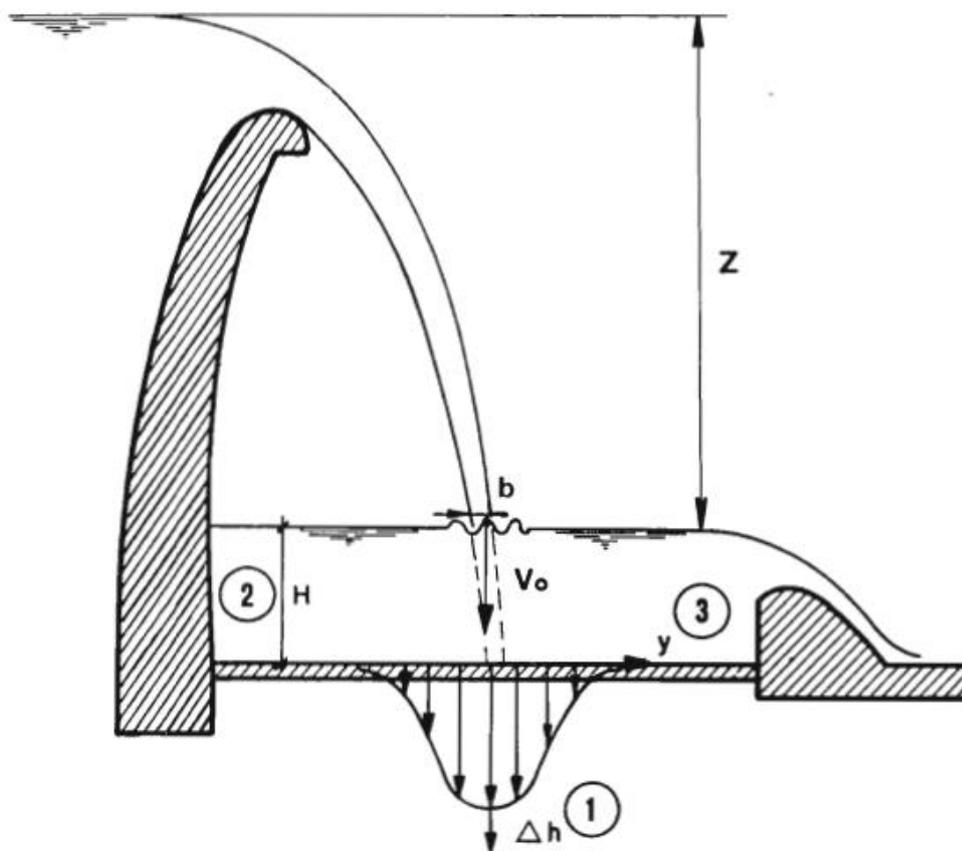


Fig. 3.1 Disposición de un aliviadero en caída libre

Fuente: Tratado básico de presas Tomo II- Eugenio Vallarino Pág. 714



b. Aliviadero tipo cimacio

- Tiene un perfil en ojiva o en forma de S de allí el nombre de “Cimacio. La curva superior tiene la forma tal que se adapte al perfil inferior de una lámina vertiendo, bien aireada, sobre una pared delgada. La corriente se adhiere de esta manera al perfil con el que está en contacto, impidiéndose la formación de una capa de aire entre ambos, pues al existir dicha capa se crearían presiones negativas en el aliviadero pudiendo haber problemas de cavitación perjudiciales para la estructura.
- Varios autores han propuesto diseños para la forma del aliviadero entre los más conocidos se encuentra el perfil Creager, el perfil WES, el perfil Creager modificado basado en las pruebas de la U. S. Bureau of Reclamation sobre pruebas de Denver, el perfil de Lain Davis, el perfil Scimemi, el perfil Smetana, el perfil de Marchi y el perfil de Escande

c. Aliviadero en Canal Lateral

- En estos aliviaderos su labio está situado en posición paralela o casi paralela al eje de la parte superior del canal de desagüe. La lámina que vierte sobre la coronación del vertedero cae en un canal estrecho, gira aproximadamente 90° y continúa por el canal principal del desagüe.

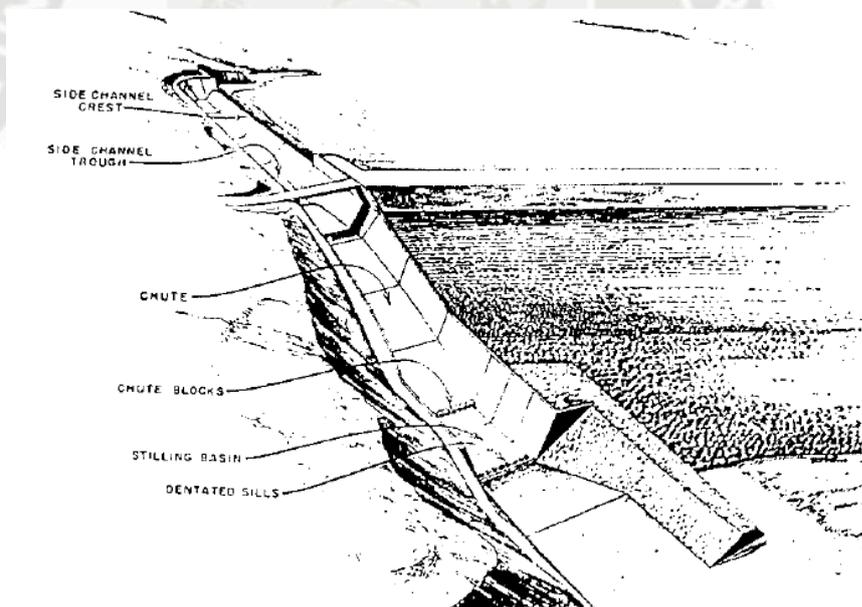


Fig. 3.2 Aliviadero en canal lateral con cuenco disipador
Fuente: Design of Small Dams-Bureau of Reclamation Pág. 355

d. Aliviadero tipo orificio

- Este tipo de aliviaderos generalmente presentan compuertas, es usado cuando se requiere de una considerable capacidad de descarga para los niveles bajos del embalse. Estas presas pueden ser encontradas en presas de gravedad, de terraplén y en presas en arco.

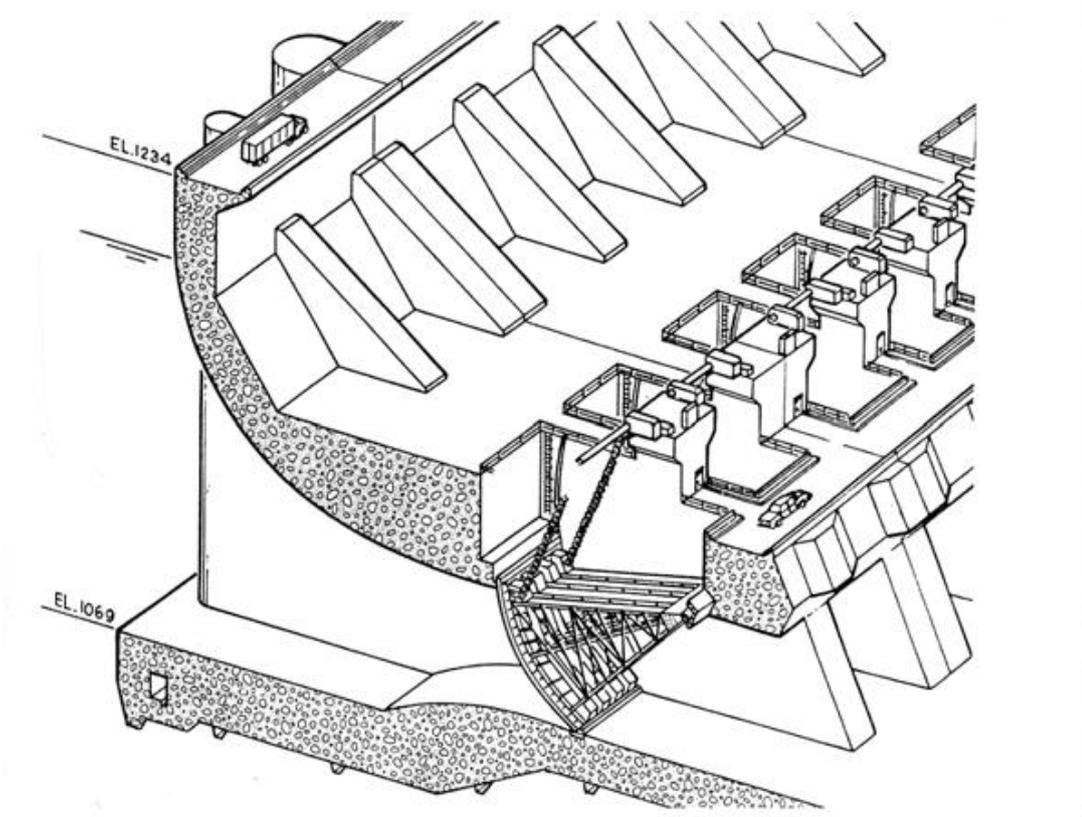


Fig. 3.3 Aliviadero tipo orificio con compuertas

Fuente: Hydraulic Design of Spillways-Wayne Coleman Pág. 17-20

e. Aliviadero en cáliz Morning Glory

- También llamados aliviaderos en pozo o vertederos circulares, son aliviaderos en los que la toma de agua está situada horizontalmente, desde allí el agua cae a un pozo vertical, o casi vertical, hasta alcanzar una conducción horizontal que la lleva al cauce del río aguas abajo. Los aliviaderos de este tipo son recomendables en presas situadas en desfiladeros muy angostos con estribos muy verticales o cuando se puede aprovechar un túnel o conducto de desviación del cauce.

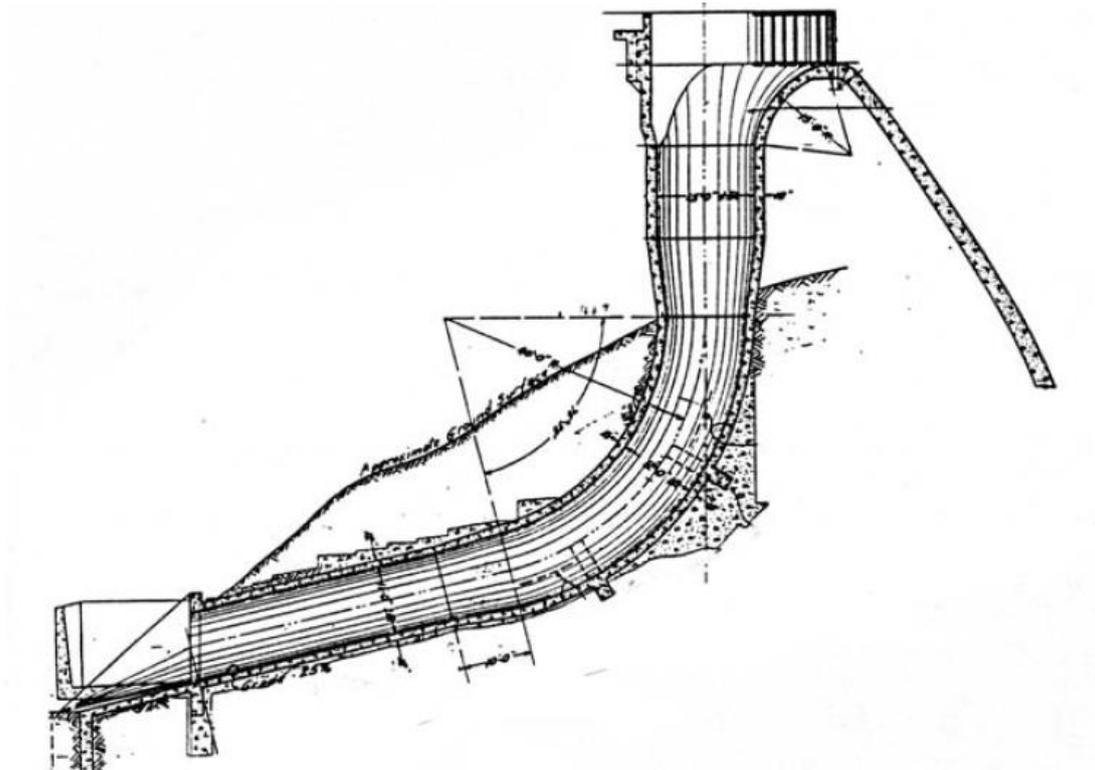


Fig. 3.4 Aliviadero en Caliz o Morning Glory

Fuente: Hydraulic Design of Spillways-Wayne Coleman Pág. 17-29

f. Aliviadero Tipo Laberinto

- Este tipo de aliviadero brinda una mayor longitud de coronación a una anchura dada de aliviadero, para necesitar menos anchura de la lámina vertiente, para un caudal vertido determinado. Los aliviaderos tipo laberinto tienen muchas ventajas y aplicaciones. Puede ser utilizado en cualquier lugar donde se necesite un elemento de desagüe que dependa de las condiciones del lugar.

g. Aliviadero en conducción cerrada o Túnel

- En este tipo de aliviadero se emplea canales de desagües cerrados, para conducir el agua atravesando la presa o por debajo de ella. En este tipo de aliviaderos puede emplearse en cualquier tipo de estructura de control, incluyendo labios fijos, vertederos en pozo y labios verticales.

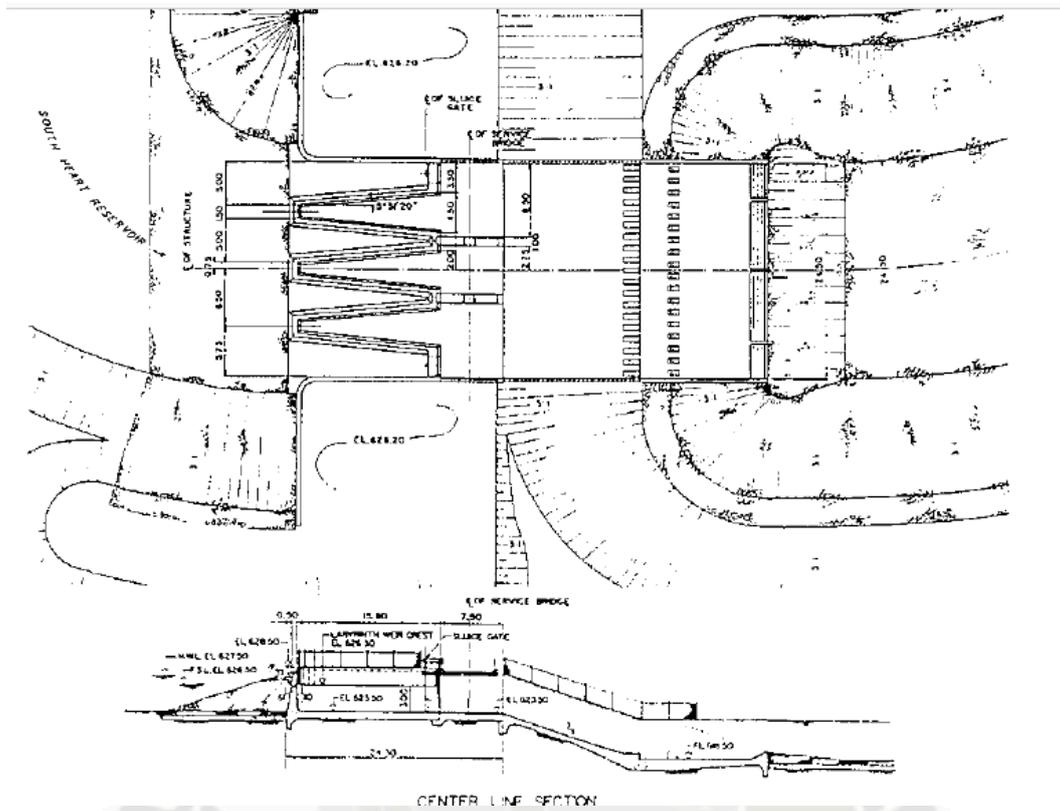


Fig. 3.5 Aliviadero en Laberinto de 3 módulos
Fuente: Hydraulic Design of Spillways-Wayne Coleman Pág. 17-31

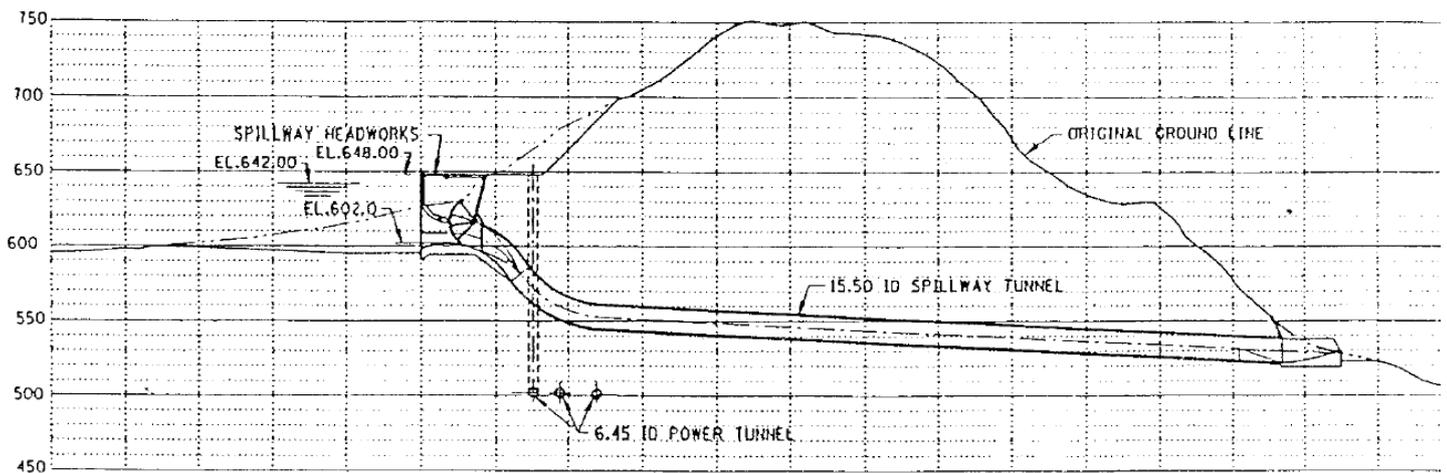


Fig. 3.6 Aliviadero en Conducción cerrada o tunel
Fuente: Hydraulic Design of Spillways-Wayne Coleman Pág. 17-37



h. Aliviadero Escalonado

- Este tipo de aliviadero conecta la cresta con el dissipador de energía, este puede ser recto o curvo, el más común es recto con una reducción gradual.

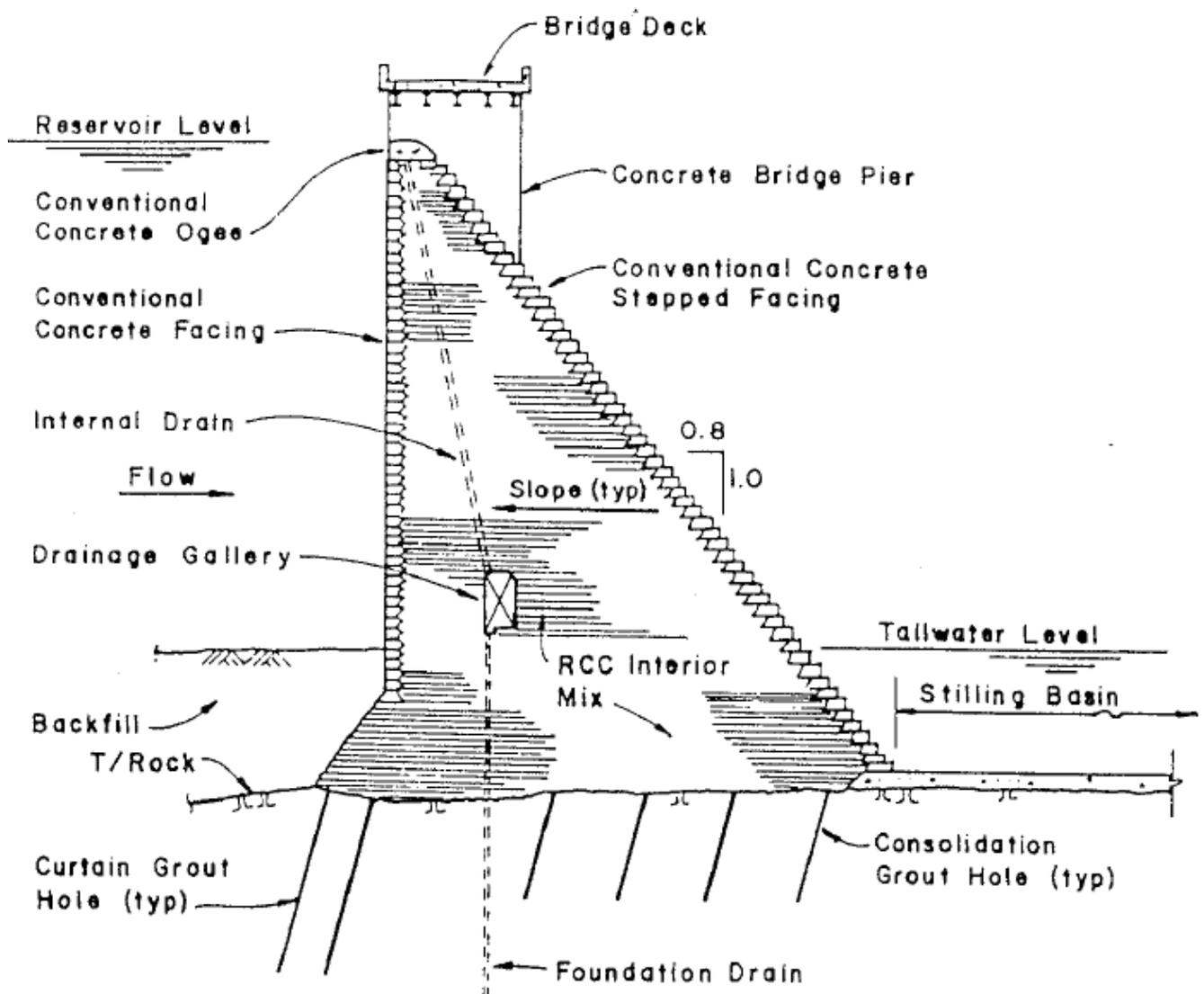


Fig. 3.7 Aliviadero escalonado

Fuente: Hydraulic Design of Spillways-Wayne Coleman Pág. 17-39

3.4. Diseño de un aliviadero que se ajusta a la lámina vertical

- Existen diversos métodos para el diseño de este tipo de aliviaderos, aquí se presentan los diseños recomendados por la Bureau of Reclamation.

Método 01:

- Este diseño se basa en la carga total del proyecto “ H_o ” y en la carga de la velocidad de aproximación “ h_a ”, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = CLH_o^{\frac{3}{2}} \quad (3.1)$$

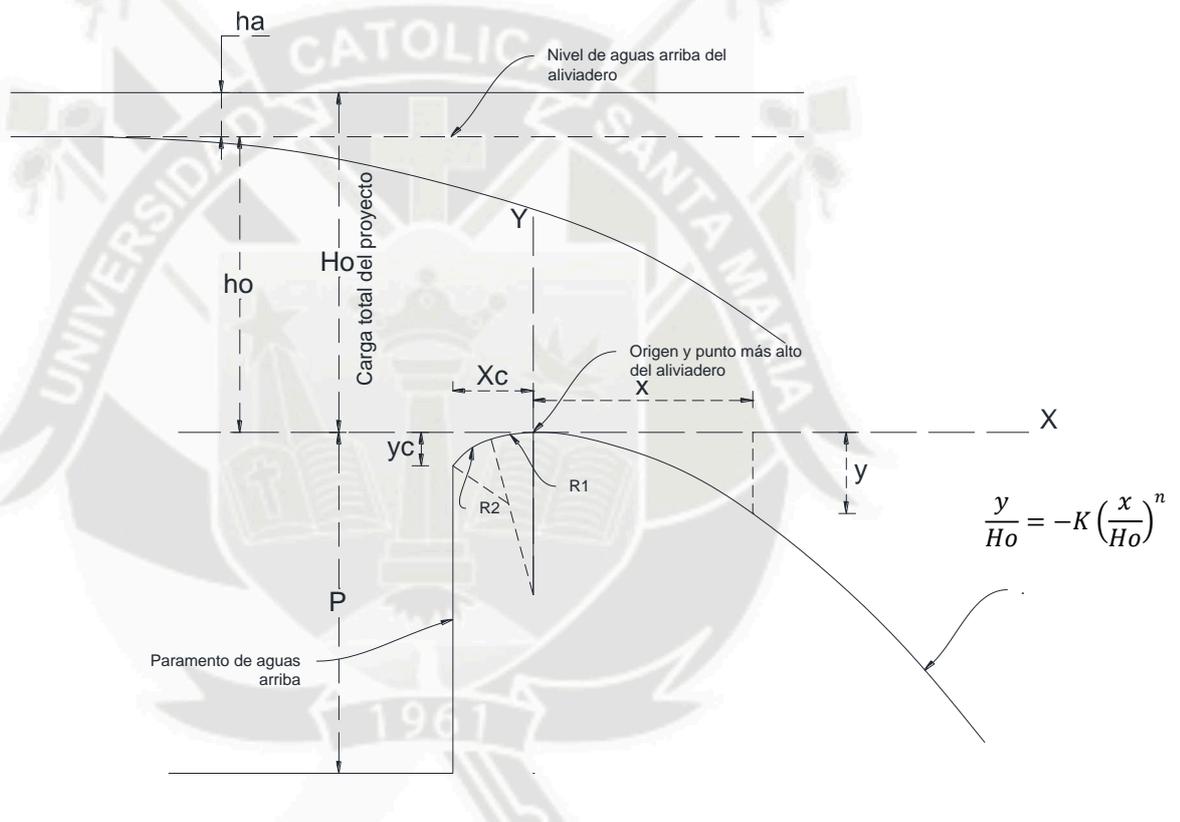


Fig. 3.8 Elementos de perfil de un vertedero estricto

Fuente: Diseño de pequeñas presas, Bureau of Reclamation Capitulo 9, Pag 439



Donde

Q : Caudal

Este está dado por las características del proyecto.

C : Coeficiente de descarga variable

Este coeficiente depende de varios factores como:

- a) Altura del calado de aproximación
- b) Cargas distintas a las del proyecto
- c) Inclinación del paramento aguas arriba
- d) Interferencias aguas abajo del pie del aliviadero y sumergencia aguas abajo

Para cada uno de estos factores existen ábacos para su debida corrección.

L : Longitud efectiva de coronación

Esta longitud puede reducirse debido a la posible presencia de pilas y/o estribos los cuales producen contracciones laterales de la lámina vertiente, este efecto puede tenerse en cuenta reduciendo la longitud neta como sigue:

$$L = L' - 2(NK_p + K_a)H_o \quad (3.2)$$

Donde

L : Longitud efectiva de coronación

L' : Longitud neta de la coronación

N : Número de pilas

K_p : Coef. Contracción debido a pilas

K_a : Coef. Contracción debido a estribos

H_o : Carga total sobre la coronación

- Para pilas con tajamares rectangulares con esquinas redondeadas $K_p=0.02$
- Para pilas con tajamares redondos $K_p=0.01$
- Para pilas con tajamares apuntados $K_p= 0.0$
- Para estribos cuadrados $K_a=0.2$
- Para estribos redondeados $K_a=0.0-0.1$

H_o : altura de la lámina vertiente sobre la coronación, más la altura debida a la velocidad de aproximación, ha.

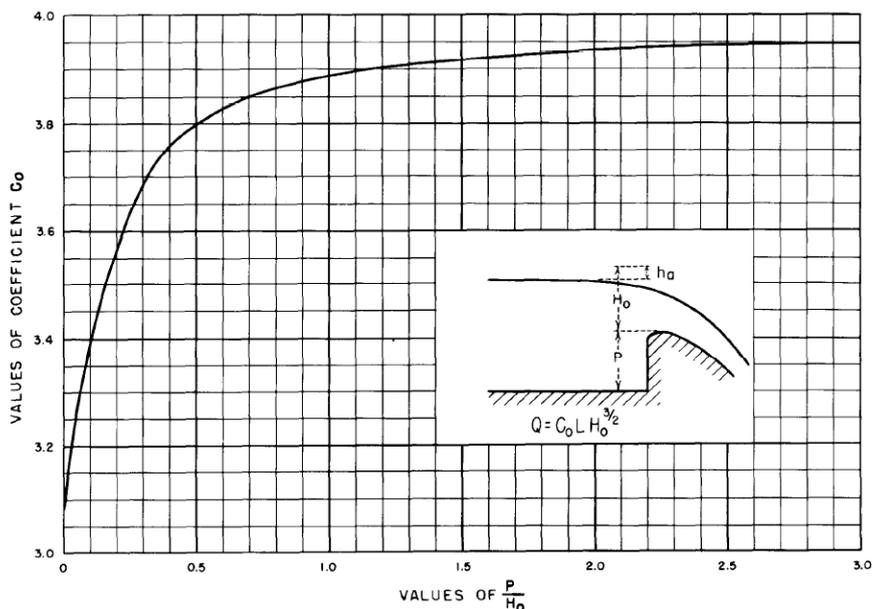


Fig. 3.9 Coeficientes de descarga de un vertedero estricto con paramento vertical

Fuente: Diseño de pequeñas presas, Bureau of Reclamation Capitulo 9, Pag 444

- Teniendo los datos del caudal de proyecto, la longitud de coronación y suponiendo un coeficiente de descarga, se puede calcular un H_o , para luego corregirlo con la figura 3.9, para el valor real del coeficiente de descarga.
- Una vez obtenido el H_o definitivo se reemplaza en la ecuación 3.3 para obtener la carga de velocidad h_a .

$$V_a = \frac{q}{P+h_o} \quad (3.3)$$

$$h_a = \frac{q^2}{2g(P+h_o)^2} \quad (3.4)$$

- Definidos H_o y h_a se obtiene K , n , X_c , Y_c , $R1$ y $R2$, que son los factores que definen las características geométricas para el perfil de un aliviadero que se ajusta a la lámina vertiente, como se muestra a continuación:
- El perfil aguas abajo del origen está definida por la ecuación :

$$\frac{y}{H_o} = -K \left(\frac{x}{H_o} \right)^n \quad (3.5)$$

- En la cual K y n son constantes cuyos valores dependen de la inclinación del paramento aguas arriba y de la velocidad de aproximación del agua, se obtienen a partir del ábaco de la figura 3.10



- El perfil aguas arriba del origen está dado por una construcción geométrica que depende de los radios R_1 y R_2 , los cuales dependen de la inclinación del paramento aguas arriba y de la velocidad de aproximación del agua, se obtienen a partir del ábaco de la figura 3.11

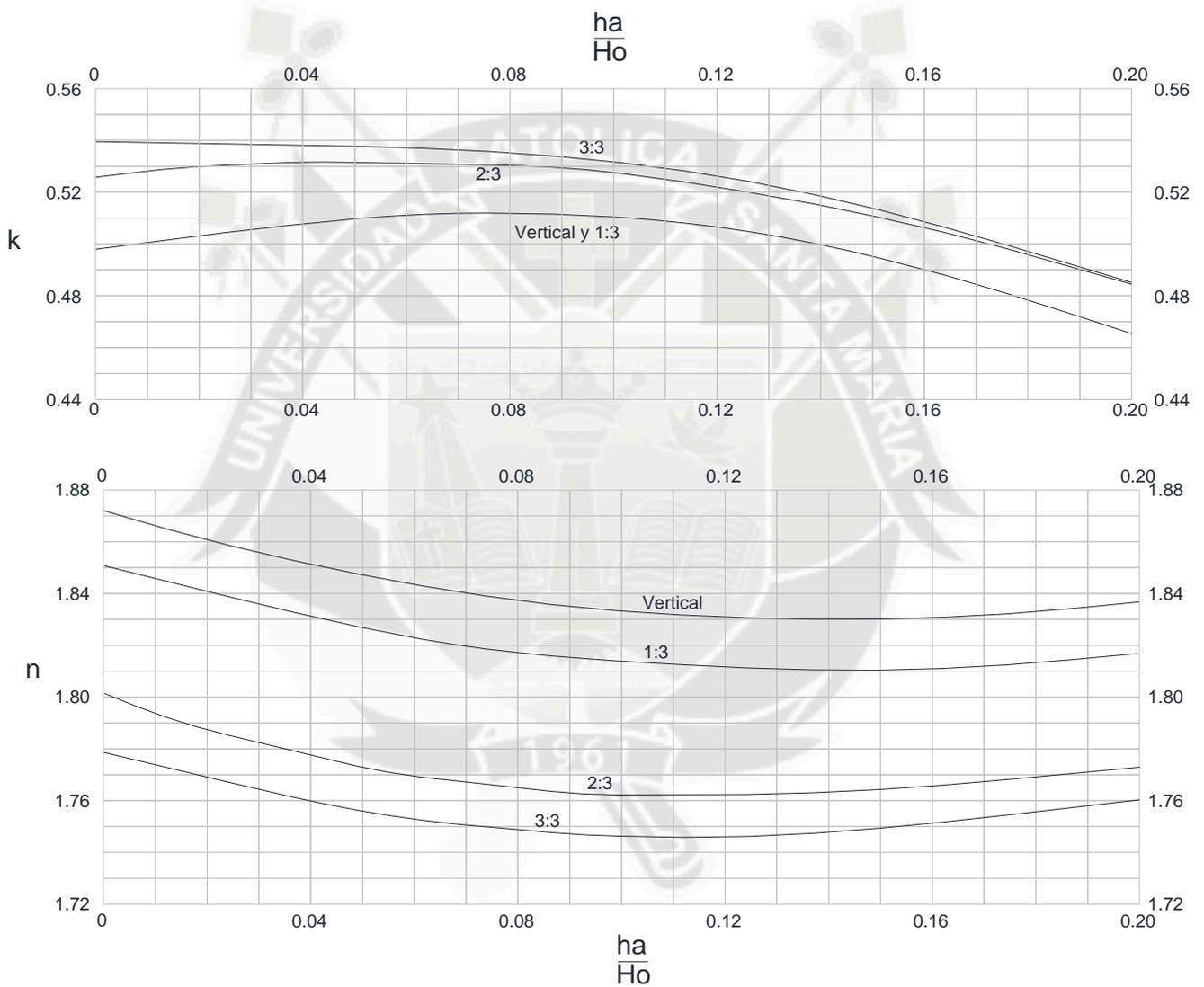


Fig. 3.10 Coeficientes que definen el perfil de un vertedero estricto

Fuente: Diseño de pequeñas presas, Bureau of Reclamation Capitulo 9, Pag 439

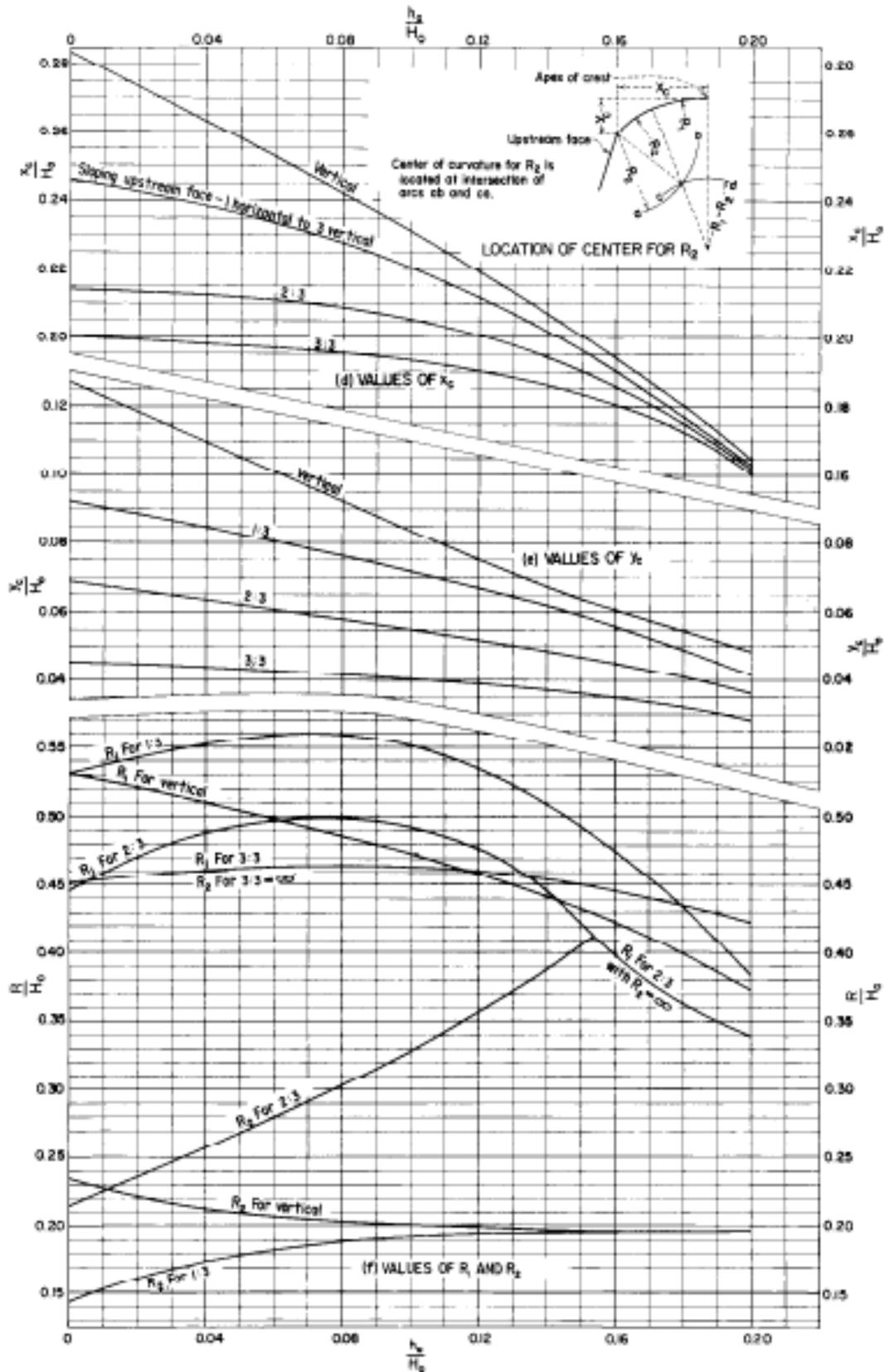


Fig. 3.11 Coeficientes que definen el perfil de un vertedero estricto

Fuente: Diseño de pequeñas presas, Bureau of Reclamation Capitulo 9, Pag 440

Método 02:

- Se puede obtener una forma muy aproximada del aliviadero cuando el paramento aguas arriba es vertical y la velocidad de aproximación es despreciable, el cual consiste en la construcción de una curva compuesta por varios radios los cuales están en función de la altura total del proyecto H_0 , se muestra en la figura 3.12.
- Además para la utilización de este método se debe cumplir que la altura P sea igual o mayor a que la mitad de la altura de la carga total.

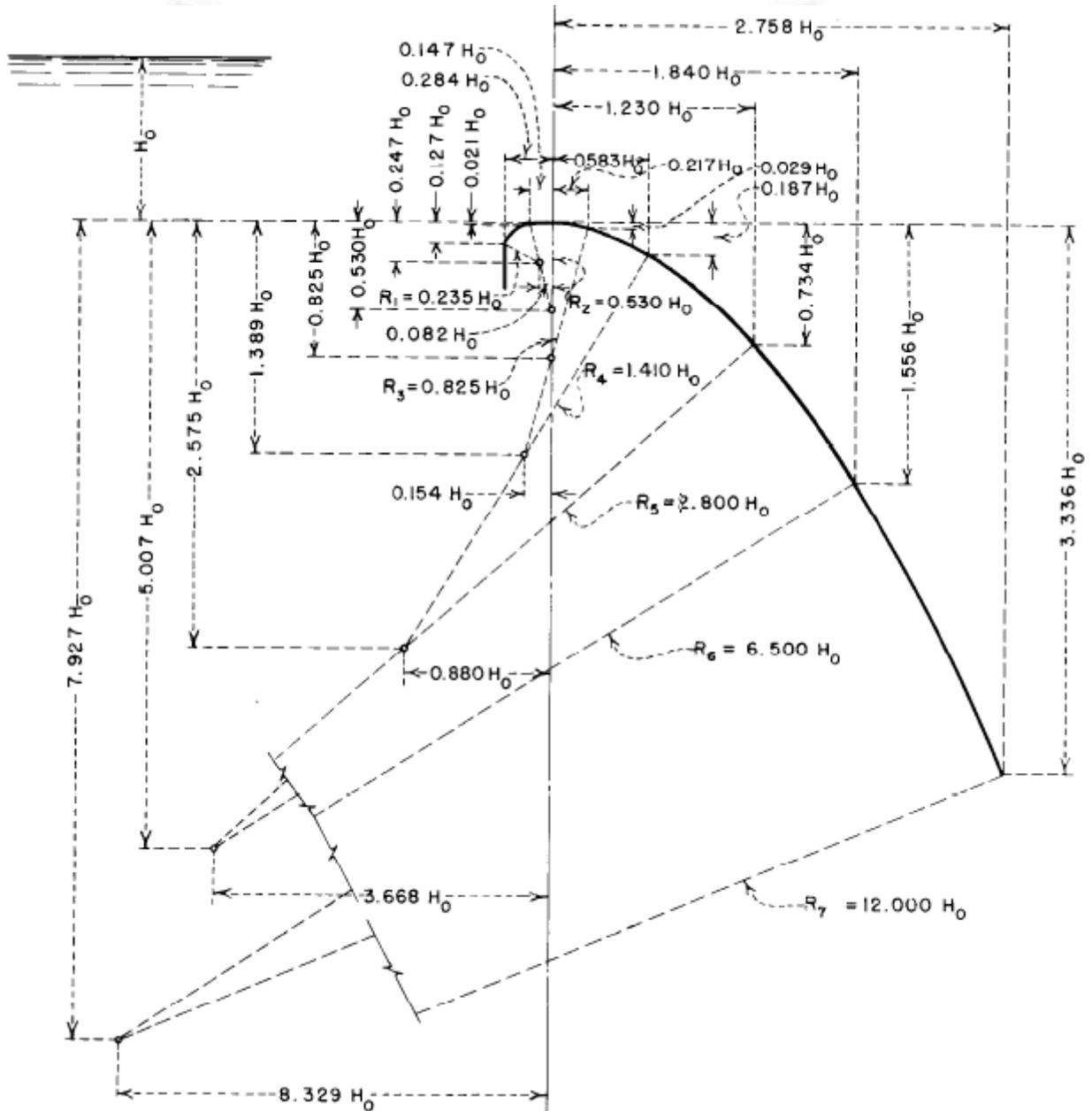


Fig. 3.12 Perfil de un vertedero estricto definido por composición de curvas circulares

Fuente: Diseño de pequeñas presas, Bureau of Reclamation Capitulo 9, Pag 441



4. DISIPADORES DE ENERGIA EN PRESAS

4.1. Definición de disipador de energía

- Es un dispositivo que se coloca generalmente al final del aliviadero para anular parte de la energía del agua y de esta manera devolverla al cauce lo más tranquila posible, para evitar posibles erosiones aguas abajo de la presa o al pie de esta.

4.2. Tipos de disipadores de energía

- Las obras de reintegro al cauce responden a dos conceptos y obras esencialmente distintos:

- Cuencos disipadores.
- Trampolines de lanzamiento.

4.2.1 Cuencos disipadores

- La corriente en régimen rápido ingresa a un cuenco en el que pasa a lento con la formación de un resalto, esto conlleva a una gran absorción de energía transformada en turbulencia y calor.



Fig. 4.1 Aliviadero De La Presas Sayano.Susenskaya-Argentina

Fuente: Presas y Centrales Argentinas
(Presasuba.wordpress.com/2013/11/23)

- La Bureau of Reclamation recomienda distintos tipos de cuencos disipadores, los cuales están principalmente en función del número de Froude, los más comunes se muestran a continuación:

4.2.1.1 Cuenco disipador Tipo I

- Puede usarse para cualquier número de Froude, No presenta bloques de choque.
- No es conveniente por razones económicas ya que el cuenco debe ser lo suficientemente largo para contener en caudal hasta su desaceleración.

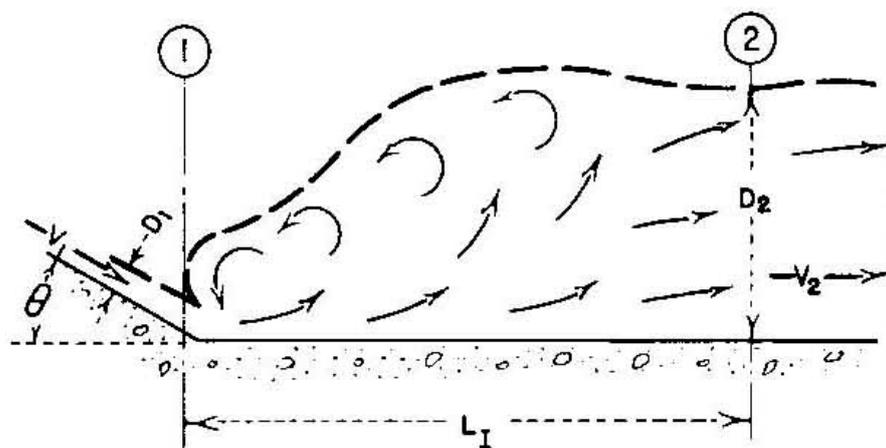


Fig. 4.2 Cuenco Disipador tipo I

Fuente: Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators Pag 223

4.2.1.2 Cuenco disipador Tipo II

- Diseñado especialmente para presas altas o de tierra y para canales largos
- Para números cercanos a 4.5

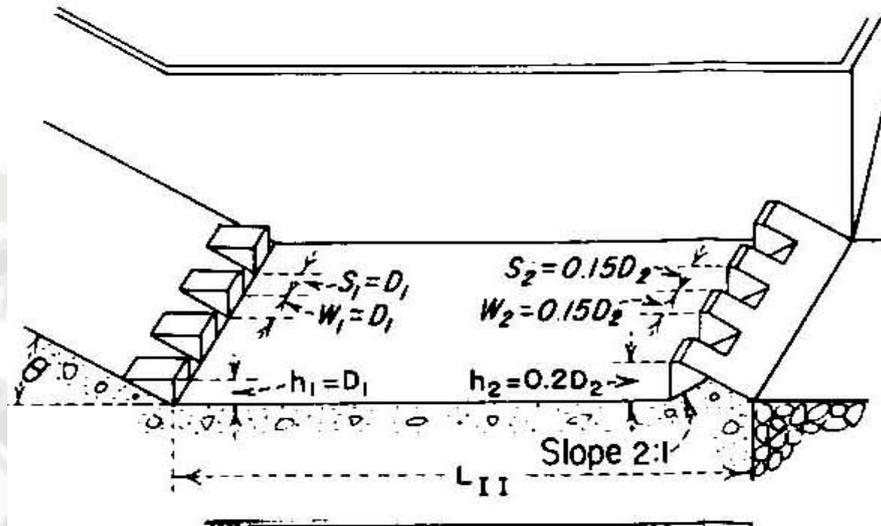


Fig. 4.3 Cuenco Disipador tipo II

Fuente: Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators Pag 223

4.2.1.3 Cuenco disipador Tipo III

- Diseñado especialmente para pequeñas presas.
- Para números cercanos a 4.5

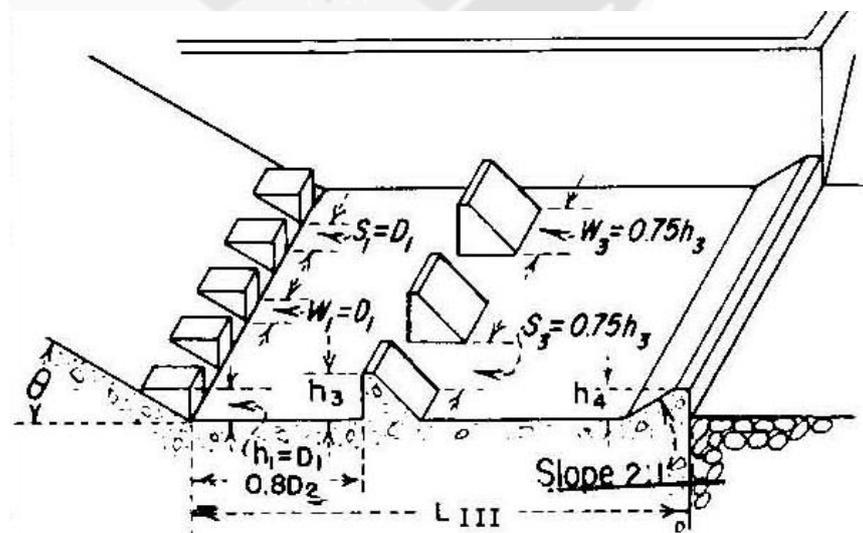


Fig. 4.4 Cuenco Disipador tipo III

Fuente: Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators Pag 223

4.2.1.4 Cuenco disipador Tipo IV

- Resulta ser más eficiente para flujos que presentan su número de Froude entre 2.5-4.5

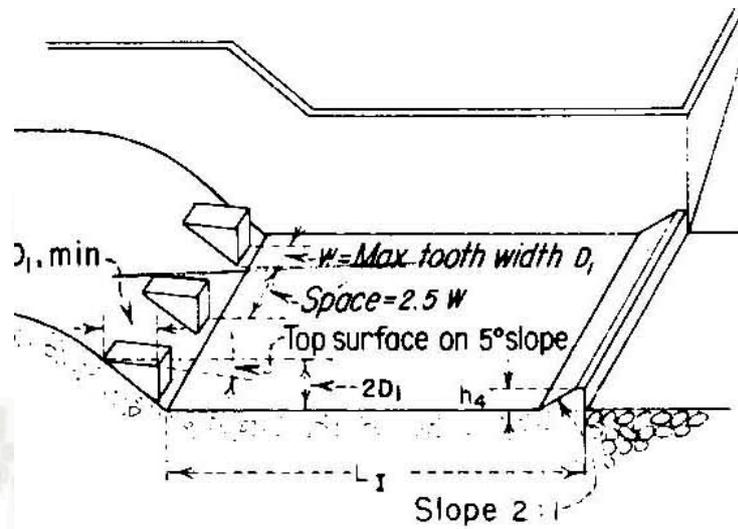


Fig. 4.5 Cuenco Disipador tipo IV

Fuente: Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators Pag 223

4.2.2 Trampolines de lanzamiento

- La corriente se lanza al cauce por medio de un trampolín de manera que caiga a cierta distancia de este, la energía es amortiguada por el propio cauce al formar un resalto natural.
- Como se mencionó en el acápite 1.2.1 el trampolín debe cumplir la condición de un lanzamiento óptimo, para cumplir esta condición se debe de tener un arreglo de las características geométricas del trampolín tales como el radio de la curvatura cóncava y el ángulo de lanzamiento para que el perfil del chorro tenga la forma deseada.
- Según Visher & Hager(1995) en un trampolín de lanzamiento se debe de considerar las siguientes partes:
 - a) Flujo de aproximación en el aliviadero
 - b) Desviación y despegue del Flujo
 - c) Dispersión del agua en el aire
 - d) Zona de impacto del chorro
 - e) Aguas abajo del impacto del chorro
- Estas partes se representan gráficamente en la figura 4.7
- En el capítulo 5 se presenta un análisis a profundidad de las características de un trampolín.



Fig. 4.6 Trampolín de la presa Srisailam-India

Fuente: [Foros.embalses.net/showthread.php/8226_presa-de-srisailam](https://foros.embalses.net/showthread.php/8226_presa-de-srisailam)



Fig. 4.7 Trampolín de la presa Ralco-Chile

Fuente: (Uribe, s.f)

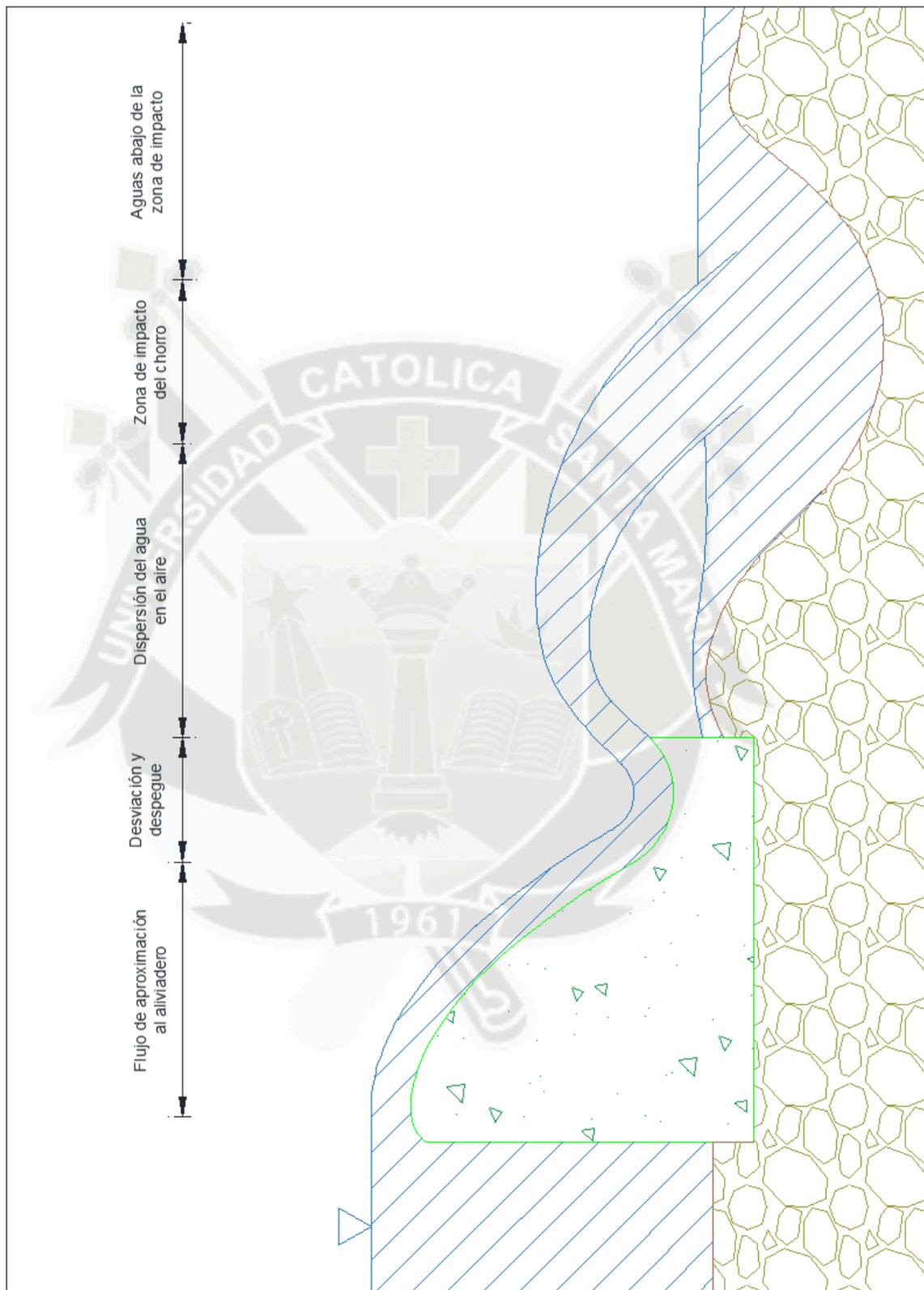


Fig. 4.8 Partes involucradas en el lanzamiento de un chorro por un trampolín
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



5. CARACTERÍSTICAS DE LOS TRAMPOLINES DE LANZAMIENTO

A continuación se presenta varios métodos existentes para determinar las características de un trampolín, los cuales se compararán en el capítulo 10 con los resultados obtenidos mediante el modelamiento.

5.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

5.1.1. RADIO DE CURVATURA DEL CUCHARÓN

- La distribución de presiones en el trampolín y la longitud de la trayectoria se ven afectadas por el radio, para mantener el flujo concéntrico y evitar altas presiones en cucharón del trampolín, el radio tiene que ser sustancialmente grande.
- Existen diversas ecuaciones para el cálculo del radio del trampolín propuestas por varios autores tales como:

a) DAMLE (1966)

$$R = \left(\frac{da}{do}\right)^{0.5} do \quad (5.1)$$

Donde:

- R : Radio del trampolín (m)
da : Carga de velocidad del flujo de aproximación (m)
do : Calado de aproximación (m)



b) VARSHNEY Y BAJAJ (1970)

$$R = \frac{do}{0.06} (Fr^{0.5} - 1.96) \quad (5.2)$$

Donde:

R : Radio del trampolín (m)
Fr : Número de Froude del flujo de aproximación
do : Calado de aproximación (m)

c) SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS-MEXICO (1977)

$$R > (2.5 - 3)do, \quad (5.3)$$

Donde:

R : Radio del trampolín (m)
do : Calado de aproximación (m)

d) U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1987)

$$R > 5do, \quad R = \left(\frac{da}{hp_{max}} \right) do \quad (5.4)$$

Donde:

R : Radio del trampolín (m)
da : Carga de velocidad del flujo de aproximación (m)
Hp_{max} : Carga de presión máxima (m)
do : Calado de aproximación (m)

e) MANSON(1993)

$$R = (3 - 5)do \quad (5.5)$$

Donde:

R : Radio del trampolín (m)
do : Calado de aproximación (m)

f) KHATSURIA (2005)

$$R = (3 - 7)do, \quad R = \sqrt{h_o \times Hcr_c} \quad (5.6)$$

Donde:

R : Radio del trampolín (m)
do : Calado de aproximación (m)

h_o : Carga sobre la cresta del aliviadero
 H_{cr-c} : Distancia vertical entre la cresta y el punto más bajo del cucharón

g) BUREAU OF INDIAN STANDARDS (2010)

$$R > 3do_{max}, \quad R = (0.6 - 0.8)\sqrt{h_o \times He_c} \quad (5.7)$$

Donde:

R : Radio del trampolín (m)
 do : Calado de aproximación (m)
 h_o : Carga sobre la cresta del aliviadero
 He_c : Distancia vertical entre el nivel del embalse y la superficie del agua en el cucharón

| La nomenclatura usada se expresa gráficamente en la figura 5.1

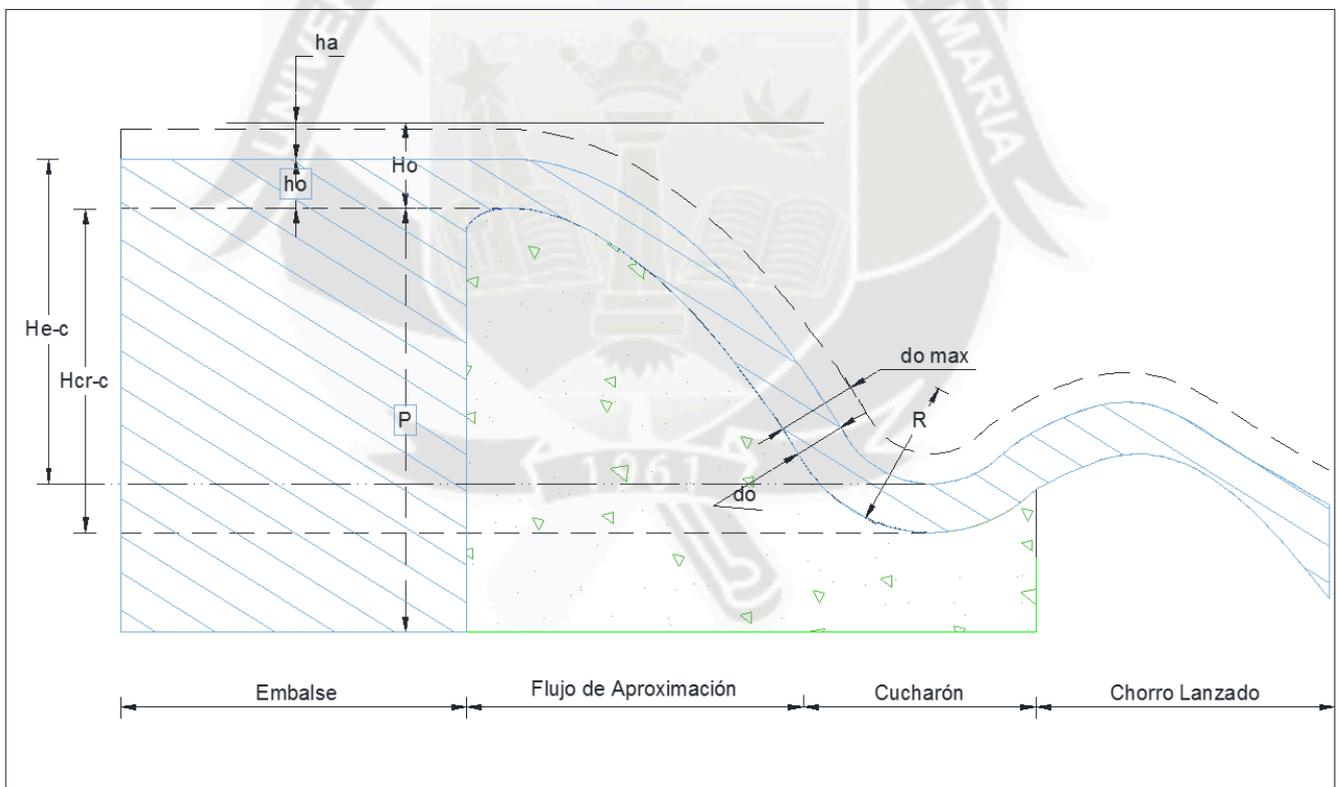


Fig. 5.1 Nomenclatura utilizada para la definición del radio de la curvatura de un trampolín expresada gráficamente

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



5.1.2. ÁNGULO DE LANZAMIENTO

- El ángulo del labio afecta la distancia de proyección horizontal. Los factores que afectan a la distancia de proyección horizontal también incluyen la velocidad inicial del flujo y la diferencia de altura entre el labio y el tirante del agua. Normalmente el ángulo adoptado del labio es de 20° a 40°. A medida que el chorro incide sobre aguas abajo en un ángulo más pronunciado se traduce en erosión más profunda, la elección final depende del lanzamiento mínimo permisible por las condiciones del suelo aguas abajo. Para los labios sumergidos el ángulo del labio inferior de 30° se puede adoptar para reducir al mínimo las presiones sub-atmosféricas en el labio.
- Para el cálculo del ángulo de lanzamiento que brinde el mayor alcance horizontal, se puede definir de manera teórica la trayectoria que puede presentar el chorro conociendo las ecuaciones del movimiento de la cinemática las cuales son:

$$x = V_x t \quad (5.8)$$

$$z = z_0 + V_z t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (5.9)$$

A partir de estas ecuaciones, eliminando el parámetro t se obtiene la parábola de lanzamiento:

$$z = z_0 + \frac{V_z}{V_x} x - \frac{g}{2V_x^2} x^2 \quad (5.10)$$

Sabiendo que :

$$V_x = V \cos \theta \quad \wedge \quad V_z = V \sin \theta \quad (5.11) \text{ y } (5.12)$$

$$\frac{V_z}{V_x} = \tan \theta = m \quad (5.13)$$

→ La ecuación 5.10 se puede expresar de la siguiente forma:

$$z = z_0 + x \tan \theta - \frac{g}{2V^2 \cos^2 \theta} x^2 \quad (5.14)$$

Según la U.S. BUREAU OF RECLAMATION

La ecuación 5.14 se presenta de la siguiente forma:

$$z = z_0 + x \tan \theta - \frac{x^2}{K[4(d+h_v) \cos^2 \theta]} \quad (5.15)$$

Siendo K un coeficiente igual a 1 para un chorro teórico, el cual en la práctica se adopta como K= 0.9 para tener en cuenta las pérdidas de energía y velocidad debidas al efecto de resistencia del aire, a las turbulencias internas y a las desintegración del chorro.

Se observa una clara semejanza entre las ecuaciones 5.14 y 5.15, donde $V^2/g=2(d+h_v)$.

Luego a partir de la ecuación (5.14)



$$z = z_0 + mx - (1 + m^2) \frac{g}{2v^2} x^2 \quad (5.16)$$

Haciendo $z=0$, $x=D$ (distancia desde el borde de lanzamiento para un valor dado de m) y reordenando la ecuación de la forma $ax^2 + bx + c = 0$, se tiene:

$$0 = 2v^2 z_0 + 2v^2 mx - 2v^2(1 + m^2)gx^2 \quad (5.17)$$

$$gD^2 m^2 - 2v^2 Dm + gD^2 - 2v^2 Z_0 = 0 \quad (5.18)$$

Siendo “ m ” la variable, y usando la ecuación general para hallar las raíces de una ecuación cuadrática:

$$m_1, m_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5.19)$$

Las raíces de la ecuación 5.19 son:

$$m_1, m_2 = \frac{2v^2 D \pm \sqrt{4v^4 D^2 - 4gD^2(gD^2 - 2v^2 Z_0)}}{2gD^2} \quad (5.20)$$

$$m_1, m_2 = \frac{2v^2 D \pm 2D \sqrt{v^2(v^2 + 2gZ_0) - g^2 D^2}}{2gD^2} \quad (5.21)$$

Cuando el radical $v^2(v^2 + 2gZ_0) - g^2 D^2 > 0$ esta ecuación tiene dos raíces positivas, luego una distancia D dada puede ser alcanzada con dos pendientes distintas m_1, m_2 .

La distancia máxima alcanzable se presenta cuando el radical se hace cero la cual con una velocidad v desde una altura de lanzamiento Z_0 es:

$$v^2(v^2 + 2gZ_0) = g^2 D_{max}^2 \quad (5.22)$$

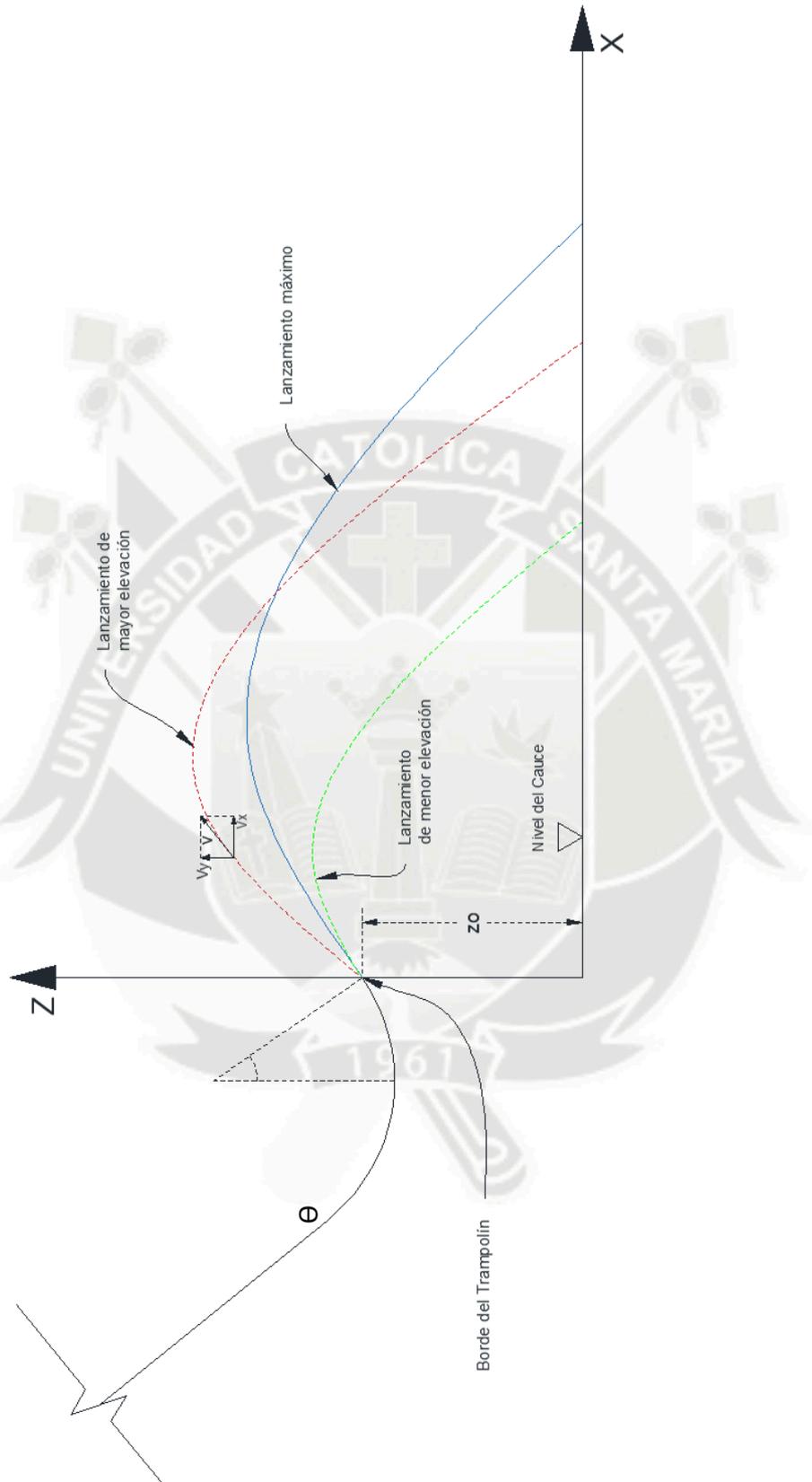


Fig. 5.2 Trayectorias de lanzamiento por un trampolín para diferentes ángulos de salida

Fuente: Tratado básico de presas Tomo II- Eugenio Vallarino 703



- En las figuras 5.3 y 5.4 se muestra que para una determinada velocidad ($v=30\text{m/s}$), a medida que la distancia horizontal es mayor la pendiente “m1” es menor llegando a ser su valor mínimo “1” y la pendiente “m2” es mayor llegando a ser su valor máximo “1”, pues para mayores valores de “D” se presenta la raíz de un número negativo, lo cual genera números imaginarios y por lo tanto distancias inalcanzables.

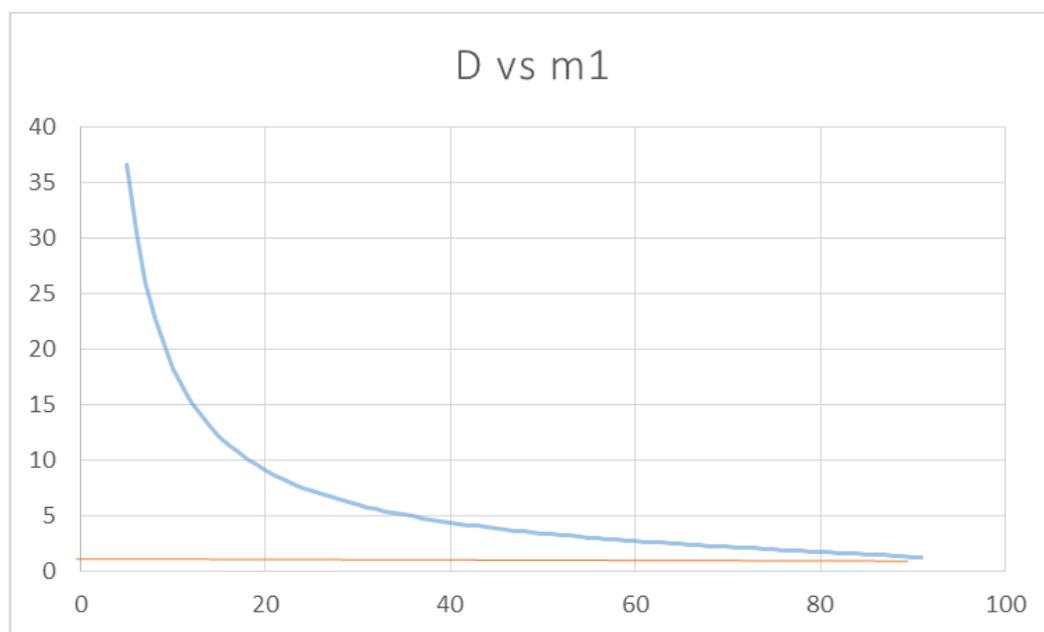


Fig. 5.3 Representación gráfica de la variación de la distancia horizontal con respecto a la pendiente de lanzamiento del labio de un trampolín para pendientes mayores a 1.

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

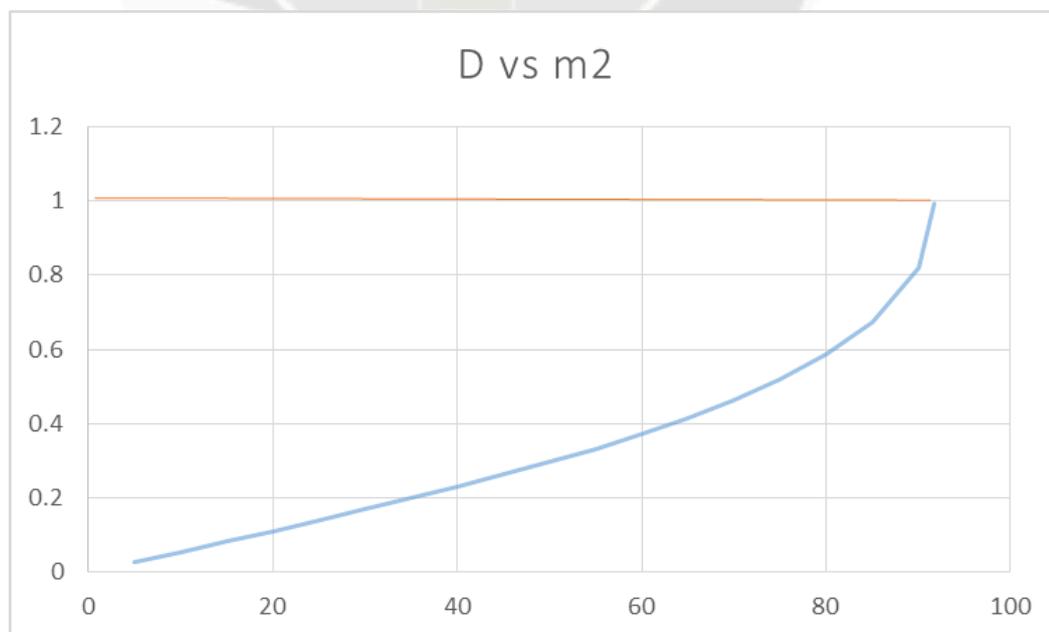


Fig. 5.4 Representación gráfica de la variación de la distancia horizontal con respecto a la pendiente de lanzamiento del labio de un trampolín para pendientes menores a 1.

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



$$D_{max} = \frac{v^2}{g} \sqrt{1 + \frac{2gZ_0}{v^2}} \quad (5.23)$$

- También al ser el radical cero solo existiría una raíz:

$$m = \frac{2v^2 D}{2gD^2} = \frac{v^2}{gD_{max}} \quad (5.24)$$

- Sustituyendo la ecuación 5.23 en 5.24 se presenta:

$$m = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2gZ_0}{v^2}}} \quad (5.25)$$

- Si $Z_0 = 0$, según la ecuación 5.25 $m = 1$ ($\Theta = 45^\circ$) y $D = \frac{v^2}{g}$. Las cuales son las condiciones de mayor alcance horizontal, condiciones que no se dan nunca en un trampolín pues se debe cumplir que $Z_0 > 0$ para una correcta ventilación del flujo a la salida del trampolín, como se muestra en la ecuación 5.25 la pendiente de salida “m” y la elevación del lanzamiento “Z₀” son inversamente proporcionales por lo tanto se necesitarán menores ángulos de salida para mayores alturas de elevación, debido a la presencia de la velocidad elevada al cuadrado.

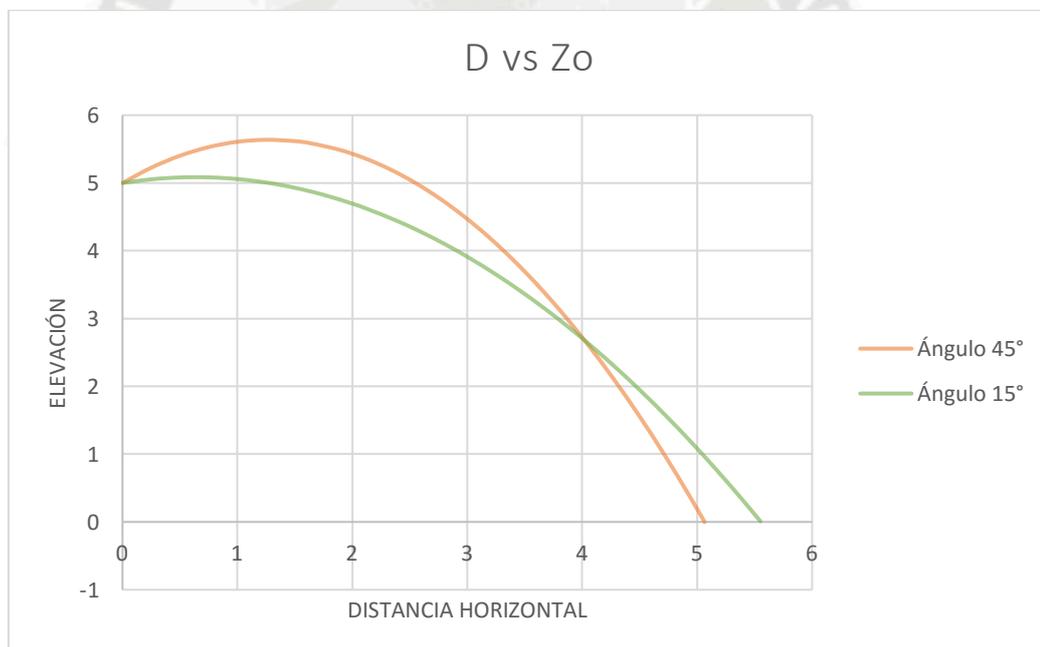


Fig. 5.5 muestra la diferencia entre el alcance horizontal para los chorros de agua lanzados a una misma velocidad ($V=5\text{m/s}$) y desde una misma elevación. En el gráfico se puede observar que el chorro lanzado con un ángulo de 45° presenta mayor alcance horizontal en trayecto inicial, pero conforme van cayendo una mayor distancia el chorro lanzado con un ángulo de 15° es el que presenta el mayor alcance horizontal, esta diferencia se hace mínima para la mayores velocidades, debido a la presencia de la velocidad elevada al cuadrado en la ecuación 5.23, por lo que para velocidades altas el mayor alcance horizontal se alcanzará con ángulos cercanos a 45° .

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

5.1.3. ELEVACION DEL LANZAMIENTO

- La fijación de la elevación del trampolín depende las condiciones del agua de descarga para una acción se simetría clara aguas abajo el labio tendrá que mantenerse por encima del nivel máximo de aguas abajo.
- El ábaco de la Bureau of Indian Standars presentado en la figura 5.6 da la sumersión (d_4) en el que la acción de lanzamiento se convertiría en un trampolín sumergido. La interferencia aguas abajo afecta el desempeño del trampolín cambiando las condiciones de flujo y pudiendo resultar en altas presiones sub-atmosféricas en el labio.

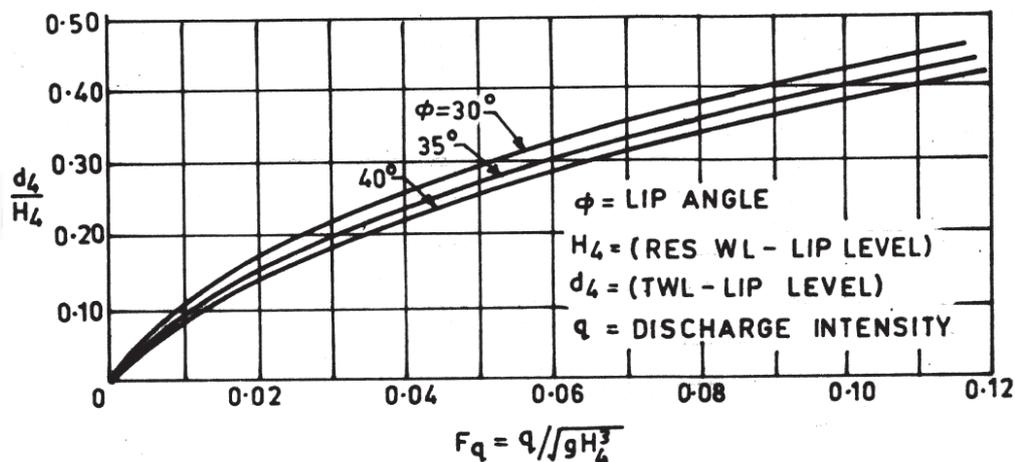


Fig. 5.6 Abaco que indica los valores de elevación de un trampolín para que exista o no sumergencia de este aguas abajo

Fuente: Criteria for Hydraulic Design of Bucket Type Energy Dissipators- Bureau of Indian Standars Pag 15

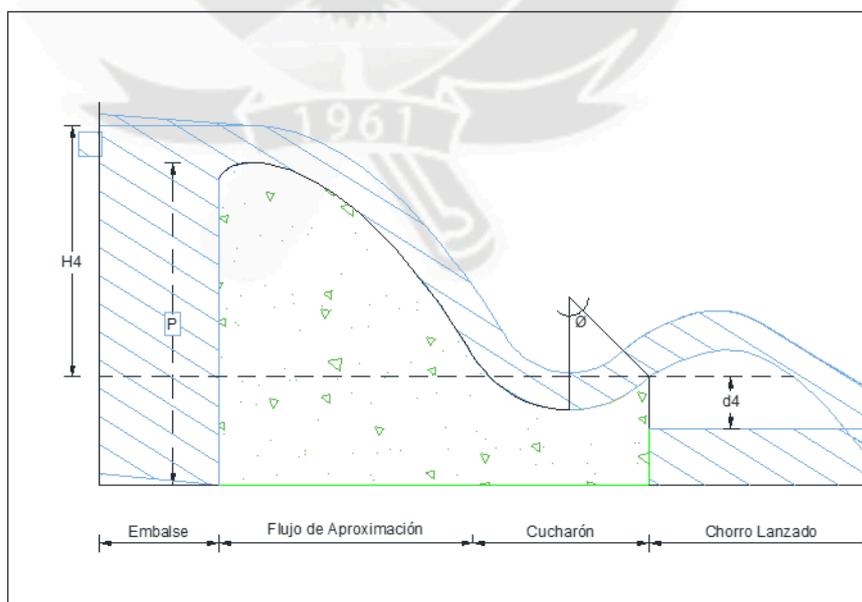


Fig. 5.7 Representación gráfica de la nomenclatura utilizada en la Fig.4.13

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

- A veces los trampolines de lanzamiento se encuentran en mayor nivel sobre el aliviadero para facilitar la construcción de una central eléctrica en la punta del aliviadero en el caso de estos trampolines de alto nivel es necesario tener en cuenta el efecto de la erosión aguas abajo que puede causar el deslizamiento de laderas de apoyo si las condiciones geológicas no son favorables. También las pulverizaciones desde el chorro de agua pueden estropear las instalaciones eléctricas cercanas que se necesitan proteger.
- Como se vio en el acápite anterior la elevación es un factor influyente en el alcance horizontal del chorro de agua, por lo que debe ser considerada para el diseño de la trayectoria del chorro.

5.2. CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS

5.2.1. PRESIONES EN EL CUCHARÓN

- Para el análisis de las presiones en el cucharón en primer lugar se debe de observar que tiene la forma de una curvatura cóncava, según Ven Te Chow los canales con curvatura cóncava presentan mayores presiones, siendo estas críticas en el punto de menor elevación Fig. 5.8

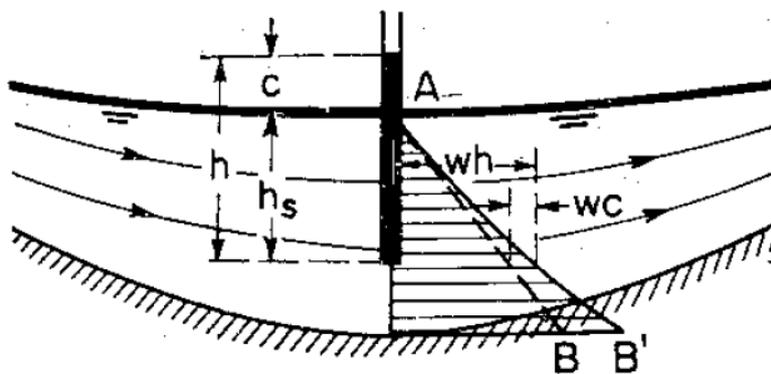


Fig. 5.8 Muestra en diagrama de distribución de presiones, se observa que la presión piezométrica h que es igual a $h_s + c$, siendo h_s la presión hidrostática y c la presión ocasionada por la curvatura cóncava.

Fuente: Hidráulica de canales abiertos -Ven Te Chow pag. 30

- Sumado el flujo de agua llega desde el canal de aproximación con grandes velocidades, lo cual aumenta la presión de manera considerable si se le compara con la presión hidrostática.
- Para una distribución uniforme de presiones debe existir un diseño adecuado del trampolín con énfasis en el radio, pues conforme este sea mayor las presiones son menores.
- Las fuerzas hidráulicas que actúan sobre un trampolín de lanzamiento son de interés para el diseño estructural del trampolín.
- Los estudios teóricos, en modelos y prototipos de datos que indican que las presiones inferiores cambian continuamente a través del trampolín que son función de la velocidad de entrada, la profundidad del flujo el radio de curvatura y el ángulo de deflexión.



- El concepto de la fuerza centrífuga da una indicación del efecto de las variables independientes, la fuerza centrífuga junto con la profundidad del agua correspondiente en el trampolín indicaría la presión sobre el trampolín.
- Para la obtención de las presiones se proponen varios métodos los cuales se presentan a continuación

a) BALOFFET

$$hp_{max} = d + \frac{v^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{R-d}{R} \right)^2 \right] \quad (5.26)$$

Donde:

- $H_{p_{max}}$: Carga de presión máxima sobre el cucharón en m.c.a
 d : Distancia perpendicular entre la superficie libre y el fondo del canal (m)
 V : Velocidad media del flujo de aproximación (m/s)
 R : Radio del cucharón (m)

b) BUREAU OF INDIAN STANDARDS

La ecuación que involucra términos aplicables a la trayectoria de las presiones del trampolín se puede escribir como:

$$P = \left(\frac{v_a^2}{gR} + 1 \right) \gamma d_1 \quad (5.27)$$

Dónde:

- P : Presión en el cucharón (t/m^2)
 V_a : Velocidad del flujo entrante (m/s)
 G : Gravedad (m/s^2)
 R : Radio del trampolín (m)
 γ : Peso específico del agua (t/m^3)

La figura 5.9 presenta las presiones máximas teóricas en trampolines que varían de 10 a 45m/s y relaciones radio / profundidad que varía de 4 a 10. Las presiones reales varían considerablemente más en el trampolín, sin embargo las curvas mostradas en la figura 14 se utilizarán para calcular la carga hidráulica por metro cuadrado de superficie de trampolín. El diseño de las paredes de formación adyacentes al trampolín también deben tenerse en cuenta estas presiones.

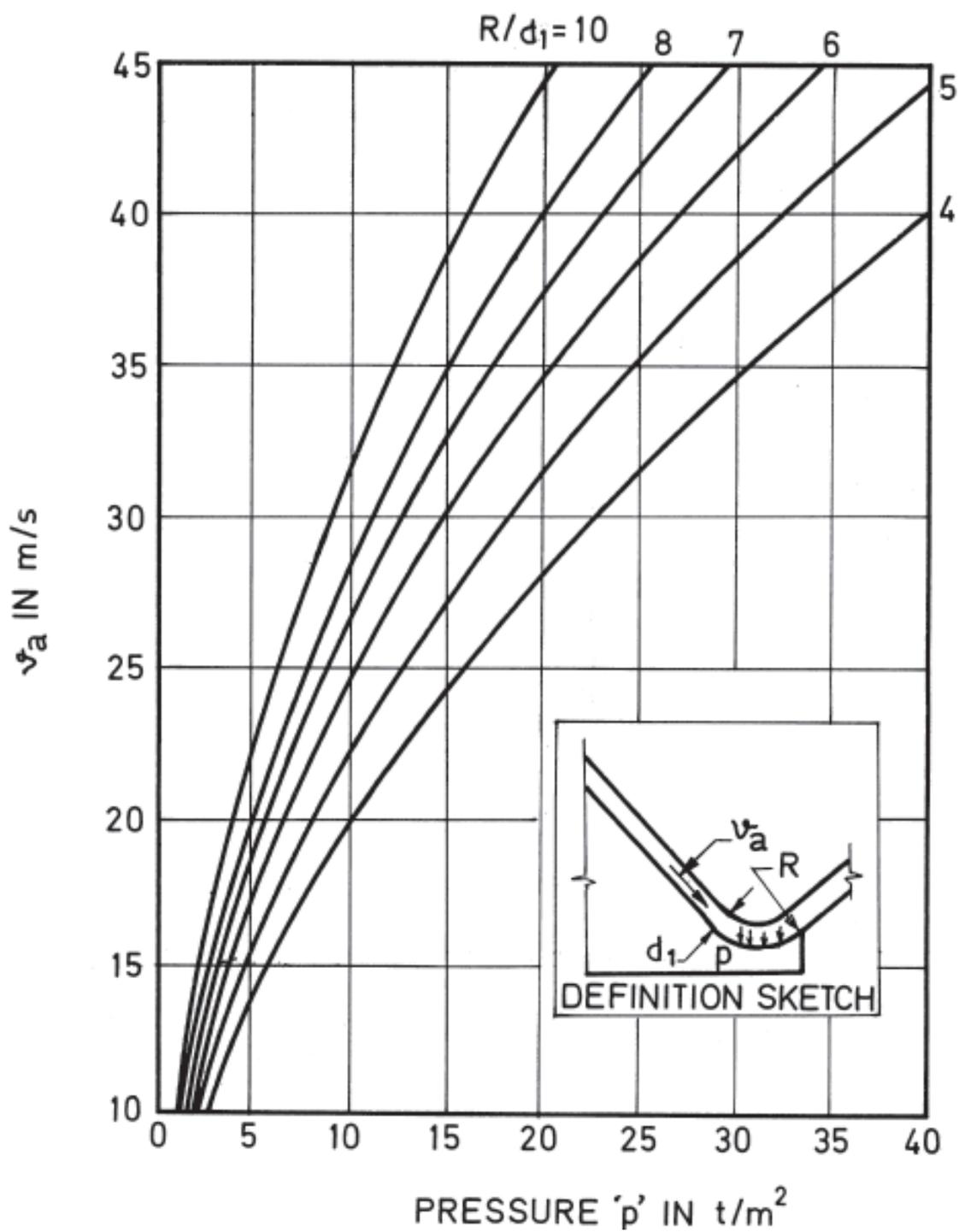


Fig. 5.9 Presiones teóricas en un trampolín

Fuente: Bureau of Indian Standards – Criteria for Hydraulic Designing of Bucket Type Energy Dissipators pag. 16

c) WATERWAYS EXPERIMENT STATION

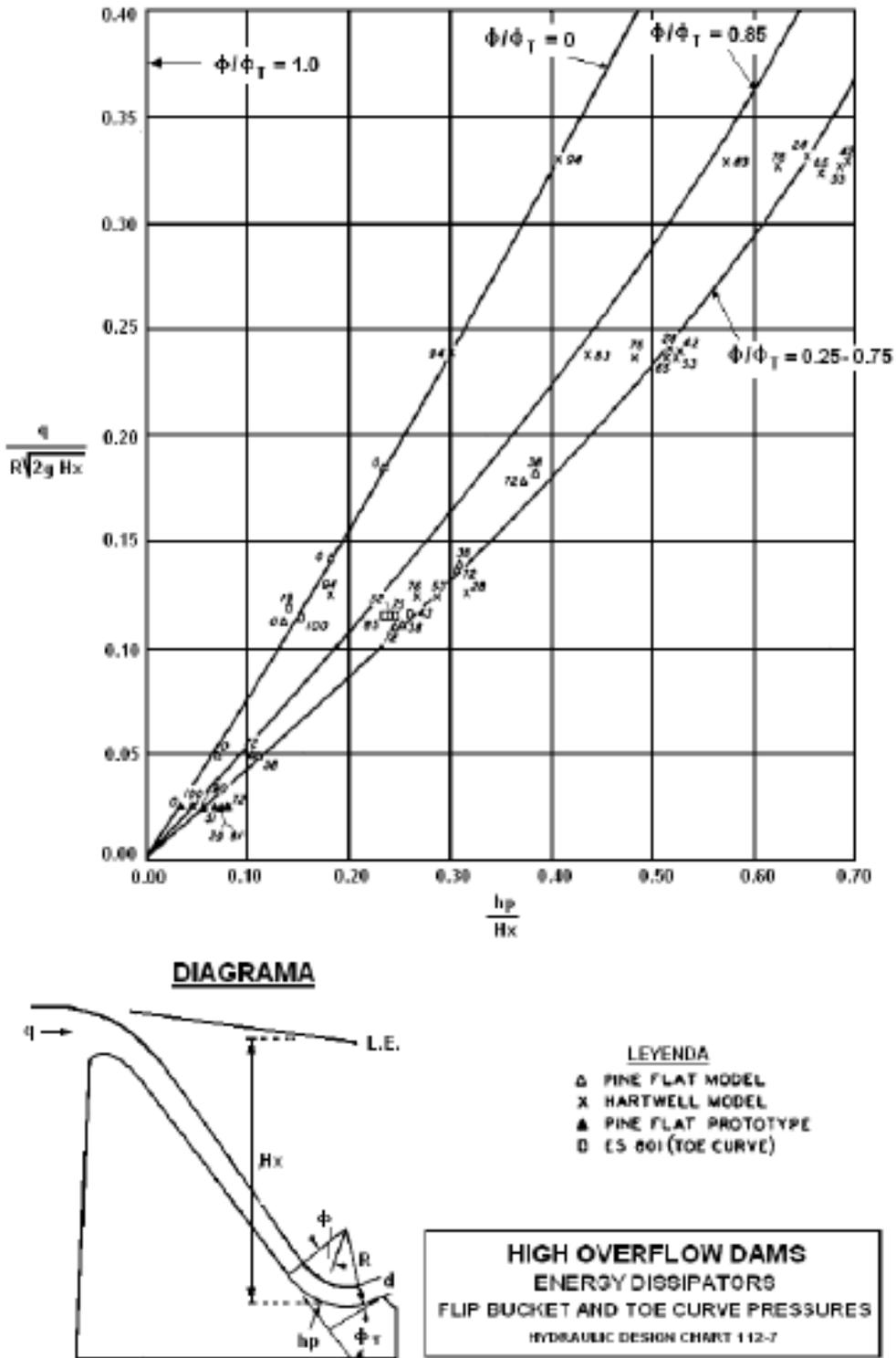


Fig. 5.10 Presiones en un trampolín según modelo y prototipo

Fuente: Waterways Experiment Station, 1988, pág. HDC 112 7

5.2.2. VELOCIDADES SOBRE EL TRAMPOLÍN

- Se pueden diferenciar tres tramos para la velocidad sobre un trampolín las cuales son:
 - a) Velocidad del flujo de aproximación
 - b) Velocidad sobre el cucharón del trampolín
 - c) Velocidad del chorro lanzado

5.2.2.1. VELOCIDAD DEL FLUJO DE APROXIMACIÓN

- La velocidad del flujo de aproximación es muy importante al momento de diseñar un trampolín de lanzamiento ya que a partir de esta velocidad y conociendo el caudal unitario que se presenta en un cimacio se puede obtener el calado de aproximación, el cual como se vio en el capítulo 5.1.1 está ligado estrictamente al radio del trampolín.

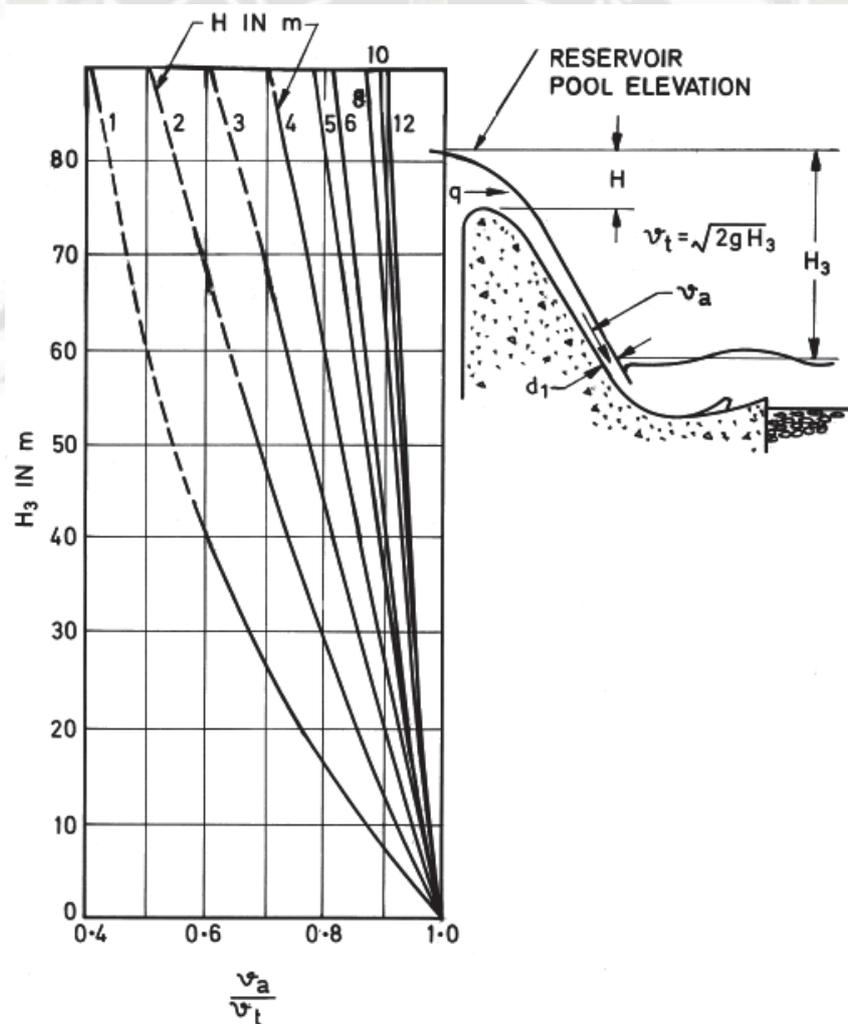


Fig. 5.11 Curvas para la determinación de la velocidad del flujo de aproximación

Fuente: Bureau of Indian Standards – Criteria for Hydraulic Desing of Bucket Type Energy Dissipators pag. 9

5.2.2.2. VELOCIDAD SOBRE EL CUCHARÓN DEL TRAMPOLÍN

- Esta velocidad es la responsable de las altas presiones sobre el cucharón del trampolín, para que exista un comportamiento hidráulico estable las líneas de corriente del flujo deben de seguir trayectorias concéntricas.
- Según Sotelo la velocidad en el cucharón del flujo en un trampolín mediante un análisis de potencial del flujo se puede expresar mediante la ecuación 5.28.

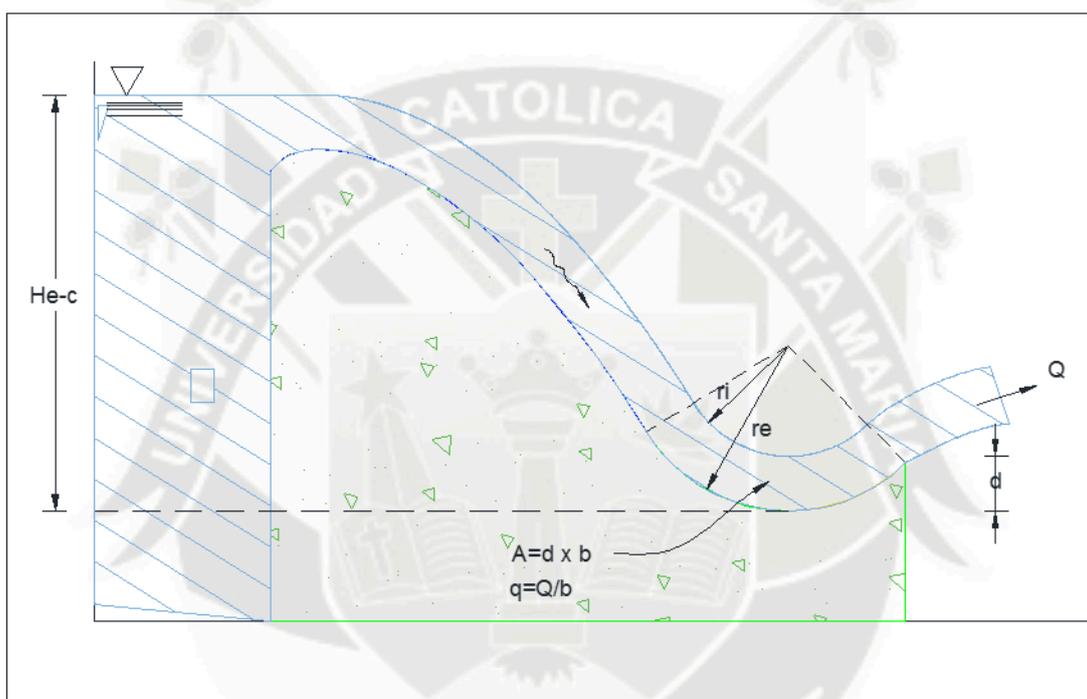


Fig. 5.12 Representación gráfica de la nomenclatura utilizada para definir la velocidad de flujo en el cucharón de un trampolín

Fuente: Hidráulica general Volumen 1 Fundamentos-Sotelo Pág. 411

$$v_e = \frac{q}{r_e \ln\left(\frac{r_e}{r_1}\right)} \quad \wedge \quad v_i = \frac{q}{r_i \ln\left(\frac{r_e}{r_1}\right)} \quad (5.28 \text{ Y } 5.29)$$



6. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS PARA LA REALIZACIÓN DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO

6.1. INTRODUCCIÓN

- Para llevar a cabo la realización del modelamiento hidráulico se construyó un sistema de recirculación de flujo compuesto por: dos canales, una piscina de almacenamiento de agua, 3 bombas centrífugas y un sistema de tuberías con sus respectivos accesorios.

6.2. DISEÑO

6.2.1. DIMENSIONES DEL CANAL

- Se adecuó la estructura de un canal utilizado anteriormente para una investigación, el cual tenía como dimensiones ancho: 0.40m y largo: 3.60m, y se modificó siendo las nuevas longitudes:
 - Ancho del canal : 0.40 m
 - Largo del canal : 6.60 m
- Se aumentó 3.00 m al largo del canal, de los cuales 0.60m contienen la cámara uniformizadora, la cual recibe el flujo de agua que llega de las tuberías.
- El canal presenta una altura variable de 0.85 m a 0.20 m, debido a la variación que existe en el calado de los diferentes segmentos del canal.

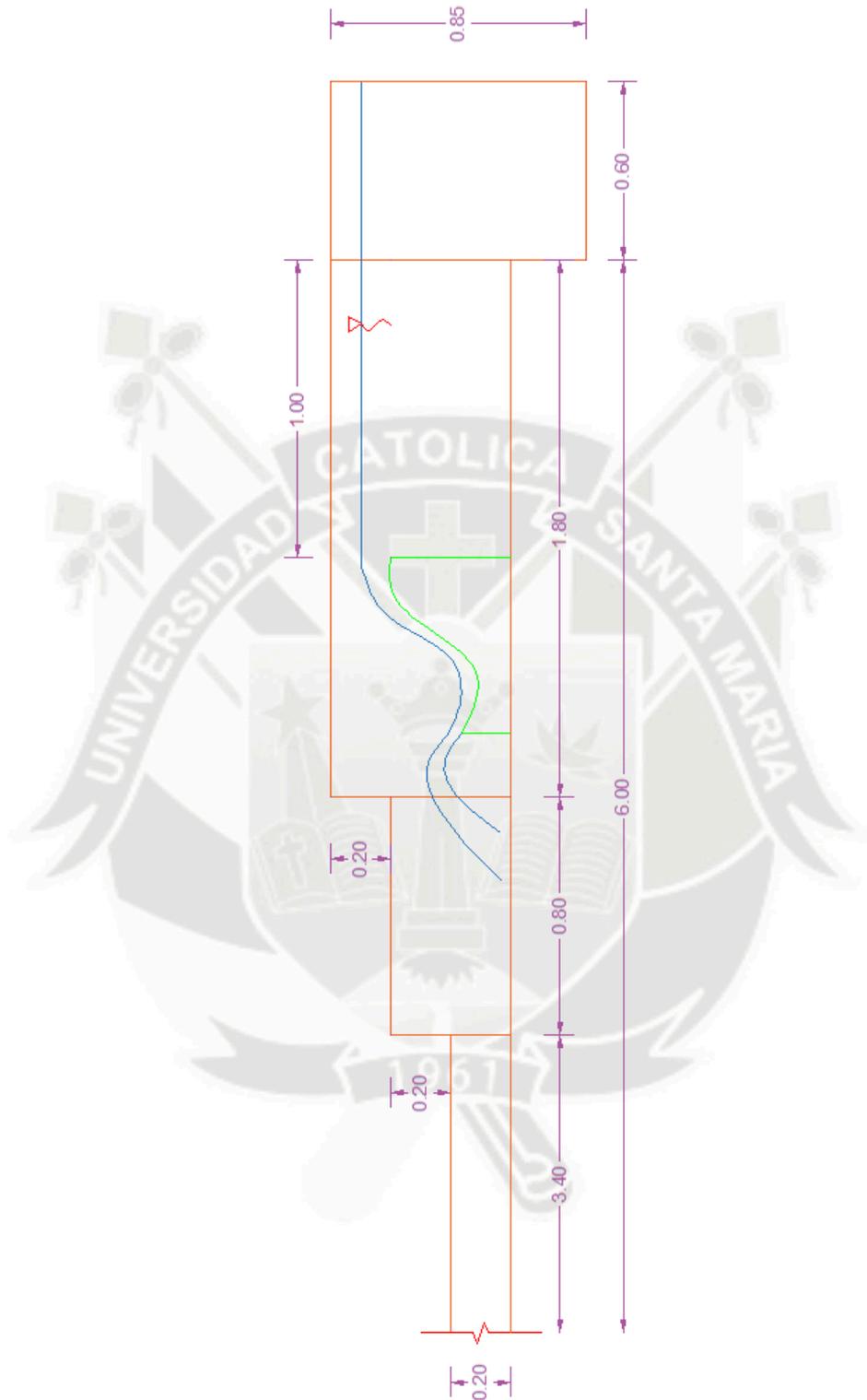


Fig. 6.1 Dimensiones del canal utilizado para el modelamiento

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



6.2.2. CAUDAL

- Mediante un análisis de varios diseños se optó por el presentado en la figura 7.1(2D) y 7.2 (3D)
- Se necesita en total un caudal de 30 l/s el cual lo generarán 3 bombas centrífugas, y se presentan los siguientes datos:

✓ Densidad del agua	1000	kg/m ³
✓ Diámetro de tubería de impulsión	3	pulg.
✓ Diámetro de tubería de succión	3	pulg.
✓ Bomba centrífuga 3 x 3	2	hp
✓ Desnivel a vencer	2.3	m
✓ Longitud de succión	0.85	m
✓ Longitud de impulsión	7.80	m
✓ Gravedad	9.81	m/s ²

- Para que el modelamiento presente una escala de 1/50, el caudal mínimo con el que se debe ensayar es de 30 l/s y para que exista un rango adecuado de caudales se modelará con 3 bombas, por lo que cada bomba debe impulsar como mínimo 10 l/s.
- Se calculará la potencia necesaria que requeriría una bomba para impulsar un caudal de 10 l/s a continuación:

En primer lugar se realiza el cálculo de la altura de la bomba para luego determinar la potencia requerida, para lo cual se deben determinar los términos de la ecuación 6.1

$$HB = Z_{1-2} + hf_{succión} + hf_{impulsión} + hm \quad (6.1)$$

Donde:

HB	:	Altura de la bomba (m)
Z ₁₋₂	:	Desnivel existente entre el punto 1 y 2 (m)
hf _{succión}	:	Pérdidas por fricción en la tubería de succión (m)
hf _{impulsión}	:	Pérdidas por fricción en la tubería de impulsión (m)
hm	:	Pérdidas locales

Fig. 6.2 Dibujo en elevación del sistema de recirculación de flujo
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

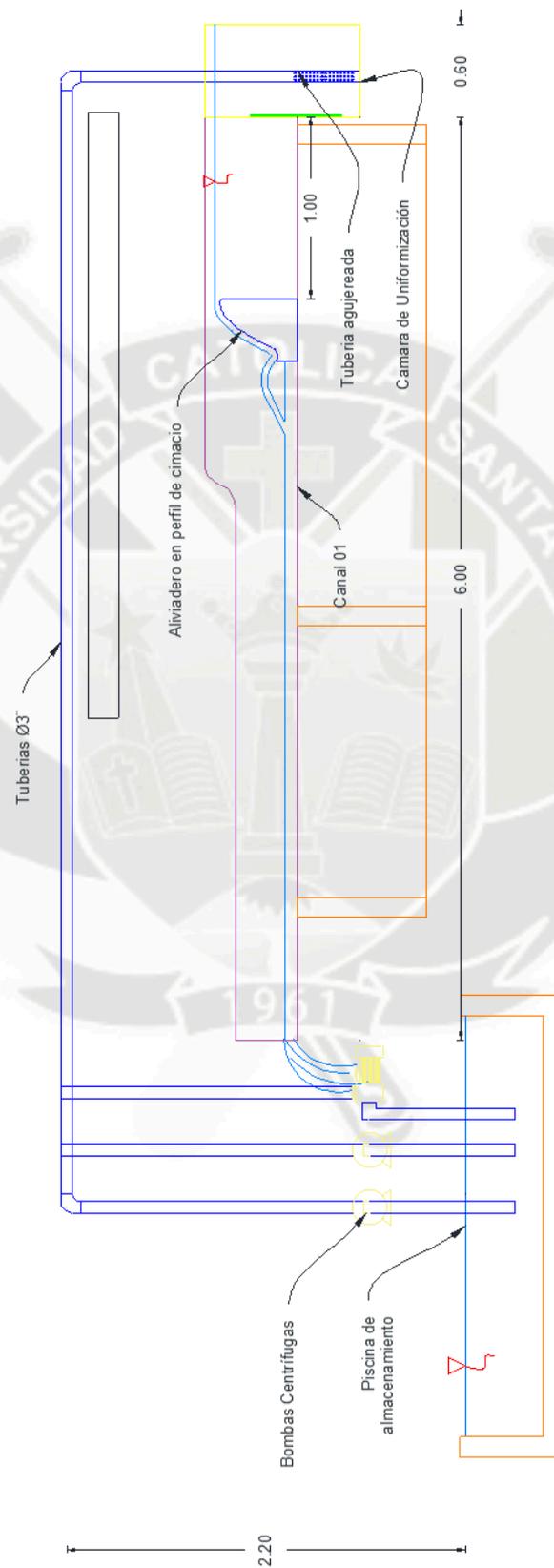
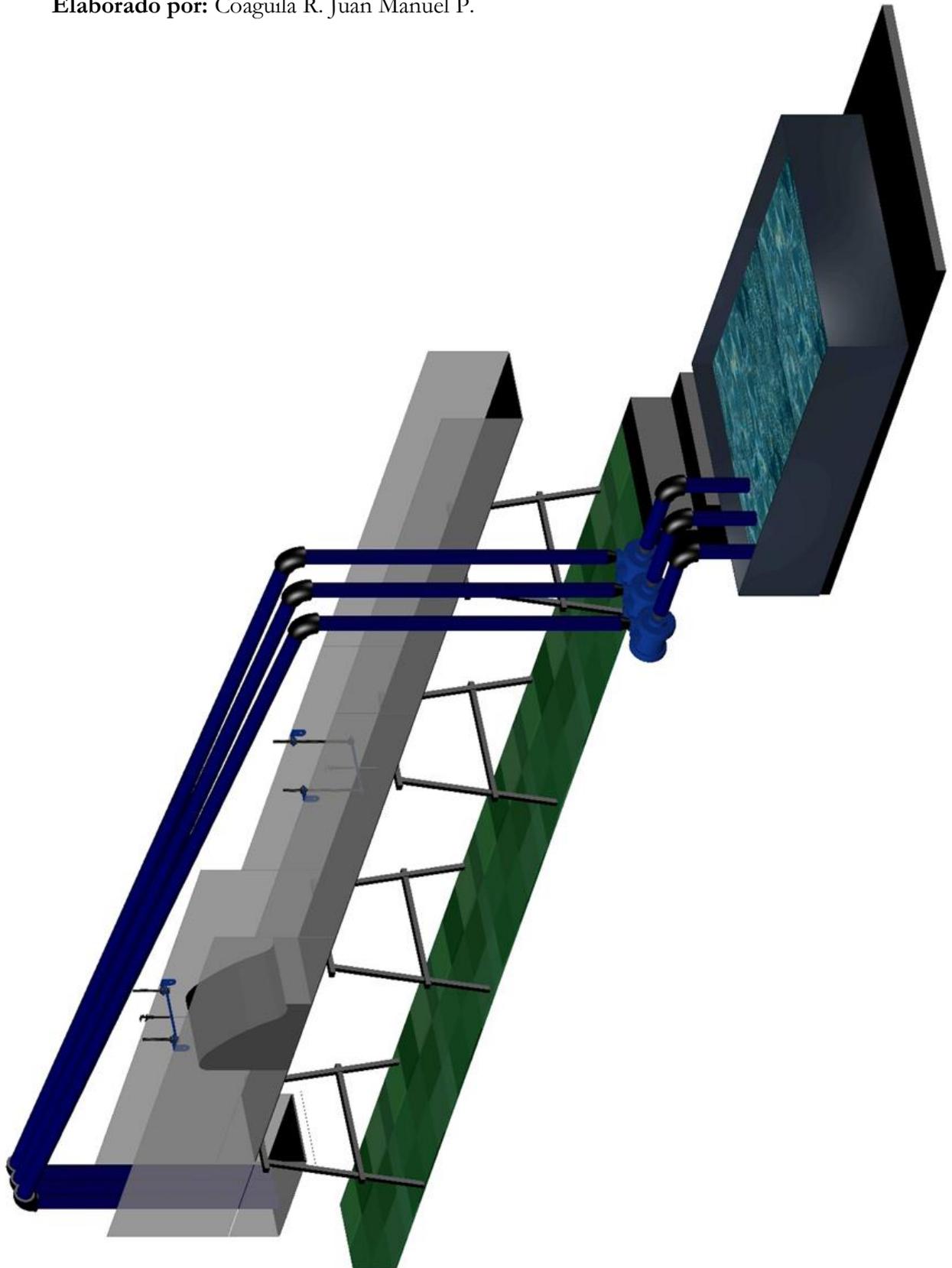


Fig. 6.3 Dibujo en 3D del sistema de recirculación de flujo
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.





- a) El desnivel existente entre el nivel del agua en la piscina y la altura máxima a bombear es 2.20m como lo indica la figura 6.2
- b) Las pérdidas por fricción en la tubería de succión se calculan mediante la ecuación 6.2:

$$hf_{\text{succión}} = f \frac{L v^2}{d 2g} \quad (6.2)$$

Donde:

f	:	Coefficiente de fricción (sin dimensiones)
L	:	Longitud de la tubería (m)
d	:	Diámetro de la tubería (m)
v	:	Velocidad media (m/s)
g	:	Aceleración de la gravedad (m/s ²)

Coefficiente de fricción

Se determinará a partir del diagrama de Moody fig. 6.4, para esto se puede observar que se necesita el número de Reynolds y la rugosidad relativa.

Número de Reynolds

$$RE = \frac{vD}{\nu} \quad (6.3)$$

Donde:

$$\text{Diámetro de la tubería}(D) = 3 \text{ pulg.} = 3 \times \frac{2.54}{100} = 0.0762 \text{ m}$$

$$\text{Velocidad media}(v) = \frac{\text{Caudal}(Q)}{\text{Área de la tubería}(A)} = \frac{10 \times 10^{-3}}{\pi \times \frac{(0.0762)^2}{4}} =$$

$$\text{Velocidad media}(v) = 2.193 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La viscosidad cinemática del agua (ν) es 0.0112 cm²/s

$$\therefore RE = \frac{2.193 \times 0.0762}{0.0112 \times 10^{-4}} = 149188.762$$

Rugosidad relativa



La rugosidad para una tubería de PVC es 0.0015 mm y con un diámetro de tubería de 3 pulg.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{0.0015}{0.0762 \times 10^3} = 1.9685 \times 10^{-5}$$

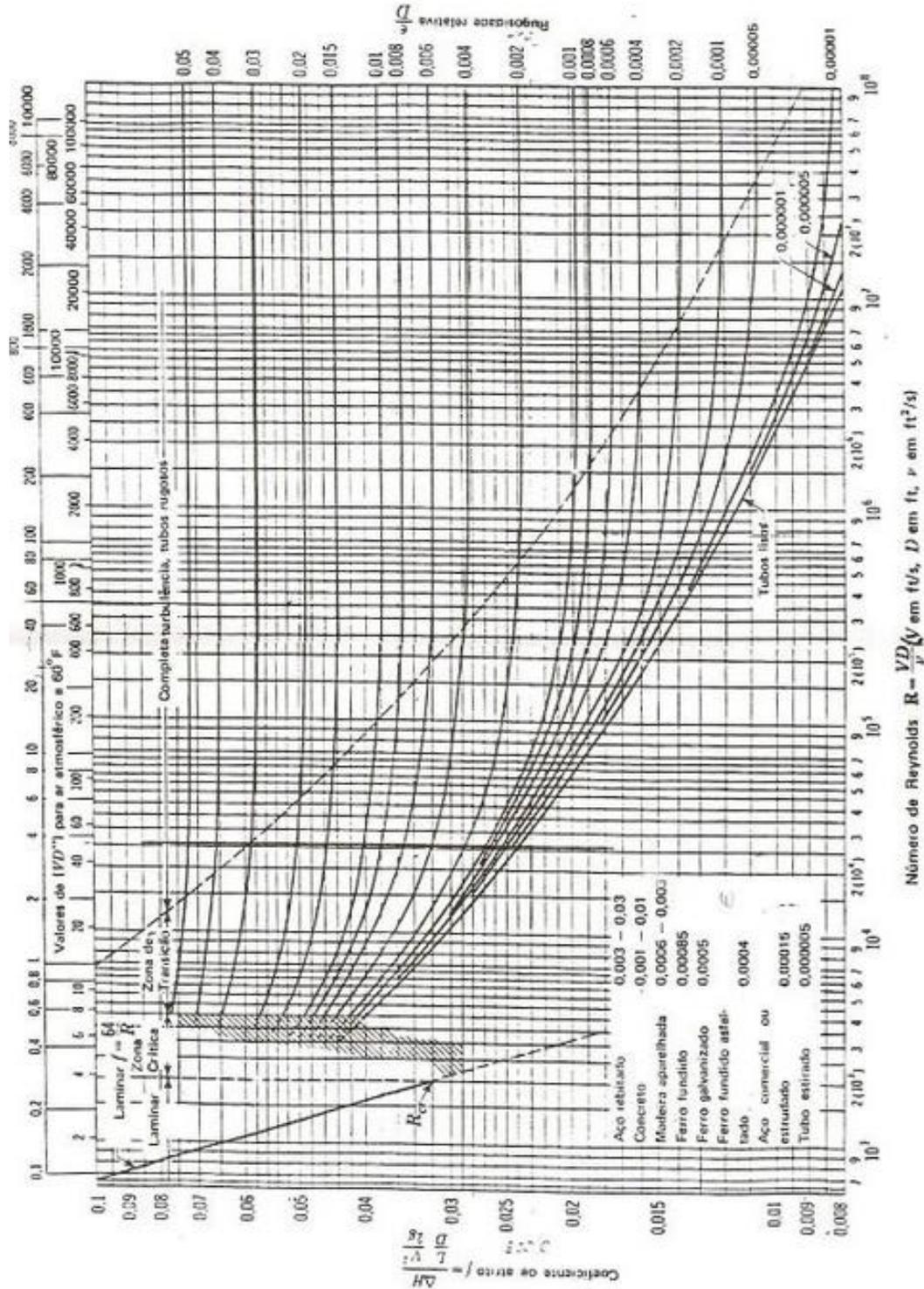


Fig. 6.4 Coeficiente de fricción para cualquier tipo y tamaño de Tubo; diagrama Universal de Moody

Fuente: Hidráulica General Volumen 1 Fundamentos- Sotelo Pág. 282



La rugosidad relativa de la tubería es lo suficientemente baja para clasificarla como tubería lisa, por lo cual para un tubo liso y un número de Reynolds igual a 149,188.762 se lee en el diagrama de Moody el coeficiente de fricción:

$$f = 0.0165 \quad \rightarrow \quad \text{Coef. de fricción}$$

Longitud de Tubería de succión

Se presenta una tubería vertical de 0.40 m y otra horizontal de 0.45 m por lo tanto la longitud total de la tubería de succión es 0.85 m

Diámetro de tubería de succión

Se utiliza una tubería de 3 pulg (0.0762 m) de diámetro.

Velocidad media

Se calculó la velocidad media como 2.193 m/s

$$\begin{aligned} \therefore h_{f_{\text{succión}}} &= f \frac{L v^2}{d g} = 0.0165 \times \frac{0.85}{0.0762} \times \frac{2.193^2}{2 \times 9.81} \\ h_{f_{\text{succión}}} &= 0.045 \text{ m} \end{aligned}$$

- c) Las pérdidas por fricción en la tubería de impulsión se calculan mediante la ecuación 6.4:

$$h_{f_{\text{impulsión}}} = f \frac{L v^2}{d 2g} \quad (6.4)$$

Coeficiente de fricción

Se determinará a partir del diagrama de Moody fig. 6.4, para esto se puede observar que se necesita el número de Reynolds y la rugosidad relativa.

Número de Reynolds

$$RE = \frac{vD}{\nu}$$

Donde:

$$\text{Diámetro de la tubería}(D) = 3 \text{ pulg.} = 3 \times \frac{2.54}{100} = 0.0762 \text{ m}$$



$$Velocidad\ media(v) = \frac{Caudal(Q)}{\text{Área de la tubería}(A)} = \frac{10 \times 10^{-3}}{\pi \times \frac{\left(3 \times \frac{2.54}{100}\right)^2}{4}} =$$

$$Velocidad\ media(v) = 2.193 \frac{m}{s}$$

La viscosidad cinemática del agua (ν) es $0.0112 \text{ cm}^2/\text{s}$

$$\therefore RE = RE = \frac{2.193 \times 0.0762}{0.0112 \times 10^{-4}} = 149188.762$$

Rugosidad relativa

La rugosidad para una tubería de PVC es 0.0015 mm y con un diámetro de tubería de 3 pulg.

$$Rugosidad\ relativa = \frac{0.0015}{0.0762 \times 10^3} = 1.9685 \times 10^{-5}$$

La rugosidad relativa de la tubería es lo suficientemente baja para clasificarla como tubería lisa, por lo cual para un tubo liso y un número de Reynolds igual a $89,513.466$ se lee en el diagrama de Moody el coeficiente de fricción:

$$f = 0.0165 \quad \rightarrow \quad \text{Coef. de fricción}$$

Longitud de Tubería de impulsión

Se presenta dos tuberías verticales de 1.80 m y 1.00 m , otra horizontal de 5 m por lo tanto la longitud total de la tubería de succión es 7.80 m

Diámetro de tubería de impulsión

Se utiliza una tubería de 3 pulg (0.0762 m) de diámetro.

Velocidad media

Se calculó la velocidad media como 1.316 m/s

$$\therefore hf_{impulsión} = f \frac{L v^2}{d 2g} = 0.0165 \times \frac{7.80}{0.0762} \times \frac{2.193^2}{2 \times 9.81}$$

$$hf_{impulsión} = 0.414 \text{ m}$$



d) Pérdidas locales

Estas pérdidas se producen generalmente por los accesorios presentes en la tubería, en el sistema de recirculación se presenta:

3 codos 90° K=0.90

1 válvula de pie K=0.80

Las pérdidas locales se dan por la ecuación 6.5

$$h_m = \frac{v^2}{2g} \times \sum K \quad (6.5)$$

$$\sum K = 0.90 \times 3 + 0.80 = 3.5$$

Tomando la velocidad de la tubería de succión $v=2.193$ m/s

$$h_m = \frac{2.193^2}{2 \times 9.81} \times 3.5 = 0.858m$$

De acuerdo los cálculos hechos la altura de la bomba queda como sigue

$$HB = Z_{1-2} + hf_{succión} + hf_{impulsión} + hm \quad (6.6)$$

$$HB = 2.20 + 0.045 + 0.414 + 0.858$$

$$HB = 3.517 m$$

La potencia en Watts de la bomba será:

$$P = \beta \rho g Q h \quad (6.7)$$

Donde:

β : Coeficiente para la eficiencia de la bomba

ρ : Densidad del agua (kg/m³)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

Q : Caudal (m³/s)

H : Altura de la bomba (m)

$$P = \frac{1}{0.65} \times 1000 \times 9.81 \times 0.01 \times 3.517 = 530.796 \text{ watts}$$

$$P = 0.712 \text{ hp}$$

Por lo cual se elegirá una bomba con una potencia mayor a 0.712 hp.

6.2.3. ALIVIADERO QUE SE AJUSTA A LA LÁMINA VERTIENTE

- Más conocido como cimacio por la forma que presenta, este tipo de aliviadero se diseña de acuerdo a los métodos expuestos en el capítulo 3.4.
- El caudal máximo al que se puede llegar es de 40 l/s (se diseñará con este caudal para que los caudales ensayados no presenten falta de aireación) según la teoría de semejanza y análisis dimensional, para una escala de 1/50 el caudal de un prototipo se calcula con la ecuación para la similitud del caudal por Froude de la tabla 7.2

$$Q_{\text{prototipo}} = Q_{\text{modelo}} \times \frac{(\text{Escala})^{\frac{5}{2}}}{1000} \quad (6.8)$$

$$Q_{\text{prototipo}} = 40 \times \frac{50^{\frac{5}{2}}}{1000} = 707.11 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

- Para el diseño se debe calcular H_o , para este cálculo se utiliza la ecuación (3.1),

$$Q = CLH_o^{\frac{3}{2}}$$

- El ancho del canal es de 0.40m pero se dejara un espacio 0.05m a cada lado del aliviadero para que exista aireación del flujo para que exista un comportamiento hidráulico estable.

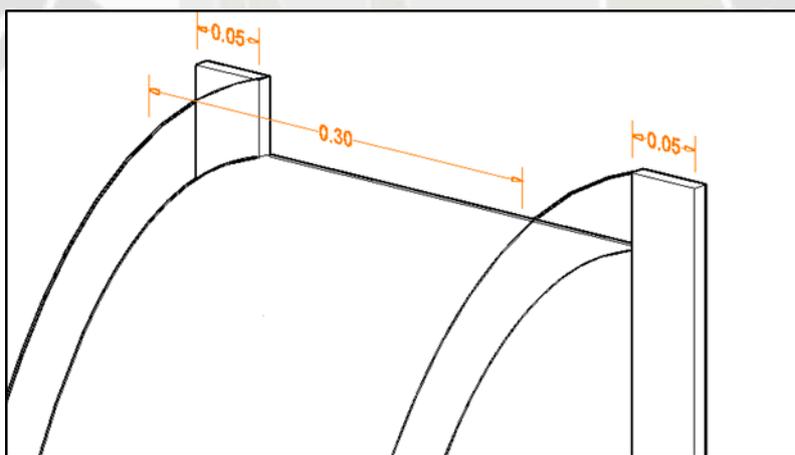


Fig. 6.5 Longitud de coronación del aliviadero con estribos del modelo a escala 1/50
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

- La longitud a una escala 1/50 para el diseño será $.30 \times 50 = 15.00\text{m}$
- El coeficiente de descarga se supone igual a 2

Con estos datos el primer tanteo para la carga total sobre el vertedero queda como:

$$H_o = \left(\frac{Q}{CL} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{707.11}{2 \times 15} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H_o = 8.221\text{m}$$



- Luego como el aliviadero presenta estribos, y no presenta pilas, se utiliza la ecuación 3.2 para la longitud efectiva de coronación la cual será:

$$L = L' - 2(NK_p + K_a)H_o$$

$$L = 15 - 2((0)K_p + 0.2)8.221 = 11.712$$

- La altura máxima de presas pequeñas es 20.00m por lo que se ensayará con esta altura a escala.

$$\frac{P}{H_o} = \frac{20}{8.221} = 2.43$$

- Según la figura 3.9 el coeficiente de descarga es 2.18, luego sustituyendo los nuevos datos en la ecuación 3.1 resulta:

$$H_{o1} = \left(\frac{Q}{CL}\right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{707.11}{2.18 \times 11.712}\right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H_o = 9.154m$$

- De esta manera se realizan varias iteraciones hasta que $H_{o_{n-1}} \cong H_{o_n}$, para la última iteración se presentan los siguientes datos:
- Coeficiente de descarga es 2.18
- La longitud efectiva es 11.236 m
- La carga total sobre la cresta del vertedero es 9.41 m
- Luego según la ecuación 3.4 la carga de velocidad del sobre el aliviadero es:

$$h_a = \frac{q^2}{2g(P+ho)^2}$$

$$h_a = \frac{(707.11)^2}{2 \times 9.81(20 + 9.41)^2}$$

$$h_a = 0.233m$$

- De la figura 3.8

$$ho = H_o - ha$$

$$ho = 9.177m$$

- Al hacer las iteraciones correspondientes la carga de velocidad varía por lo que se utilizara $ha=0.237m$.



- Teniendo la carga de velocidad y la carga total se puede hallar los valores de K y n de la figura 3.10, para reemplazarlos en la ecuación 3.5 y obtener la curva para la forma del aliviadero aguas abajo del punto más alto de la cresta.
- Además de la figura 3.11 se puede calcular Xc, Yc, R1 y R2, para obtener la curva para la forma del aliviadero aguas arriba del punto más alto de la cresta.

$$\frac{h_a}{H_o} = \frac{0.237}{9.41} = 0.025$$

- Para esta relación de ha/Ho se tienen los siguientes datos:

K	:	0.505
n	:	1.857
Xc	:	2.550
Yc	:	1.101
R1	:	4.874
R2	:	2.061

- La ecuación 3.5 quedará como:

$$\frac{y}{9.41} = -0.505 \left(\frac{x}{9.41} \right)^{1.857}$$

X	Y
-	-
1.00	-0.074
2.00	-0.268
3.00	-0.569
4.00	-0.970
5.00	-1.469
6.00	-2.060
7.00	-2.743
8.00	-3.515
9.00	-4.375
10.00	-5.320
11.00	-6.350
12.00	-7.464
13.00	-8.660
14.00	-9.938
15.00	-11.296
16.00	-12.734
17.00	-14.252
18.00	-15.848
19.00	-17.521
20.00	-19.272
21.00	-21.100

Tabla 6.1 Muestra los puntos para dibujar la forma del aliviadero

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

- Se genera la curva del perfil aguas arriba de la cresta con la fig. 3.11

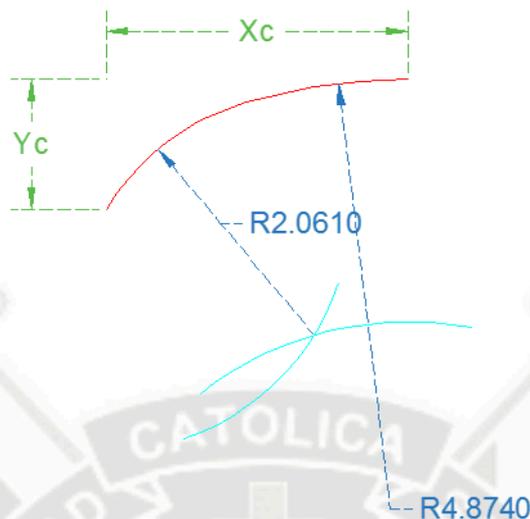


Fig. 6.6 Curva compuesta de la figura 3.11 con los radios en el prototipo

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

- Luego se determina el radio de la curva que va a conectar el aliviadero con el nivel del cauce para lo que se utiliza las ecuaciones 6.9 y 6.10 dada por Ven Te Chow:

$$V_{salida} = \sqrt{2g(Z + h_a - y_1)} \quad (6.9)$$

$$V = \sqrt{2g(Z + h_a - \frac{Q}{VL})} \quad (6.10)$$

$$V = \sqrt{2 \times 9.81(49.41 + 0.233 - \frac{707.11}{V \times 15})}$$

- Resolviendo por iteraciones

$$V = 30.723 \frac{m}{s} = 100.79 \frac{pie}{s}$$

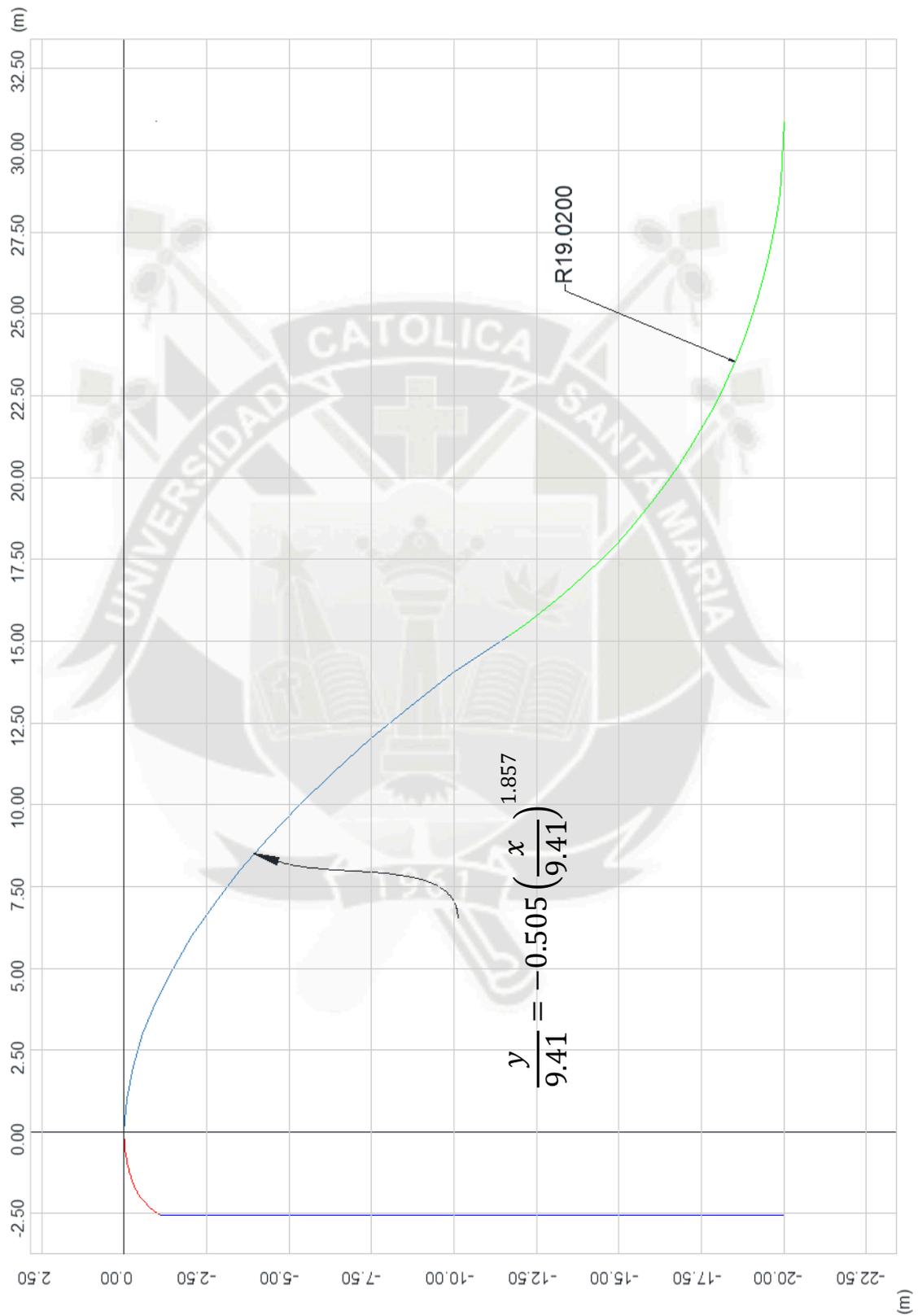
- El radio está dado por la ecuación 6.11

$$R = 10^{\frac{V+6.4H+16}{3.6H+64}} \quad (6.11)$$

$$R = 10^{\frac{100.79+6.4 \times 30.108+16}{3.6 \times 30.108+64}}$$

$$R = 62.410 \text{ pie} = 19.02 \text{ m}$$

Fig.6.7 Perfil del aliviadero a ser modelado
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.





6.3. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

La construcción del sistema de recirculación de flujo se divide en 4 etapas las cuales son:

- a) Construcción e instalación de la estructura del canal
- b) Instalación de la piscina de almacenamiento
- c) Instalación de las bombas, tuberías de succión, tuberías de impulsión y accesorios
- d) Construcción e instalación de los modelos en perfil cimacio

6.3.1. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL CANAL

6.3.1.1. Herramientas

- Se utilizó las siguientes herramientas:
 - Cinta métrica
 - Cortadora de banco
 - Cortadora manual
 - Máquina soldadora
 - Aplicador de silicona
 - Destornilladores
 - Taladro
 - Cutter

6.3.1.2. Materiales

- Tubo de acero de 2"x2"x1mm
- Ángulo estructural de 1/2 x 1/2 x 3/16
- Platina de acero de 1/8 x 1/2
- Plancha de cemento de 5.5mm x 1.22m x 2.44m
- 3 Planchas de acrílico de 2mm x 1.20m x 1.80m
- 4 Planchas de vidrio de 3mm de 1.70m x 0.20m
- 2 Planchas de vidrio de 6mm de 1.70m x 0.40m
- Silicona Acética
- Cinta industrial
- Pernos, tuercas y volandas

6.3.1.3. Procedimiento de construcción

- En primer lugar se procedió cortar los tubos y ángulos metálicos con la cortadora de banco según las medidas indicadas en la figura 6.1, luego se ensambló la estructura del canal con ayuda de un soldador.
- Para la base del canal se utilizó tubos de acero cuadrados de 2"x 2" y 1mm de espesor, el cual también se utilizó para los caballetes de soporte de la estructura.
- Para los soportes laterales se utilizaron ángulos estructurales de 1/2 x 1/2 x 3/16 y platinas de 1/8 x 1/2.
- Quedando como se puede observar en la Fig. 6.8, sobre la base de la estructura se colocó una plancha de cemento de 5.5mm de espesor para darle rigidez y sobre esta se colocó una plancha de acrílico de 2mm de espesor para brindarle impermeabilidad, las paredes laterales del canal también están constituidas por

planchas de acrílico, estas planchas fueron cortadas previamente según las medidas requeridas con la cortadora manual.

- Las planchas de acrílico fueron fijadas al canal con pernos y las uniones entre las paredes laterales y la base del canal fueron selladas con silicona en frío.



Fotografía. 6.1 Construcción en taller de la estructura del canal



Fotografía 6.2 Estructura metálica del canal instalada en el lugar del modelamiento



Fotografía. 6.3 Canal con planchas de acrílico y plancha de cemento

- Luego se extendió el canal 2.40m



Fotografía. 6.4 Extensión del canal

6.3.2. INSTALACIÓN DE LA PISCINA DE ALMACENAMIENTO

- Se adquirió una piscina estructural de 2.20 metros de diámetro, con una capacidad de hasta 1.8 m³ de volumen de agua almacenado, el espacio en el cual fue emplazado la piscina tiene un ancho menor que su diámetro por lo que se tuvo que hacer las modificaciones necesarias para poder instalarla.



Fotografía 6.5 Piscina de almacenamiento

6.3.3. INSTALACIÓN DE LAS BOMBAS, TUBERÍAS DE SUCCIÓN, TUBERÍAS DE IMPULSIÓN Y ACCESORIOS

6.3.3.1. Herramientas

- Se utilizó las siguientes herramientas:
 - Cinta métrica
 - Sierra metálica
 - Taladro

6.3.3.2. Materiales

- 2 Bombas Centrífugas de 3x3x2hp
- 1 Bombas Centrífugas de 2x2x2hp
- Tubería de agua de 3 pulg.
- Tubería de agua de 2 pulg.
- Tubería de desagüe de 3 pug.
- 4 Codos a 90° de 3" para agua
- 1 Codos a 90° de 2" para agua
- 4 Codos a 90° de 3" para desagüe.
- 3 adaptadores de tubería de agua a desagüe
- 2 Válvulas de pie de 3 pulg. y una de 2 pulg.
- 6 adaptadores de tubería de rosca a embone
- 1 Reducción de 3pulg a 2 pulg.
- Cemento Azul Oatey
- Cinta Teflón e industrial

6.3.3.3. Procedimiento de construcción

- Se utilizó las tuberías de agua para la succión y la impulsión vertical, las tuberías de desagüe para la conducción horizontal, todas las uniones de embone fueron pegadas con cemento Azul Oatey y en las de rosca se colocó cinta teflón.
- En primer lugar se procedió cortar las tuberías de agua y desagüe según las dimensiones requeridas, luego se instalaron las bombas centrífugas en un lugar adecuado para su funcionamiento.
- Se colocaron las tuberías de impulsión con sus respectivos codos y adaptadores, además al inicio de las tuberías se colocó válvulas de pie para evitar el retorno del agua.



Fotografía 6.6 Tuberías de Impulsión



Fotografía 6.7 Válvulas de pie de 3 y 2 pulg.



Fotografía 6.8 Bombas centrífugas, se colocó en la unión cinta industrial para reducir filtraciones

- Luego se colocaron las tuberías de impulsión verticales y horizontales, a las tuberías verticales que llegan al canal se les hizo perforaciones (fig. 6.15) para que por estas saliera en agua y exista un flujo más uniforme en el canal.



Fotografía 6.9 Tuberías de conducción



Fotografía 6.10

Tuberías de entrega del flujo perforadas

6.3.4. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LOS MODELOS EN PERFIL DE CIMACIO

6.3.4.1. Construcción

- Se construyó los modelos en base a piezas de madera sobre las cuales se moldeó láminas de acrílico para que presenten los perfiles deseados.
- El perfil usado es el de la figura 6.6 pero en una escala 1/50, a partir de este se generaron 12 perfiles con trampolín de lanzamiento variando entre estos la altura, el radio y el ángulo de salida, y un perfil idéntico al de la figura 6.6 para que sirva como el modelo de control.

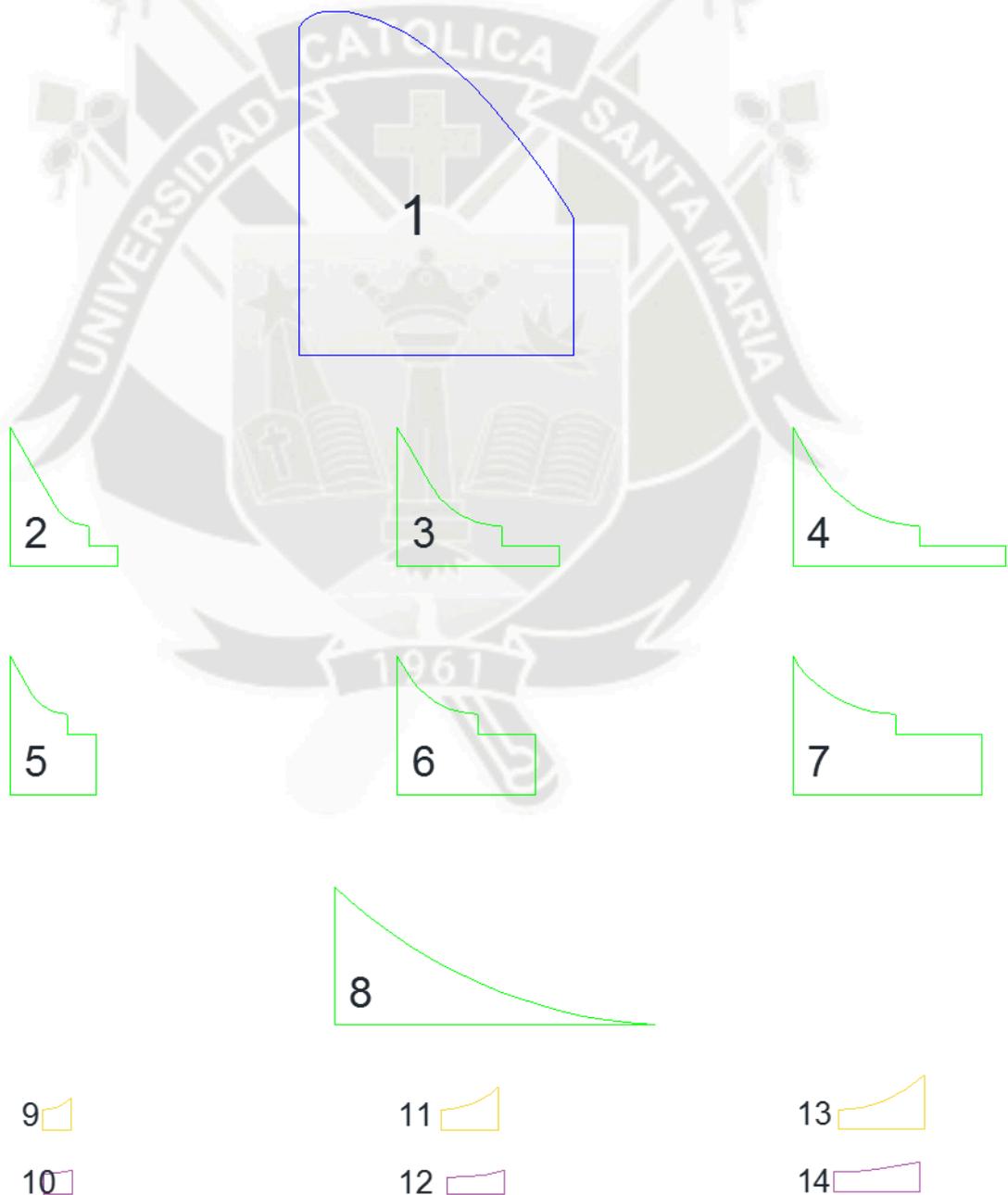


Fig. 6.8 Perfiles que se construyeron en madera
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

- Se construyeron dos modelos de cada uno de mostrados en la figura 6.16, estos se realizaron en un taller de carpintería.
- Para que los modelos sean lo más precisos posible se imprimieron en hojas A1 y se pegaron sobre las tablas de madera (figura 6.17)



Fotografía 6.11 Piezas de madera a ser cortadas



Fotografía 6.12 Cortadora utilizada para generar las curvas de los perfiles



Fotografía 6.13 Modelo en madera del perfil del cimacio



Fotografía 6.14 Piezas intercambiables de madera que se colocan a continuación del cimacio

6.3.4.2. Instalación

- La instalación del modelo se realizó a 1 m de la cámara uniformizadora consiguiendo así un flujo laminar



Fotografía 6.15 Modelo del aliviadero instalado en el canal



Fotografía. 6.16 Ensamblado de uno de los tipos de aliviadero con salto de trampolín

- El flujo de agua pasa por encima de una lámina de acrílico, primero a esta se le hacen perforaciones para la colocación de piezómetros estos piezómetros, estos van en la zona más baja del cucharón y en el extremo del labio del trampolín



Fotografía 6.17 Moldeado de la lámina de acrílico por calor.

- Como se mencionó en el capítulo 6.2.3 se colocó estribos para poder brindarle aireación al flujo, estos estribos consisten en delgadas láminas de acrílico, luego se coloca la lámina caliente sobre el molde de madera y se fija con silicona.



Fotografía 6.18 Vista trasera del aliviadero, se muestran también los estribos que en el modelo tienen una medida de 5cm

- Una vez colocada la lámina de acrílico se le colocan los piezómetros que consisten de mangueras transparentes de 1 cm de diámetro.



Fotografía 6.19 Instalación completa del modelo del aliviadero



Fotografía 6.20 Piezómetros instalados

- En todos los modelos de trampolín se colocaron deflectores hechos de madera los cuales están presentes normalmente en este tipo de estructuras



Fotografía 6.21 Deflectores de madera utilizados en los modelos

- Luego se instaló una piscina de inmersión aguas abajo del aliviadero , con la cual se realizaron más ensayos



Fotografía 6.22 Piscina de inmersión instalada en el canal



7. ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SIMILITUD

7.1. INTRODUCCIÓN

- Para conocer, analizar, describir y comparar el comportamiento de un fluido sea este en particular el agua en las diversas estructuras hidráulicas a ser construidas, en ocasiones es necesario realizar modelos a escala para hacer un estudio experimental, debido a que por la complejidad del comportamiento de los fluidos no se puede reproducir mediante una adecuada modelización matemática.
- Mediante un correcto análisis dimensional se puede extender los datos obtenidos del modelamiento para aplicarlos a estructuras que presenten dimensiones físicas diferentes, con lo cual existe un significativo ahorro de tiempo y dinero.
- Este tipo de modelos reducidos se justifica cuanto mayor es la incertidumbre, y sobre todo, el coste del prototipo. Los cambios en un diseño realizados en un prototipo que no funciona adecuadamente tendrán un coste elevado y pueden llegar a ser parches inadecuadamente construidos al no haberse planteado desde el inicio. En cambio, las modificaciones realizadas en un modelo a escala tienen un coste mucho más reducido y permiten la evaluación de diferentes alternativas buscando la optimización coste-funcionamiento del prototipo.
- Si bien, los modelos reducidos han sido, y siguen siendo ampliamente utilizados, sobre todo en la mecánica de fluidos, requieren un profundo conocimiento del problema a estudio. En caso contrario, pueden obtenerse resultados alejados de la realidad. El modelo a escala debería ser capaz de reproducir adecuadamente los fenómenos que se quieren modelizar y las variables que influyen sobre los mismos. Dada la imposibilidad de reproducir a escala todas las magnitudes que intervienen en un determinado problema físico, por ejemplo la gravedad, deberían adoptarse una serie de simplificaciones que afectan al comportamiento del modelo. Es importante conocer,



a priori, la influencia que estas simplificaciones tienen entre el comportamiento real del prototipo y el modelo, y cuando sea posible, evaluarlas.

- Para poder afrontar el estudio de los modelos reducidos se va a introducir el concepto de **análisis dimensional**. Este permite reducir el número de variables intervinientes en un problema y expresar el resto en función de las consideradas como fundamentales.
- Del estudio del diseño de un prototipo dado, se determinaría el comportamiento predominante en el fluido. Sobre este comportamiento se elegirá la similitud de escalas más adecuada para la representación del modelo.

7.2. DEFINICIONES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL

- Consideramos una magnitud física a la propiedad medible de un elemento o conjunto físico. Hay que tener en cuenta que hay propiedades, como la dureza, que son comparables, pero no medibles. Esta no constituiría una magnitud física.
- Cuando algo es medible lo hacemos en un sistema de referencia, pero este no tiene porque sea único.
- Por ejemplo, sean (L_1, L_2, \dots, L_p) una medidas de longitud observables. Sean L_u y L_0 dos medidas de longitud distintas que tomaremos como referencia.

$$u_1 = \frac{L_1}{L_u} \quad (7.1)$$

- Expresa el número de veces que L_1 contiene la unidad de referencia L_u , mientras que:

$$u'_1 = \frac{L_1}{L'_u} \quad (7.2)$$

- Expresa el número de veces que L_1 contiene la unidad de referencia L'_u .
- Como L_1 no varía independientemente de la unidad adoptada como referencia:

$$L_1 = u_1 L_u = u'_1 L'_u \quad \rightarrow \quad u'_1 = u_1 \frac{L_u}{L'_u} \quad (7.3)$$

Por tanto:

$$\frac{L_u}{L'_u} \quad (7.4)$$

- Representa la transformación que nos permite pasar de un sistema de coordenadas al otro.
- Dentro de las magnitudes físicas existen una serie de magnitudes únicamente dependientes de sí mismas a las que llamaremos magnitudes fundamentales pudiendo el resto de las magnitudes expresarse en función de estas. A estas últimas las denominaremos magnitudes derivadas.
- Las unidades fundamentales son las que, en cada problema, quieran tomarse como tales, y pueden estar formadas por cualquier conjunto de magnitudes físicas



independientes entre si. Es decir, puede ser cualquier conjunto de magnitudes físicas siempre que cumplan el criterio de independencia lineal entre ellas cuando se encuentran expresadas sobre el mismo sistema de referencia. Las demás magnitudes físicas se expresarían en función de las elegidas.

- En un movimiento uniforme la velocidad es una expresión de la distancia recorrida en función del tiempo que se tarda en recorrer dicha distancia. Por tanto, se tendrían 2 magnitudes fundamentales, distancia (L) y tiempo (t), expresándose la magnitud derivada (v) como:

$$v = \frac{L}{t} \quad (7.5)$$

- Sin embargo, cuando se trabaja con la distancia entre cuerpos en el espacio estamos acostumbrados a referirnos a ella como años luz, lo que en realidad constituye un ejemplo de expresión de la distancia como magnitud derivada de las fundamentales dadas por la velocidad de la luz (c) y el tiempo (t), en la forma:

$$L = c \cdot t \quad (7.6)$$

7.3. TEOREMA DE BUCKINGHAM-PI

- Sean $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ las n magnitudes físicas relevantes del problema a estudio y que se relacionan entre si mediante un conjunto conocido de ecuaciones homogéneas. Esta relación puede expresarse de la forma:
- $F(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0$ de forma equivalente $q_1 = f(q_2, q_3, \dots, q_n)$ (7.7)
- Si el sistema formado por las n variables tiene dimensión k , existe, al menos, un conjunto k de variables independientes, y el resto de variables, dado por $j = n - k$ puede expresarse en función de una serie de j monomios adimensionales¹ ($\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}$). En este caso, la relación funcional dada en la ecuación (1.7) puede expresarse de forma más compacta como:

$$\Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) = 0 \quad \text{de forma equivalente} \quad \Pi_1 = \varphi(\Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) \quad (7.8)$$

- Téngase en cuenta que el sistema formado por las k variables independientes no tiene por qué ser único, aunque si debe cumplir la condición de independencia lineal entre ellas.

7.3.1. Aplicación práctica del teorema

Dado un problema a estudio, deben seguirse los siguientes pasos:

- Identificar todas las magnitudes físicas existentes en el modelo
- Elegir las magnitudes físicas más relevantes en función de aquellos aspectos que se quieren analizar en el modelo. Este paso requiere un profundo conocimiento del comportamiento físico. Habrá que pensar en las posibles restricciones del problema



y la posibilidad, o no, de que pueda variar las diferentes magnitudes físicas de forma independiente.

- Si estudiamos el peso de un objeto $P = \rho gV$, sólo podemos actuar sobre dos parámetros, la masa ρ y el volumen V , a no ser que seamos capaces de cambiar la gravedad. Incluso puede ser posible que no podamos variar la masa, como puede ser el caso de un modelo hidráulico donde la existencia de un volumen de agua importante en circulación no pueda sustituirse por otro fluido.
- Expresar las n magnitudes físicas del problema en función del conjunto de variables fundamentales $\{[M][L][T][\theta]\}$ o $\{[F][L][T][\theta]\}$, donde $[M]$ es masa, $[L]$ longitud $[T]$, tiempo, $[\theta]$ temperatura y $[F]$ es fuerza.
- Seleccionar dentro de las magnitudes físicas más relevantes, el conjunto linealmente independiente de dimensión k sobre el que se expresarían las demás ($j = n - k$) variables como monomios adimensionales.
- Calcular los Π_j monomios adimensionales. Para ello basta con trabajar sobre una matriz con todas las magnitudes físicas del problema, e ir realizando transformaciones hasta conseguir que las k magnitudes elegidas como fundamentales formen una matriz unitaria. Los coeficientes asociados al resto de las j variables son las potencias que las relacionan a esas k magnitudes.
- Comprobar la adimensionalidad de los monomios para evitar posibles errores.
- Expresar los monomios en función de la magnitud que se ha considerado como relevante. Si esta es Π_1 :

$$\Pi_1 = \varphi(\Pi_2, \dots, \Pi_{n-k}) \quad (7.9)$$

- Realizar una interpretación física del resultado
- Asegurarse de la independencia de cada uno de los monomios. Esto implica que la variación de uno de ellos no afecta al resto que permanecerán constantes.
- Finalmente, comparar los resultados de los distintos ensayos.



7.3.2. Expresión de las magnitudes físicas en los sistemas $\{[M] [L][T][\theta]\}$ ó $\{[F] [L][T][\theta]\}$

Magnitud física	Símbolo	Fórmula	Unidad (SI)	$\{[M][L][T][\theta]\}$				$\{[F][L][T][\theta]\}$			
				M	L	T	θ	F	L	T	θ
Longitud	L	L	m		1				1		
Área	A	L ²	m ²		2				2		
Volumen	V	L ³	m ³		3				3		
Tiempo	t	T	t			1				1	
Masa	m	M	m	1				1	-1	2	
Velocidad	v	L/T	kg		1	-1			1	-1	
Aceleración	a	L/T ²	m/s	1	1	-2			1	-2	
Fuerza	F	MA	m/s ²	1	1	-2		1			
Presión	p	F/A	N	1	-1	-2		1	-2		
Tensión superficial	σ	F/L	Pa	1		-2		1	-1		
Densidad	ρ	m/L ³	N/m	1	-3			1	4	2	
Peso específico	γ	F/L ³	kg/m ³	1	-2	-2		1	-3		
Viscosidad	μ	p.t	N/m ³	1	-1	-1		1	-2	1	
Viscosidad Cinemática	ν	$\mu \cdot \rho$	Pa.s		2	-1			2	-1	
Mod. Elasticidad volum.	E _v	F/A	m ² /s	1	-1	-2		1	-2		
Trabajo	τ	F.t	J	1	2	-2		1	1		
Energía	E	F.t	J	1	2	-2		1	1		
Potencia	P	E/t	W	1	2	-3		1	1	-1	
Momento	M	F . L	m.t	1	2	-2		1	1		
Vel. Angular	ω	rps/2	rad			-1				-1	
Temperatura	θ	T	°			1					1
Calor específico	C _p			1	1	-3	-1	1		-1	-1
Coef. Expansión térmica	α	1/T	o-1				-1				-1

Tabla 7.1 Expresión de las magnitudes físicas en 2 sistemas de unidades
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



7.4. SIMILITUD HIDRÁULICA

7.4.1. Introducción

- Como ya se ha dicho antes, el coste de construcción de algunas obras es muy elevado, y el comportamiento real ante determinadas situaciones puede poseer un grado de incertidumbre que puede verse muy reducido con la modelización previa a la construcción de un modelo a escala.
- Supongamos que queremos construir el aliviadero de una presa. Este se ha previsto para las diferentes hipótesis de funcionamiento. Por ejemplo, en la avenida de proyecto, avenida extrema, actuación de los desagües de fondo y los intermedios. Si este aliviadero no es de labio fijo sino que funciona sin compuertas, la complejidad es aún mayor. El problema puede agravarse si tiene más de un vano, ya que el caudal desaguado además de depender de la apertura de compuerta y del nivel del embalse es también función de la apertura de los vanos contiguos. En general en este tipo de problemas es muy importante evaluar la disipación de energía que se produce antes de la restitución del flujo de agua al río, ya que un mal diseño puede originar regímenes rápidos en la salida del cuenco amortiguador y una socavación en el lecho del río con la consecuente pérdida de materiales. Esto puede llevar a una pérdida de seguridad en la presa.
- El diseño del cuenco amortiguador es fundamental en este proceso, y la evaluación de las pérdidas de energía muy difícil de obtener, especialmente si el aliviadero es escalonado, con pendiente variable, curva, reducción de sección etc.
- El coste de realización de un modelo a escala en el total de la obra es muy reducido y se pueden obtener grandes beneficios, incluida la disminución del coste de ejecución al permitir optimizar el diseño. Hay que tener en cuenta que en el ejemplo expuesto es posible que tengan que pasar muchos años antes de llegar a la avenida de proyecto y quizá no se alcance nunca la avenida extrema (lo que más bien sería deseable), con lo cual, si no se ha realizado antes un modelo difícilmente podremos comprender la importancia de estas situaciones. El modelo permite además, observar y medir, el comportamiento de situaciones más allá de las establecidas por la propia normativa, como pueden ser el funcionamiento simultáneo de todos los órganos de desagüe, la avería total o parcial de una o varias compuertas, etc. De esta forma el modelo servirá para establecer parte de las directivas contempladas en las normas de explotación que afectan directamente a la seguridad de la presa.
- El problema se plantea en la forma de llevar a cabo esta reducción de escala de manera que el modelo se asemeje en comportamiento al prototipo al que quiere representar.



7.4.2. Tipos de similitud

- Se llama similitud a la relación existente entre una magnitud física en el prototipo y el modelo expresado en las mismas unidades. Se utiliza la variable λ para expresar esta relación de similitud. Así:

$$\lambda_L = \frac{L_P}{L_m} \quad (7.10)$$

- Es la razón de similitud entre dos longitudes de una misma medida en el prototipo (L_P) y el modelo (L_m).
- Cada una de las magnitudes físicas del problema se reproducirá en el modelo a través de su relación de escala. Si esta es una magnitud derivada, se puede a su vez expresar en función de las fundamentales. Por ejemplo el caudal:

$$\lambda_Q = \frac{Q_P}{Q_m} = \frac{L_P^3 t_P}{L_m^3 t_m} = \frac{\lambda_L^3}{\lambda_t} \quad (7.11)$$

- Siendo $\lambda_t = t_P$ la relación entre el tiempo utilizado en el prototipo y el modelo.
- En un modelo tendremos una similitud mecánica cuando tengamos la vez similitud geométrica, cinemática y dinámica. A continuación se definen estos conceptos:

7.4.2.1. Similitud geométrica

- Un modelo poseerá similitud geométrica cuando todas las longitudes se encuentran afectadas por el mismo factor de escala λ_L . En este caso se respetaran los ángulos entre los distintos puntos del modelo.
- La similitud geométrica implica, de un modo estricto, que sea igual la relación de todas las longitudes homólogas en los dos sistemas. Esto es, si dentro de los flujos ciertas dimensiones se seleccionan y además, se designa con “p” al prototipo y “m” al modelo (fig. 7.1), la similitud geométrica significaría, por ejemplo, que

$$\lambda_e = \frac{H_p}{H_m} = \frac{B_p}{B_m} = \frac{S_p}{S_m} = \dots$$

Donde l_e es la escala de líneas que cuantifica el tamaño relativo de los dos sistemas.

- Una consecuencia de la similitud geométrica es que la relación de áreas y volúmenes en ambos sistemas se puede expresar en términos del cuadrado y del cubo de l_e , esto es :

$$A_e = \frac{A_p}{A_m} = \lambda_e^2$$

$$\bar{V}_e = A_e l_e = \frac{\bar{V}_p}{\bar{V}_m} = \lambda_e^3$$

- En algunos casos, es factible que la similitud geométrica exista sólo en lo que se refiere a las dimensiones sobre planos horizontales y las dimensiones verticales pueden quedar distorsionadas con otra escala de líneas (como es el caso de los modelos de ríos o de puentes) donde conservar la misma escala de líneas en las tres direcciones significaría tener tirantes muy pequeños en los modelos.
- La similitud geométrica se extiende también a la rugosidad superficial de las paredes que limitan al flujo, pues si el modelo tiene un tamaño igual a un décimo del prototipo ($l_e = 10$), entonces la altura de las proyecciones de las rugosidades deben de estar en la misma relación.
- Esto es difícil de lograr en la práctica, por lo que en ocasiones es necesaria una distorsión geométrica en la dimensión longitudinal de la conducción con respecto a las otras dos dimensiones, con objeto de lograr la misma relación de pérdidas de energía en ambas estructuras.

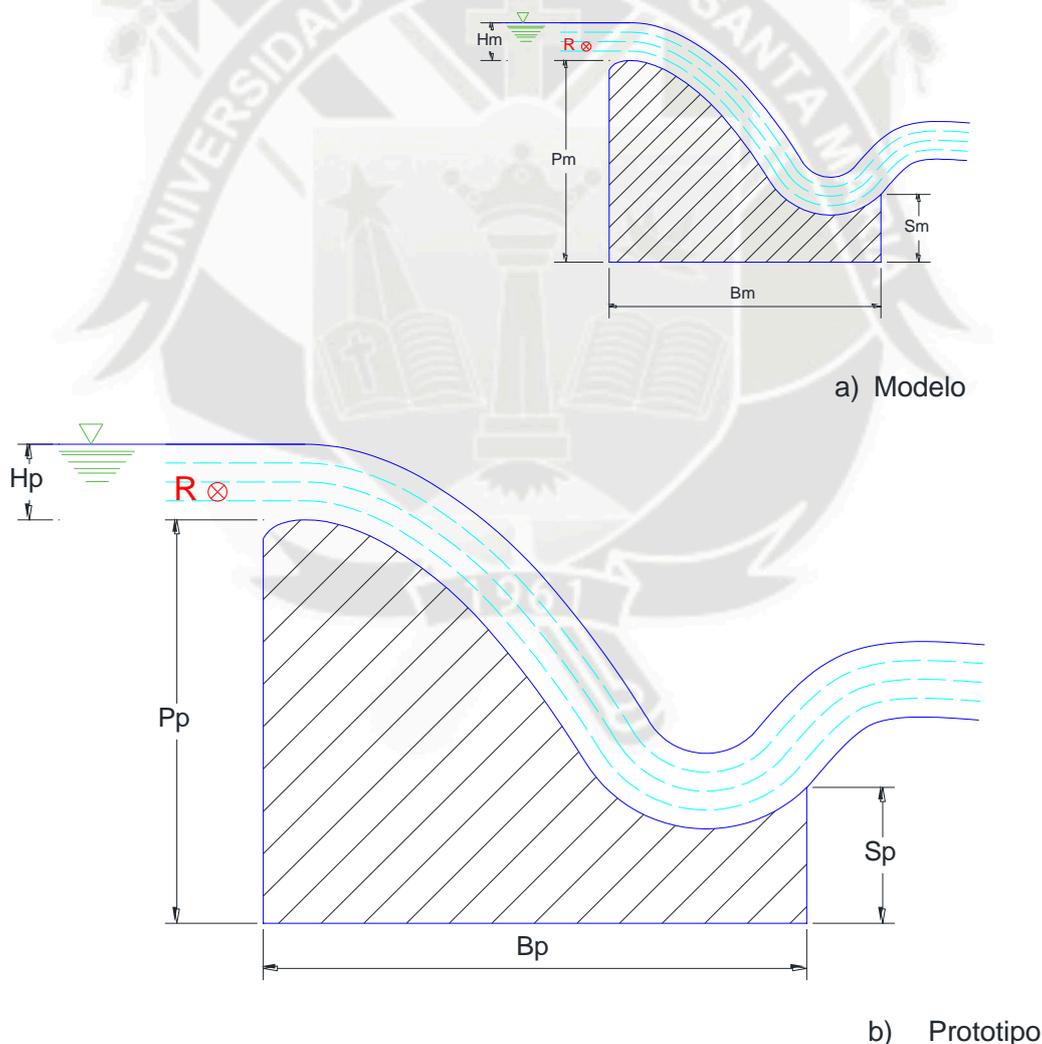


Fig. 7.1 Similitud dinámica entre dos flujos del modelo y el prototipo (a y b)
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



7.4.2.2. Similitud cinemática

- Un modelo más complejo, en el que intervengan otras unidades además de la longitud, como puede ser la velocidad, puede cumplir la existencia de una similitud cinemática.
- La similitud cinemática entre dos sistemas de flujo se interpreta como la similitud geométrica entre las líneas de corriente de ambos flujos.
- En este caso los vectores velocidad del fluido en el prototipo son proporcionales a su vector velocidad correspondiente en el modelo, a esta razón de proporcionalidad le denominaremos λ_v .

7.4.2.3. Similitud dinámica

- Cuando además existen fuerzas aplicadas al modelo es conveniente adoptar una similitud dinámica, esta implica que haya similitud geométrica, además de que sea la misma relación de las fuerzas dinámicas en puntos homólogos.
 - En la similitud dinámica, al igual que en la similitud geométrica, existen escalas de velocidades, de fuerzas, tiempos, densidades, viscosidades, etc, que miden la relación entre las características de los flujos o propiedades de los fluidos utilizados en los mismos y referidas a dos puntos R homólogos (fig. 7.1) que se designarán con el símbolo hasta ahora utilizado, pero añadiendo el subíndice e (escala).
 - Por ejemplo, ρ_e, μ_e, v_e se refieren a las propiedades de los fluidos que se utilicen en el prototipo y el modelo. Estos fluidos pueden ser distintos en ambos sistemas.
 - El factor de proporcionalidad es λ_F , este es un factor de proporcionalidad geométrica que se aplica entre el polígono de fuerzas actuantes sobre una partícula del prototipo y del modelo.
- El problema en la mecánica de fluidos radica en operar de forma conjunta con todas las fuerzas. Estas se han introducido con anterioridad para explicar la interpretación física de los monomios adimensionales, y son:

Fg	Fuerzas de gravedad	$Fg = m \cdot g = \rho L^3 g$
Fp	Fuerzas de presión	$Fp = A \cdot \Delta p = \Delta p L^2$
F μ	Fuerzas de viscosidad	$Fv = \mu \frac{dv}{dy} A = \mu v L^2 = \mu v L = \rho v L$
FE	Fuerzas debidas a la elasticidad	$FE = E \cdot A = E \cdot L^2$
F σ	Fuerzas debidas a la tensión superficial	$F\sigma = \sigma L$
FI	Fuerzas de inercia	$FI = m \cdot g = \rho L^3 \frac{L}{T^2} = \rho L^4 T^{-2} = \rho v^2 L^2$



- Las fuerzas de inercia son las que se oponen a la variación del movimiento por la aplicación de algunas de las fuerzas anteriores. La ecuación de equilibrio de fuerzas puede escribirse como:

$$\sum F = Fg + Fp + F\mu + FE + F\tau = -FI \rightarrow Fg + Fp + F\mu + FE + F\tau + FI = 0 \quad (7.12)$$

- La dificultad radica en que no se puede mantener la similitud dinámica para todas las fuerzas actuantes sobre el modelo hidráulico. Existen limitaciones que se presentan a la hora de poder variar mediante una relación de escala, algunos de los parámetros intervinientes en el problema. El ejemplo más claro es la gravedad, pero no el único, ya que la presión también es difícil alterarlo. Se ha podido realizar en algunos ensayos utilizando una cámara isobárica. La sustitución del fluido a ensayar por otro de distinta viscosidad más ajustado a la reducción de escalas dependerá de la disponibilidad de éste para los volúmenes y caudales requeridos en el ensayo. Adicionalmente pueden ser necesarios equipos de bombeo capaces de manejar este fluido si hay que ponerlo en movimiento.
- Observemos ahora los monomios adimensionales más habitualmente utilizados en los problemas de hidráulica, el número de Froude y el número de Reynolds dados en las ecuaciones (1.28) y (1.29) respectivamente. Si mantenemos la viscosidad del fluido, y evidentemente la gravedad, es imposible satisfacer de forma conjunta ambas ecuaciones. Esto implica que a la hora de realizar un modelo a escala, debe evaluarse el fenómeno físico predominante, gravedad o viscosidad, y realizar el modelo sobre la base del mantenimiento de la relación predominante. Finalmente se comprobará que el error cometido con la simplificación realizada no tiene gran influencia en el modelo.
- Por ejemplo en el caso de los modelos predominados por la gravedad, como es el caso del aliviadero anteriormente expuesto, la existencia de números de Reynolds elevados hace que la viscosidad pierda importancia. En cambio el hecho de que un modelo tenga un comportamiento laminar frente a un prototipo con comportamiento turbulento haría inadmisibles esta simplificación por que el cambio en las condiciones hidráulicas sería notable.
- En los modelos en lámina libre donde se adopta para la transformación de escalas el número de Froude, habrá de tenerse en cuenta que no haya zonas donde el calado sea inferior a 3 cm ya que los fenómenos de tensión superficial tendrían también gran importancia sobre el modelo.
- Las dos razones anteriormente enunciadas hacen que la adopción de la escala más grande posible en función de la ubicación, caudales disponibles, etc, donde se vaya a realizar el ensayo, sea lo más favorable para reducir la influencia de estos fenómenos. Es evidente que una relación de escala de 1:1 entre prototipo y modelo consigue la similitud perfecta entre ambos.
- Como posible solución para mantener un flujo turbulento en un modelo a escala realizado con similitud de Froude puede realizarse una distorsión de escala entre la horizontal y la vertical aumentando esta última de manera que las pérdidas de energía sean equivalentes. El disminuir la rugosidad ayuda también en este sentido pero suele ser difícil encontrar materiales lo suficientemente lisos.



7.4.3. Similitud de Froude

- Se utiliza cuando presentan problemas con superficie libre donde las fuerzas predominantes son las gravitatorias.
- Como ejemplos pueden tenerse los problemas de oleaje, canales, vertederos, resaltos, desagües etc.
- Se utiliza λ para expresar la relación geométrica entre las dimensiones del prototipo L y del modelo L' :

$$\lambda = \frac{L}{L'} \quad (7.13)$$

- El valor de λ es lo que constituye la relación de escala entre ambos. Ahora bien si utilizamos una similitud de Froude estamos afirmando que el monomio adimensional dado por:

$$F^2 = \frac{v^2}{gL} \quad (7.14)$$

- Permanece constante entre el prototipo y el modelo. Ello implica que:

$$F^2 = \frac{v^2}{gL} = \frac{v'^2}{g'L'} = cte \quad \rightarrow \quad \frac{v^2}{v'^2} = \frac{g}{g'} \frac{L}{L'} \quad (7.15)$$

- Como no vamos a poder variar con facilidad las condiciones de gravedad (g) entre el prototipo y el modelo, hemos supuesto esta constante, lo que implica que:

$$\frac{g}{g'} = 1 \quad \rightarrow \quad \frac{v^2}{v'^2} = \frac{L}{L'} = \frac{L}{\frac{L}{\lambda}} = \lambda \quad \rightarrow \quad \frac{v}{v'} = \sqrt{\lambda} \quad (7.16)$$

- Conocida la longitud y la velocidad el tiempo es una magnitud derivada, por tanto:

$$t = \frac{L}{v} \quad \rightarrow \quad \frac{t}{t'} = \frac{\frac{L}{v}}{\frac{L'}{v'}} = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda} \quad (7.17)$$

- El caudal es una unidad derivada de la longitud (volumen) y el tiempo, dada por:

$$Q = \frac{L^3}{t} \quad \rightarrow \quad \frac{Q}{Q'} = \frac{\frac{L^3}{t}}{\frac{L'^3}{t'}} = \frac{\lambda^3}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda^5} \quad (7.18)$$

- La única unidad fundamental que no hemos expresado es la masa (M), que si la obtenemos a través de la densidad (ρ) y el volumen (V) como:



$$M = \rho V \quad \rightarrow \quad \frac{M}{M'} \frac{\rho}{\rho'} \frac{L^3}{L'^3} = \frac{\rho}{\rho'} \lambda^3 \quad (7.19)$$

- Siendo ρ y ρ_0 las densidades en el prototipo y modelo respectivamente. En el caso de que el fluido sea el mismo, lo que es bastante habitual, se tendría la relación de escalas para la masa dada por:

$$\frac{M}{M'} = \lambda^3 \quad (7.20)$$

7.4.4. Similitud de Reynolds

- La viscosidad es un fenómeno presente en todos los problemas hidráulicos, pero su importancia disminuye a medida que el contorno tiene menos importancia, como es el caso de las grandes masas de agua, o cuando tenemos números de Reynolds muy elevados, lo que es habitual en regímenes turbulentos desarrollados. En este caso, el valor de vD es muy grande frente a la viscosidad, y su variación no tendrá gran influencia en el problema a estudio. En el ábaco de Moody nos estaríamos moviendo en la zona horizontal donde apenas se produce variación en la f de Darcy.
- Por el contrario, si en el prototipo estamos en un régimen turbulento y en el modelo se produjera régimen laminar, los errores cometidos podrían ser muy elevados invalidando la razón de similitud adoptada.
- De nuevo, se utilizaría el valor de λ para expresar la relación de escala geométrica entre prototipo y modelo. Con la similitud de Reynolds el monomio adimensional que permanece constante está dado por:

$$R_e = \frac{v.D}{\nu} = cte \quad \rightarrow \quad \frac{v}{v'} = \frac{D'}{D} \frac{\nu}{\nu'} \quad (7.21)$$

Si el fluido entre prototipo y modelo es el mismo se tiene:

$$\frac{v}{v'} = 1 \quad \rightarrow \quad \frac{v}{v'} = \frac{D'}{D} = \frac{1}{\lambda} \quad (7.22)$$

Igual que en el caso anterior, conocida la longitud y la velocidad el tiempo es una magnitud derivada, por tanto:

$$t = \frac{L}{v} \quad \rightarrow \quad \frac{t}{t'} = \frac{\frac{L}{v}}{\frac{L'}{v'}} = \frac{\lambda}{\frac{1}{\lambda}} = \lambda^2 \quad (7.23)$$



El caudal es una unidad derivada de la longitud (volumen) y el tiempo, dada por:

$$Q = \frac{L^3}{t} \quad \rightarrow \quad \frac{Q}{Q'} = \frac{\left(\frac{L^3}{L'^3}\right)}{\frac{t}{t'}} = \frac{\lambda^3}{\lambda^2} = \lambda \quad (7.24)$$

La masa (M), se obtiene a través de la densidad (ρ) y el volumen (V) como:

$$M = \rho V \quad \rightarrow \quad \frac{M}{M'} = \frac{\rho}{\rho'} \frac{L^3}{L'^3} = \frac{\rho}{\rho'} \lambda^3 \quad (7.25)$$

Siendo ρ y ρ_0 las densidades en el prototipo y modelo respectivamente, que al ser el fluido el mismo, se tiene que la relación de escalas para la masa está dada por:

$$\frac{M}{M'} = \lambda^3$$

7.4.5. Relaciones de escala en los problemas de similitud

En la tabla 1.9 se describen las relaciones de escala cuando se adopta una similitud de Froude, Reynolds, Weber o Mach para las magnitudes más habituales en la hidráulica, cuando se considera constante el valor de la gravedad (g) y se utiliza λ como coeficiente de escala geométrica

Magnitud física	Dimensión	Ley de semejanza adoptada			
		Froude	Reynolds	Weber	Match
Longitud	L	λ	λ	λ	λ
Area	L^2	λ^2	λ^2	λ^2	λ^2
Volumen	L^3	λ^3	λ^3	λ^3	λ^3
Tiempo	T	$\sqrt{\lambda}$	λ^2	λ	$\sqrt{\lambda^3}$
Velocidad	LT^{-1}	$\sqrt{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda}$	1	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$
Aceleración	LT^{-2}	1	$\frac{1}{\lambda^3}$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
Caudal	L^3T^{-1}	$\sqrt{\lambda^5}$	λ	λ^3	$\sqrt{\lambda^3}$
Presión	$ML^{-1}T^{-2}$	λ	$\frac{1}{\lambda^2}$	1	$\frac{1}{\lambda}$
Energía	ML^2T^{-2}	λ^4	λ	λ^3	λ^2
Fuerza	MLT^{-2}	λ^3	1	λ^2	λ

Tabla 7.2: Relaciones de similitud con distintas leyes

Fuente: Modelos reducidos- Dr. Ing. Jaime García Palacios -Universidad Politécnica de Madrid-pág. 29

- Para obtener la equivalencia que tendría el modelo con el prototipo en el modelamiento de un trampolín de lanzamiento, se utilizará en la similitud de Froude, por cumplir con los requerimientos establecidos en el capítulo 7.4.3.



7.5. ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA EL MODELAMIENTO DE UN CIMACIO CON TRAMPOLÍN

- El análisis dimensional se realiza con el objetivo de determinar los distintos parámetros que intervienen en el análisis de los fenómenos hidráulicos a partir de las variables que se presentan en este,
- Se emplea el teorema PI de Buckingham para la realización del análisis dimensional.
- Se realizará 2 análisis dimensionales para la determinación de:
 - Energía disipada
 - Presión máxima sobre el cucharón
- Las variables que se presentan en un trampolín de lanzamiento son:
 - q : Caudal Unitario
 - $H1$: Altura vertical desde el nivel aguas arriba y el fondo del cucharón.
 - $H2$: Altura vertical desde el fondo del cucharón y el nivel del cauce.
 - R : Radio del trampolín
 - \emptyset : Ángulo de lanzamiento
 - Y : Calado aguas abajo
 - g : Gravedad
 - pw : Densidad del agua
 - P : Presión
- Esta nomenclatura se expresa gráficamente en la figura 7.2.

7.5.1. ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA LA ENERGÍA DISIPADA

- La energía disipada está en función del calado aguas abajo, por lo que este será la variable dependiente del análisis dimensional.
- En este análisis no interviene la presión.

a) PASO 01: Se escribe la función y se cuentan las variables.

$$Y = f(q, H1, H2, R, \emptyset, g, pw) \quad \text{Existen 8 variables (n=8)}$$

b) PASO 02: Las dimensiones de cada variables según la tabla 7.1 son:

Y	q	H1	H2	R	\emptyset	g	pw
{L}	{L ² T ⁻¹ }	{L}	{L}	{L}	-	{LT ⁻² }	{ML ⁻³ }

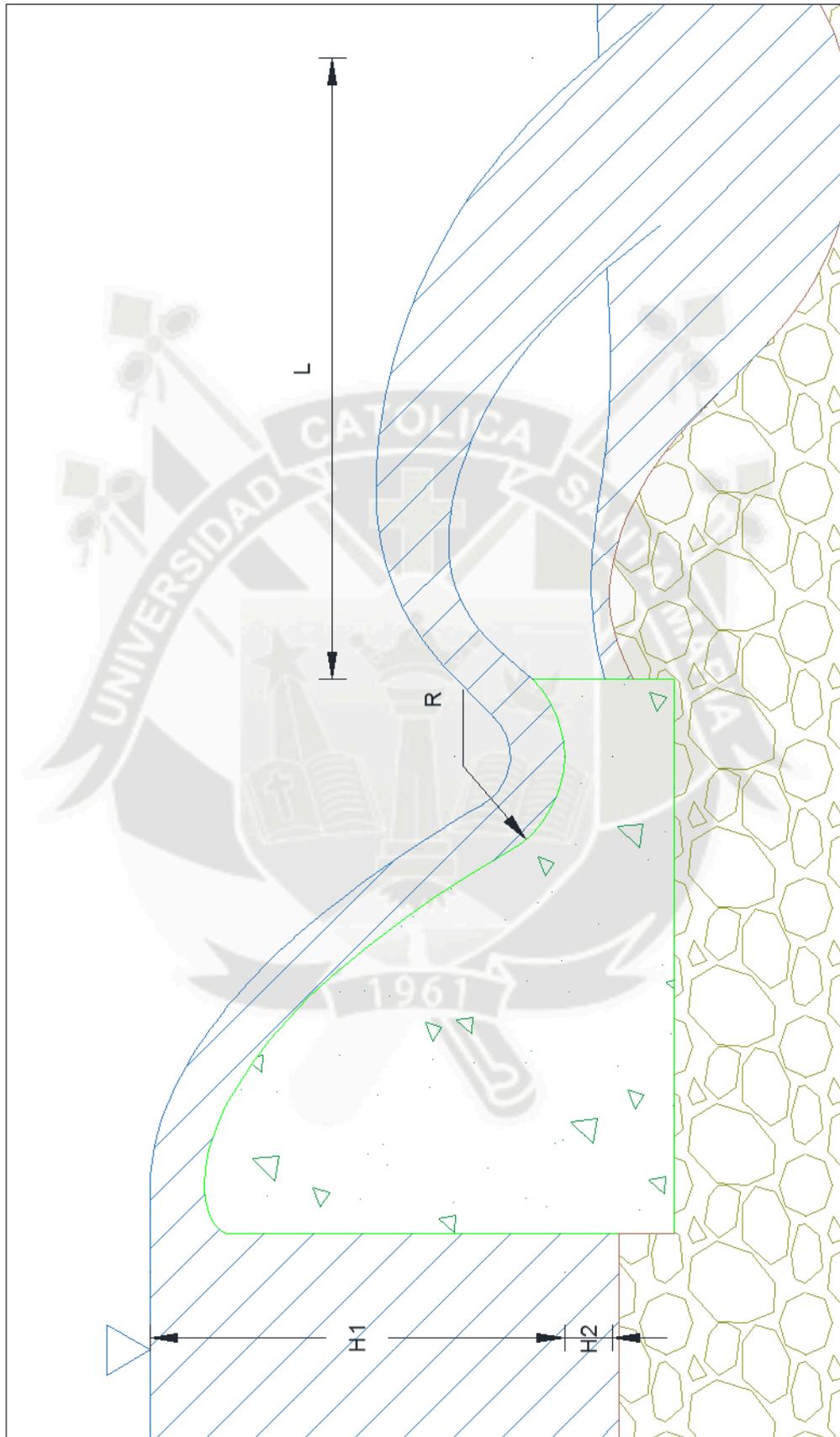


Fig. 7.2 Nomenclatura expresada gráficamente para el análisis dimensional
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



c) PASO 03

Se determina j . Ninguna variable contiene la dimensión Θ . De modo que j es menor o igual que 3(MLT), y después de una inspección de las variables o parámetros se concluye que $j=3$, y $k=n-j=8-3=5$, El teorema de PI garantiza que existen cinco grupos adimensionales en este problema.

d) PASO 04

Se elegirán las $j(3)$ variables repetitivas siendo estas el Radio, la densidad y la gravedad, por cumplir las siguientes condiciones:

- No son variables dependientes
- Las variables no forman un grupo adimensional
- Las variables representan todas las dimensiones primarias del problema
- Ninguna variable es adimensional
- Ninguna variable presenta las mismas dimensiones que otra variable.
- Son parámetros comunes

e) PASO 05

Se combina R , ρ y g , sucesivamente, con cada una de las variables adicionales para encontrar los 5 grupos adimensionales.

Primero se añade el calado aguas abajo para determinar Π_1 . Se puede elegir cualquier exponente para esta variable adicional y así situarla en el numerador o denominador elevada a cualquier potencia. Puesto que Y es la variable dependiente, la situamos en el numerador elevada a la primera potencia:

$$1. \Pi_1 = R^a g^b \rho^c Y = (L)^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c (L) = M^0 L^0 T^0$$

Agrupando los exponentes:

$$\begin{array}{lclcl} \text{Masa} & : & c & = & 0 \\ \text{Longitud} & : & a + b - 3c + 1 & = & 0 \\ \text{Tiempo} & : & -2b & = & 0 \end{array}$$

Resolviendo el sistema:

$$a = -1 \quad b = 0 \quad c = 0$$

$$\therefore \Pi_1 = R^{-1} g^0 \rho^0 Y$$



$$\Pi_1 = \frac{Y}{R}$$

$$2. \Pi_2 = R^a g^b p w^c q = (L)^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c (L^2 T^{-1}) = M^0 L^0 T^0$$

Agrupando los exponentes:

$$\begin{array}{lclcl} \text{Masa} & : & c & = & 0 \\ \text{Longitud} & : & a + b - 3c + 2 & = & 0 \\ \text{Tiempo} & : & -2b - 1 & = & 0 \end{array}$$

Resolviendo el sistema:

$$a = -3/2 \qquad b = -1/2 \qquad c = 0$$

$$\therefore \Pi_2 = R^{-3/2} g^{-1/2} p w^0 q$$

$$\Pi_2 = \frac{q}{\sqrt{R^3 g}}$$

$$3. \Pi_3 = R^a g^b p w^c H1 = (L)^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c (L) = M^0 L^0 T^0$$

Agrupando los exponentes:

$$\begin{array}{lclcl} \text{Masa} & : & c & = & 0 \\ \text{Longitud} & : & a + b - 3c + 1 & = & 0 \\ \text{Tiempo} & : & -2b & = & 0 \end{array}$$

Resolviendo el sistema:

$$a = -1 \qquad b = 0 \qquad c = 0$$

$$\therefore \Pi_3 = R^{-1} g^0 p w^0 H1$$

$$\Pi_3 = \frac{H1}{R}$$

$$4. \Pi_4 = R^a g^b p w^c H2 = (L)^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c (H2) = M^0 L^0 T^0$$

Agrupando los exponentes:

$$\begin{array}{lclcl} \text{Masa} & : & c & = & 0 \\ \text{Longitud} & : & a + b - 3c + 1 & = & 0 \\ \text{Tiempo} & : & -2b & = & 0 \end{array}$$



Resolviendo el sistema:

$$a = -1 \quad b = 0 \quad c = 0$$

$$\therefore \Pi_4 = R^{-1} g^0 p w^0 H^2$$

$$\Pi_4 = \frac{H^2}{R}$$

$$5. \Pi_5 = R^a g^b p w^c \phi = (L)^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c = M^0 L^0 T^0$$

Agrupando los exponentes:

$$\text{Masa} : c = 0$$

$$\text{Longitud} : a + b - 3c = 0$$

$$\text{T tiempo} : -2b = 0$$

Resolviendo el sistema:

$$a = 0 \quad b = 0 \quad c = 0$$

$$\therefore \Pi_5 = \phi$$

f) PASO 06

El teorema PI garantiza que la relación funcional debe ser de la forma

$$\frac{Y}{R} = g \left(\frac{q}{\sqrt{R^3 g}}, \frac{H1}{R}, \frac{H2}{R}, \phi \right)$$

7.5.2. ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA LA PRESIÓN SOBRE EL CUCHARÓN DEL TRAMPOLÍN

- La energía disipada está en función del calado aguas abajo, por lo que este será la variable dependiente del análisis dimensional.
- En este análisis no interviene la presión.

a) PASO 01: Se escribe la función y se cuentan las variables.

$$P = f(q, H1, H2, R, \phi, g, pw) \quad \text{Existen 8 variables (n=8)}$$



b) PASO 02: Las dimensiones de cada variables según la tabla 7.1 son:

P	q	H1	R	Ø	g	pw
{ML ⁻¹ T ⁻² }	{L ² T ⁻¹ }	{L}	{L}	-	{LT ⁻² }	{ML ⁻³ }

c) PASO 03

Se determina j. Ninguna variable contiene la dimensión Θ . De modo que j en menor o igual que 3(MLT), y después de una inspección de las variables o parámetros se concluye que j=3, y k=n-j=8-3=5, El teorema de PI garantiza que existen cinco grupos adimensionales en este problema.

d) PASO 04

Se elegirán las j(3) variables repetitivas siendo estas el Radio, la densidad y la gravedad, por cumplir las siguientes condiciones:

- No son variables dependientes
- Las variables no forman un grupo adimensional
- Las variables representan todas las dimensiones primarias del problema
- Ninguna variable es adimensional
- Ninguna variable presenta las mismas dimensiones que otra variable.
- Son parámetros comunes

e) PASO 05

Se combina R, pw y g, sucesivamente, con cada una de las variables adicionales para encontrar los 5 grupos adimensionales.

Primero se añade el calado aguas abajo para determinar Π_1 . Se puede elegir cualquier exponente para esta variable adicional y así situarla en el numerador o denominador elevada a cualquier potencia. Puesto que Y es la variable dependiente, la situamos en el numerador elevada a la primera potencia:

$$1. \Pi_6 = R^a g^b p w^c P = (L)^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c (ML^{-1}T^{-2}) = M^0 L^0 T^0$$

Agrupando los exponentes:

$$\text{Masa} \quad : \quad c + 1 \quad = \quad 0$$

$$\text{Longitud} \quad : \quad a + b - 3c - 1 \quad = \quad 0$$



$$\text{Tiempo} : -2b - 2 = 0$$

Resolviendo el sistema:

$$a = -1 \quad b = -1 \quad c = -1$$

$$\therefore \Pi_6 = R^{-1}g^{-1}pw^{-1}P$$

$$\Pi_6 = \frac{P}{Rgpw}$$

$$2. \Pi_7 = R^a g^b p w^c q = (L)^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c (L^2 T^{-1}) = M^0 L^0 T^0$$

Agrupando los exponentes:

$$\text{Masa} : c = 0$$

$$\text{Longitud} : a + b - 3c + 2 = 0$$

$$\text{Tiempo} : -2b - 1 = 0$$

Resolviendo el sistema:

$$a = -3/2 \quad b = -1/2 \quad c = 0$$

$$\therefore \Pi_7 = R^{-3/2} g^{-1/2} p w^0 q$$

$$\Pi_7 = \frac{q}{R^{3/2} g^{1/2}}$$

$$3. \Pi_8 = R^a g^b p w^c H 1 = (L)^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c (L) = M^0 L^0 T^0$$

Agrupando los exponentes:

$$\text{Masa} : c = 0$$

$$\text{Longitud} : a + b - 3c + 1 = 0$$

$$\text{Tiempo} : -2b = 0$$

Resolviendo el sistema:

$$a = -1 \quad b = 0 \quad c = 0$$

$$\therefore \Pi_8 = R^{-1} g^0 p w^0 H 1$$

$$\Pi_8 = \frac{H 1}{R}$$



$$4. \Pi_9 = R^a g^b p w^c \Phi = (L)^a (LT^{-2})^b (ML^{-3})^c = M^0 L^0 T^0$$

Agrupando los exponentes:

$$\text{Masa} : c = 0$$

$$\text{Longitud} : a + b - 3c = 0$$

$$\text{Tiempo} : -2b = 0$$

Resolviendo el sistema:

$$a = 0 \quad b = 0 \quad c = 0$$

$$\therefore \Pi_9 = \Phi$$

f) PASO 06

El teorema PI garantiza que la relación funcional debe ser de la forma

$$\frac{P}{Rgpw} = g \left(\frac{q}{\sqrt{R^3 g}}, \frac{H1}{R}, \frac{H2}{R}, \Phi \right)$$

Nota: La relación de los grupos adimensionales se obtendrá a partir de los los datos del modelamiento en el capítulo 8.

7.5.3. CÁLCULO DE LOS CAUDALES EN EL PROTOTIPO SEGÚN LA SIMILITUD DE FROUDE.

Caudal modelo

Caudal (m³/s) a Escala

(l/s)	1/10	1/20	1/30	1/40	1/50
4.256	1.346	7.613	20.980	43.068	75.236
11.498	3.636	20.568	56.679	116.352	203.258
15.754	4.982	28.182	77.659	159.419	278.494
22.996	7.272	41.136	113.359	232.703	406.516
27.252	8.618	48.750	134.339	275.771	481.752

Tabla 7.3 Cálculo de los caudales para diferentes escalas

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

- Para el análisis de la disipación de energía se utilizarán los datos de la escala 1/50.



8. MODELAMIENTO EN CIMACIOS CON TRAMPOLINES DE LANZAMIENTO

8.1. INTRODUCCIÓN

- Se realizó pruebas para distintos modelos variando entre estos su altura de lanzamiento, radio del cucharón y ángulo de salida, además en cada uno de estos modelos se colocó deflectores, para así comparar la variación que existe entre un trampolín liso y otro con deflectores.
- Se realizaron pruebas con chorros que caen directamente en el cauce del río, y también para chorros que caen dentro de una piscina de inmersión (fig. 6.22)
- La medición de las variables físicas se realizó como lo indica el capítulo 8.2.

8.2. MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS

8.2.1. CAUDAL

- El caudal se midió mediante aforos, pudiendo estos llevarse a cabo gracias a que el flujo de agua queda confinado por la pared del aliviadero aguas arriba, de esta manera se tiene un volumen definido, se toma un nivel inicial del agua, un nivel final, y el tiempo que le lleva a cada bomba para que el agua llegue del nivel A hasta el nivel B.

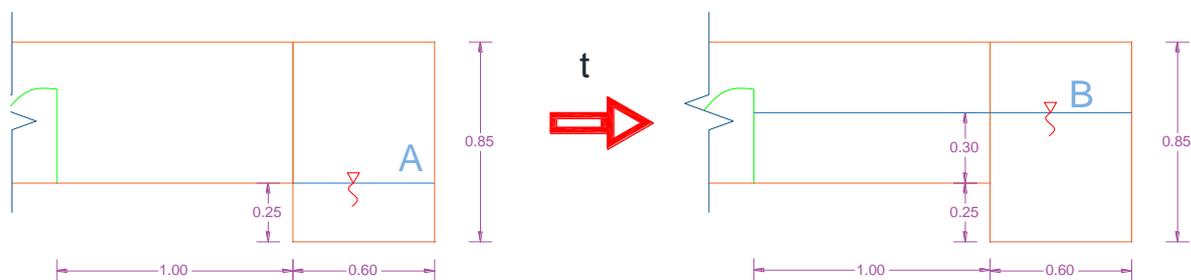


Fig. 8.1 Aforado del caudal

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

- Para tener un control del caudal para todos los ensayos realizados se mide la altura de la carga sobre la cresta del aliviadero, teniendo que ser esta constante para todos los ensayos, en el caso que este varíe se corrige mediante la ecuación 3.1

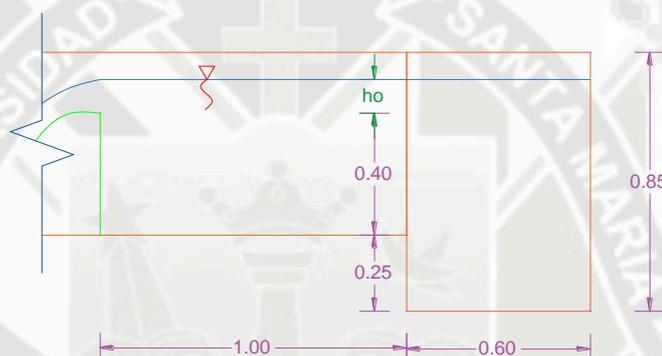


Fig. 8.2 Control del caudal durante los ensayos mediante la altura de carga

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

- Se tiene 3 bombas, dos de 3"x3" y una de 2"x2", todas con una potencia de 2hp, para cada bomba se midió el caudal impulsado y la altura de carga que se genera sobre la cresta del vertedero, los caudales aforados se muestran a continuación:
- El volumen que se llena como se muestra en la figura 8.1 es:

$$\begin{aligned} \text{Volumen aforado} &= 1.60 \times 0.30 \times 0.40(\text{ancho del canal}) \\ \text{Volumen aforado} &= 0.192\text{m}^3 \text{ ó } 192 \text{ l} \end{aligned}$$

- Se aforó el flujo para cada bomba 3 veces tomando como resultado final el promedio de las mediciones.



8.2.1.1. BOMBA 2" X 2" Nro 1

<i>Vol(l)</i>	<i>T(s)</i>	<i>Q(l/s)</i>
192	44.971	4.269
192	45.217	4.246
192	45.148	4.253
Qprom		4.256

Tabla 8.1 Cálculo del caudal bombeado por aforo
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.2.1.2. BOMBA 3" X 3" Nro 2

<i>Vol(l)</i>	<i>T(s)</i>	<i>Q(l/s)</i>
192	16.725	11.480
192	16.832	11.407
192	16.528	11.617
Qprom		11.501

Tabla 8.2 Cálculo del caudal bombeado por aforo
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.2.1.3. BOMBA 3" X 3"

<i>Vol(l)</i>	<i>T(s)</i>	<i>Q(l/s)</i>
192	16.834	11.405
192	16.785	11.439
192	16.497	11.638
Qprom		11.494

Tabla 8.3 Cálculo del caudal bombeado por aforo
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

- Al presentarse una diferencia porcentual de sólo el 0.06% entre los caudales bombeados por las bombas de 3"x3", se tomará el promedio de estas para realizar los cálculos, el cual es **11.498 l/s**.

8.2.2. VELOCIDAD

- Se midieron dos tipos de velocidades:

8.2.2.1. Velocidad Media

- Esta velocidad se calcula teniendo como datos el caudal aforado y los tirantes, de esta manera se puede calcular la velocidad mediante la ecuación 8.1.

$$V_{med} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B \times y} \quad (8.1)$$

- La velocidad media depende de la sección del flujo y del tipo de ensayo que se esté evaluando por lo que se mostrará a detalle en la sección 8.3.

8.2.3. TIRANTE

- Los tirantes se midieron con un vernier electrónico, este se midió en dos secciones constantes del aliviadero, a 1.40m y a 2.00m de la pared del aliviadero, la velocidad media depende del tirante y al igual que esta, el tirante varía para todos los ensayos realizados.



Fotografía 8.1
Medición del tirante aguas abajo

8.3. DATOS OBTENIDOS DEL MODELAMIENTO

- Los datos obtenidos son:
 - Altura de la carga sobre la cresta del aliviadero
 - Tirante del agua a 1.50m, 2.00m, 2.50m
 - Altura máxima y mínima alcanzada por el chorro
 - Distancia horizontal máxima y mínima alcanzada por el chorro
 - Presiones en la parte más baja del trampolín
 - Tirante a la salida del trampolín

8.3.1. MODELO DE CONTROL

- El modelo de control consiste en un aliviadero sin trampolín construido en base a la a diseño presentado en la figura 6.6, a partir de los calados generados se compara la diferencia entre la energía disipada de este modelo y el modelo con trampolín..



Fotografía 8.2 Modelo de control en funcionamiento



Fotografía 8.3 Modelo de control

8.3.1.1. Sin piscina de inmersión

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	2.5	2	2	2.5	2.5	2.5	3	2	2
Q(11.50)	2	2	2	2.5	2.5	2	3	2.5	2.5
Q(15.76)	2	2	2	3	3	2.5	3	3	2.5
Q(23.00)	2.5	3	3	4	4	4	4	4	4
Q(27.26)	4	4	4	3.5	3	3	4	4	3.5

Tabla 8.4

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.1.2. Con piscina de inmersión $h=0.10\text{m}$

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	3.5	3	3.5	3.5	3	3	3	3	3
Q(11.50)	5	5	5	5	5.5	5.5	4.5	4.5	4.5
Q(15.76)	4	5	4	5	5	5	4	4	4
Q(23.00)	4	5	4	4.5	4	5	5	5	5
Q(27.26)	-			4	5	5	6	5	5

Tabla 8.5

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.1.3. Con piscina de inmersión $h=0.20\text{m}$

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	3.5	3	3.5	3	3	3	3	3	3
Q(11.50)	5	5	5	5	5	5	4	5	5
Q(15.76)	5	4	5	4	4	5	4	4	4
Q(23.00)	4	4	4	5	4	5	5	5	5
Q(27.26)				4	4	4	6	5	5

Tabla 8.6

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2. TIRANTES AGUAS ABAJO GENERADOS POR LOS TRAMPOLINES

- Para todos los ensayos mostrados de las tablas 8.7 a 8.45 la piscina de inmersión tiene una altura de 0.20 m.



Fotografía 8.4 Modelo con trampolín



8.3.2.1. RADIO IGUAL A 5.00 cm

8.3.2.1.1. ANGULO IGUAL A 30°

8.3.2.1.1.1. Sin deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	4.5	5	4.2	4.2	4.2	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	6.5	7	7.5	6	6	6.5	6	6	6
Q(15.76)	8	8.5	9	6	6.5	7.5	7	6	6
Q(23.00)	10	11	11	7	7.5	8	7	8	7
Q(27.26)	10	10	10	8	8	8	8	8	8

Tabla 8.7

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2.1.1.2. Con deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4	4	4	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	7.5	8	8	6.5	6.5	6.5	6	6	6
Q(15.76)	8	8	9	7	7	8	7	7	7
Q(23.00)	8	8	9	7	7.5	7.5	9	9	9
Q(27.26)	9	10	10	8	8.5	8.5	9	9	9

Tabla 8.8

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2.1.2. ANGULO IGUAL A 45°

8.3.2.1.2.1. Sin deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.2	4.2	4.2	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	8.5	8.5	8.5	7	7	7	6	6	6
Q(15.76)	8	9	7	7	7	7	7	6	6
Q(23.00)	9	9	9	8	8	8	7	8	7
Q(27.26)	9	9	9	9	9	9	8	8	8

Tabla 8.9

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.2.1.2.2. Con deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.2	4.2	4.2	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	8	8	8	7	7	7	6	6	6
Q(15.76)	9	9.5	9.5	8	8	8	7	7	7
Q(23.00)	10	10	10	9.5	10	9.5	9	9	9
Q(27.26)	10	10	11	9	9	9	9	9	9

Tabla 8.10

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2.2. RADIO IGUAL A 10.00 cm

8.3.2.2.1. ANGULO IGUAL A 30°

8.3.2.2.1.1. Sin deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.2	4.2	4	3.6	3.6	3.6
Q(11.50)	8	8	8	7	7	7	6	6	6
Q(15.76)	7	7	8	7	7	7	6	6	6
Q(23.00)	9	9	9	7	7	7	6.5	6	6
Q(27.26)	9	9	9	8	8	8	7	7	7

Tabla 8.11

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2.2.1.2. Con deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.2	4.3	4.2	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	8	8	8	7	7	7	6	6	6
Q(15.76)	8	8	8	7.5	7.5	7.5	7	7	7
Q(23.00)	8	8	8	9	9	9	8	8	8
Q(27.26)	9	9	9	6	6	6	7	7	7

Tabla 8.12

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.2.2.2. ANGULO IGUAL A 45°

8.3.2.2.2.1. Sin deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.2	4.2	4.2	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	8	8	8	7	7	7	6	6	6
Q(15.76)	6	7	9	7	6.5	6.5	6	6	6
Q(23.00)	6	6	8	7	7	7	7	6	6
Q(27.26)	6	6	6	7	6	6	7	7	7

Tabla 8.13

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2.2.2.2. Con deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	4.8	4.8	4.8	4.3	4.3	4.3	3.6	3.6	3.6
Q(11.50)	7	7.2	7.2	6.5	6.3	6.7	6.2	6	6.1
Q(15.76)	9	8.5	8.7	8	8.2	8.4	7	7.2	7
Q(23.00)	9	10	10	9.8	9.5	9.5	9	9	9
Q(27.26)	9	8	10	10	10	10	10	10	10

Tabla 8.14

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2.3. RADIO IGUAL A 15.00 cm

8.3.2.3.1. ANGULO IGUAL A 30°

8.3.2.3.1.1. Sin deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.2	4.2	4.2	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	8	8	8	6.5	7	6.5	5.5	5.5	6
Q(15.76)	6	7	9	7	7	7	6	6	6
Q(23.00)				9.5	9.5	9.5	9	9	9
Q(27.26)				9.8	10	9.5	10	10	10

Tabla 8.15

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.2.3.1.2. Con deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.2	4.2	4.2	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	8	8	8	7	7	7	6	6	6
Q(15.76)	9	8.5	8.7	8	8.2	8.4	7	7.2	7
Q(23.00)				9.5	9.5	9.5	9	9	9
Q(27.26)				9.5	10	10	10	10	10

Tabla 8.16

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2.3.2. ANGULO IGUAL A 45°

8.3.2.3.2.1. Sin deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.2	4.2	4.2	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	8	8	8	6.5	7	6.5	5.5	5.5	6
Q(15.76)	8	7	9	7	7	7	6	6	6
Q(23.00)				9.5	9.5	9.5	9	9	9
Q(27.26)				9.5	10	9.8	10	10	10

Tabla 8.17

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2.3.2.2. Con deflectores

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.2	4.2	4.2	3.5	3.5	3.5
Q(11.50)	8	7.5	7	7	7	7	6	6	6
Q(15.76)	8	8	8.5	8	8	7.5	7.5	7	7
Q(23.00)				9.5	9.6	9.5	9	9	9
Q(27.26)				9.8	10	9.8	10	10	10

Tabla 8.18

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.2.4. Con piscina de inmersión $h=0.10\text{m}$

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	5	5	5	4.1	4.1	4.1	3.4	3.4	3.4
Q(11.50)	8.5	8	7.5	6.8	6.6	6.5	5.5	5.8	5.5
Q(15.76)	8	7	7	8	8	7.3	7	7	6.8
Q(23.00)				7	7	7	6.5	6.5	6.5
Q(27.26)				7	7	7	6	6	6

Tabla 8.19

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.2.5. Con piscina de inmersión $h=0.00\text{m}$

	y1(1.50 m)			y2(2.00 m)			y3(2.50 m)		
	(cm)			(cm)			(cm)		
Q(4.26)	4.8	4.8	4.8	4	4	4	3.4	3.4	3.4
Q(11.50)	4	5	5	5	5	5	4	4.5	4.5
Q(15.76)				4	3.5	3.5	3	3.5	4
Q(23.00)				4	4	4	4	4	5
Q(27.26)				4	5	4	5	4.5	5

Tabla 8.20

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.3. PRESIONES SOBRE EL CUCHARÓN

- Todas las presiones mostradas a continuación se midieron con piezómetros colocados a lo largo del eje que pasa por el nivel más bajo del cucharón, y las lecturas tomaron en centímetros, los piezómetros de la derecha e izquierda se colocaron a 7.5 cm del eje central.

8.3.3.1. RADIO IGUAL A 5.00 cm

8.3.3.1.1. ANGULO IGUAL A 30°

8.3.3.1.1.1. Sin deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	5	5	2	3	4	5
11.5	16	21	12	23	18	18
15.756	21	23	18	25	23	24
23	27	28	29	37	26	28
27.256	27	28	30	38	28	30

Tabla 8.21

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.3.1.1.2. Con deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	10	11	0.8	1	9	10
11.5	17	20	6	8	22	25
15.756	18	25	11	12	24	25
23	25	30	21.5	25	24	27
27.256	24	32	26	30	21	34

Tabla 8.22

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.3.1.2. ANGULO IGUAL A 45°

8.3.3.1.2.1. Sin deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	10	10	1	1	8	9
11.5	18	20	3	7	15	16
15.756	21	23	9	15	23	23
23	25	28	20	35	25	28
27.256	25	29	30	40	25	29

Tabla 8.23

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.3.1.2.2. Con deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	5	3	1	2	3	3
11.5	17	21	9	15	10	8
15.756	21	23	15	25	22	22
23	26	27	28	42	27	28
27.256	24	27	34	43	25	31

Tabla 8.24

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.3.2. RADIO IGUAL A 10.00 cm

8.3.3.2.1. ANGULO IGUAL A 30°

8.3.3.2.1.1. Sin deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	5	6	5.8	6	3	3
11.5	12	14	14	15	19	23
15.756	15	21	18	15	16	20
23	26	31	26.5	17	22	24
27.256	27	33	22	20	22	35

Tabla 8.25

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.3.2.1.2. Con deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	6	8	11	11	6	7
11.5	17	19	18	24	18	24
15.756	22	26	24	23	15	21
23	26	31	30	26	26	29
27.256	33	33	26	32	32	29

Tabla 8.26

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.3.2.2. ANGULO IGUAL A 45°

8.3.3.2.2.1. Sin deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	5	5	6	6	2	2
11.5	13	14	11	14	12	14
15.756	18	19	16	18	15	18
23	26	29	25	27	23	25
27.256	28	30	26	30	26	30

Tabla 8.27

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.3.2.2.2. Con deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	6	6	10	10	5	5
11.5	18	19	15	16	10	14
15.756	22	26	21	23	14	19
23	25	30	29	31	27	29
27.256	30	32	30	37	29	30

Tabla 8.28

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.3.3. RADIO IGUAL A 15.00 cm

8.3.3.3.1. ANGULO IGUAL A 30°

8.3.3.3.1.1. Sin deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	4	4	1	1.5	4	4
11.5	8	9	5	6	8	9
15.756	12	13	8.5	10.5	12	13
23	18	20	14	15	18	20
27.256	20	23	16	24	20	23

Tabla 8.29

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.3.3.1.2. Con deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	4	4	1	1	4	4
11.5	10	12	5	7	10	12
15.756	14	16	11	12	14	16
23	21	23	18	22	21	23
27.256	24	25	22	27	24	25

Tabla 8.30

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.3.3.2. ANGULO IGUAL A 45°

8.3.3.3.2.1. Sin deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	5	6	1	1	5	6
11.5	11	12	5	6	11	12
15.756	15	17	10	11	15	17
23	22	24	17	19	22	24
27.256	24	28	21	26	21	23

Tabla 8.31

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.3.3.2.2. Con deflectores

Q	Pz(izquierda)		Pz(Central)		Pz(Derecha)	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	5	5.5	0.8	1	5	5.5
11.5	12	14	6	8	12	14
15.756	16	18	11	12	16	18
23	24	28	21.5	25	24	28
27.256	26	30	26	30	26	30

Tabla 8.32

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4. LONGITUDES ALCANZADAS Y ALTURAS MÁXIMAS DEL FLUJO LANZADO

- Las longitudes de todas las tablas desde la 8.33 a la 8.44 se midieron con respecto a la pared del aliviadero como se muestra en la figura 8.4

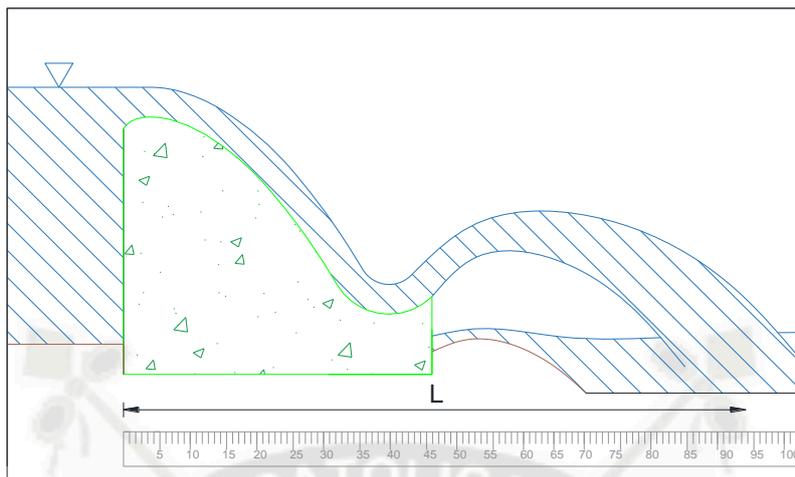


Fig. 8.3 Medición de la longitud del alcance del flujo lanzado
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4.1. RADIO IGUAL A 5.00 cm

8.3.4.1.1. ANGULO IGUAL A 30°

8.3.4.1.1.1. Sin deflectores

Q (l/s)	Hmax (cm)	Lmax (cm)	Lmin (cm)
4.256	22	108	100
11.500	26	116	100
15.756	32	115	100
23.000	28	120	100
27.256	26	115	100

Tabla 8.33

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4.1.1.2. Con deflectores

Q (l/s)	Hmax (cm)	Lmax (cm)	Lmin (cm)
4.256	29	94	76
11.500	33	115	81
15.756	34	115	82
23.000	36	117	92
27.256	38	113	100

Tabla 8.34

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.4.1.2. ANGULO IGUAL A 45°

8.3.4.1.2.1. Sin deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	29	104	100
11.500	33	115	100
15.756	34	120	100
23.000	29	119	100
27.256	30	113	100

Tabla 8.35

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4.1.2.2. Con deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	34	92	75
11.500	40	103	80
15.756	40	113	86
23.000	40	122	90
27.256	42	130	100

Tabla 8.36

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4.2. RADIO IGUAL A 10.00 cm

8.3.4.2.1. ANGULO IGUAL A 30°

8.3.4.2.1.1. Sin deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	19	106	100
11.500	24	115	100
15.756	26	120	100
23.000	30	126	100
27.256	30	128	100

Tabla 8.37

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4.2.1.2. Con deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	29	95	78
11.500	36	99	90
15.756	29	114	106
23.000	31	120	100
27.256	32	115	100

Tabla 8.38

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.4.2.2. ANGULO IGUAL A 45°

8.3.4.2.2.1. Sin deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	21	108	102
11.500	26	117	98
15.756	27	124	97
23.000	29	127	100
27.256	30	130	93

Tabla 8.39

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4.2.2.2. Con deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	29	98	90
11.500	37	112	95
15.756	36	116	98
23.000	36	130	100
27.256	35	130	105

Tabla 8.40

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4.3. RADIO IGUAL A 15.00 cm

8.3.4.3.1. ANGULO IGUAL A 30°

8.3.4.3.1.1. Sin deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	20	104	94
11.500	20	120	90
15.756	22	126	97
23.000	25	132	97
27.256	32	138	97

Tabla 8.41

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4.3.1.2. Con deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	25	104	80
11.500	29	127	94
15.756	31	130	95
23.000	32	130	94
27.256	41	132	100

Tabla 8.42

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



8.3.4.3.2. ANGULO IGUAL A 45°

8.3.4.3.2.1. Sin deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	19	90	85
11.500	23	108	90
15.756	25	120	92
23.000	30	127	97
27.256	40	129	99

Tabla 8.43

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.4.3.2.2. Con deflectores

Q	Hmax	Lmax	Lmin
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
4.256	28	92	78
11.500	35	106	90
15.756	35	120	94
23.000	40	120	100
27.256	43	120	100

Tabla 8.44

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.3.5. TIRANTES DEL FLUJO DE APROXIMACIÓN AL CUCHARÓN

Q	d
(l/s)	(cm)
4.256	0.8
11.500	2
15.756	2.5
23.000	3.5
27.256	4

Tabla 8.45

Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

8.4. NOTAS

- Todos los datos de las tablas mostradas en el capítulo 8 se resumirán en el capítulo 9 haciendo su debida comparación, en base a los cambios en los parámetros del disipador de energía.
- Se comparará los datos de las presiones máximas y mínimas con las ecuaciones 5.26 y 5.27.



9. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

- A continuación se presentan tablas con los resultados promedio de los tirantes medidos en dos secciones del canal aguas abajo del aliviadero.

	R	5
	Ángulo	45
	Deflectores	SI
q	y _{2p} (2 m)	y _{3p} (2.50 m)
(l/s/m)	(cm)	(cm)
14.200	4.20	3.50
38.333	7.00	6.00
52.533	8.00	7.00
76.667	9.67	9.00
90.867	9.00	9.00

Tabla 9.1

	R	5
	Ángulo	45
	Deflectores	NO
q	y _{2p} (2 m)	y _{3p} (2.50 m)
(l/s/m)	(cm)	(cm)
14.200	4.20	3.50
38.333	7.00	6.00
52.533	7.00	6.33
76.667	8.00	7.33
90.867	9.00	8.00

Tabla 9.2

	R	5
	Ángulo	30
	Deflectores	SI
q	y _{2p} (2 m)	y _{3p} (2.50 m)
(l/s/m)	(cm)	(cm)
14.200	4.00	3.50
38.333	6.50	6.00
52.533	7.80	7.80
76.667	8.00	8.00
90.867	9.00	9.00

Tabla 9.3

	R	5
	Ángulo	30
	Deflectores	SI
q	y _{2p} (2 m)	y _{3p} (2.50 m)
(l/s/m)	(cm)	(cm)
14.200	4.20	3.50
38.333	6.17	6.00
52.533	6.67	6.33
76.667	7.50	7.33
90.867	8.00	8.00

Tabla 9.4

Elaborados por: Coaguila R. Juan Manuel P.



		R	10
		Ángulo	45
		Deflectores	SI
q	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
(l/s/m)	(cm)	(cm)	
14.200	4.30	3.60	
38.333	6.50	6.10	
52.533	8.20	7.07	
76.667	9.60	9.00	
90.867	10.00	10.00	

Tabla 9.5

		R	10
		Ángulo	45
		Deflectores	NO
q	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
(l/s/m)	(cm)	(cm)	
4.20		3.50	
7.00		6.00	
6.67		6.00	
7.00		6.33	
6.33		7.00	

Tabla 9.6

		R	10
		Ángulo	30
		Deflectores	SI
q	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
(l/s/m)	(cm)	(cm)	
14.200	4.23	3.50	
38.333	7.00	6.00	
52.533	7.50	7.00	
76.667	8.50	8.00	
90.867	9.00	9.00	

Tabla 9.7

		R	10
		Ángulo	30
		Deflectores	SI
q	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
(l/s/m)	(cm)	(cm)	
4.13		3.60	
7.00		6.00	
7.00		6.00	
7.00		6.17	
8.00		7.00	

Tabla 9.8

		R	15
		Ángulo	45
		Deflectores	SI
q	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
(l/s/m)	(cm)	(cm)	
14.200	4.200	3.500	
38.333	7.000	6.000	
52.533	7.833	7.167	
76.667	9.533	9.000	
90.867	9.867	10.000	

Tabla 9.9

		R	15
		Ángulo	45
		Deflectores	NO
q	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
(l/s/m)	(cm)	(cm)	
4.200		3.500	
6.000		6.000	
6.500		6.500	
9.000		9.000	
9.500		9.500	

Tabla 9.10

Elaborados por: Coaguila R. Juan Manuel P.



		R	15
		Ángulo	30
		Deflectores	SI
q	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
(l/s/m)	(cm)	(cm)	
14.200	4.200	3.500	
38.333	7.000	6.000	
52.533	8.200	7.067	
76.667	9.500	9.000	
90.867	9.833	10.000	

Tabla 9.11

		R	15
		Ángulo	30
		Deflectores	SI
	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
	(cm)	(cm)	
	4.200	3.500	
	6.667	5.667	
	7.000	6.000	
	9.500	9.000	
	9.767	10.000	

Tabla 9.12

		R	15
		Ángulo	45
		Deflectores	SI
		H PISCINA	0
q	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
(l/s/m)	(cm)	(cm)	
14.200	4.000	3.400	
38.333	5.000	4.333	
52.533	3.667	3.500	
76.667	4.000	4.333	
90.867	4.333	4.833	

Tabla 9.13

		R	15
		Ángulo	45
		Deflectores	SI
		H PISCINA	10
	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
	(cm)	(cm)	
	4.100	3.400	
	6.633	5.600	
	7.767	6.933	
	7.000	6.500	
	7.000	6.000	

Tabla 9.14

		R	CONTROL
		H PISCINA	0
q	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
(l/s/m)	(cm)	(cm)	
14.200	2.500	2.333	
38.333	2.333	2.667	
52.533	2.833	2.833	
76.667	4.000	4.000	
90.867	3.167	3.833	

Tabla 9.15

		R	15
		H PISCINA	10
	y2p(2 m)	y3p(2.50 m)	
	(cm)	(cm)	
	3.167	3.000	
	5.333	4.500	
	5.000	4.000	
	4.500	5.000	
	4.667	5.333	

Tabla 9.16

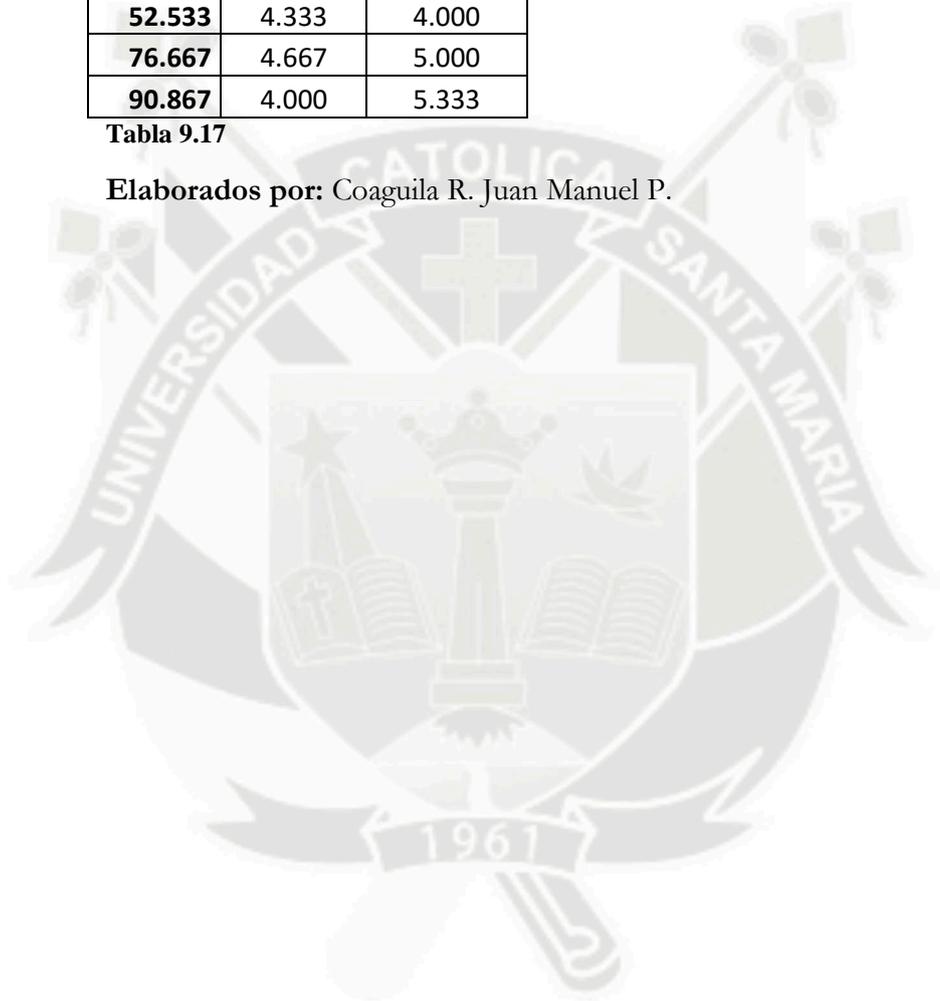
Elaborados por: Coaguila R. Juan Manuel P.



	R	15
	H PISCINA	20
q	y _{2p} (2 m)	y _{3p} (2.50 m)
(l/s/m)	(cm)	(cm)
14.200	3.000	3.000
38.333	5.000	4.667
52.533	4.333	4.000
76.667	4.667	5.000
90.867	4.000	5.333

Tabla 9.17

Elaborados por: Coaguila R. Juan Manuel P.





9.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DISIPACION DE ENERGIA EN LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES DEL TRAMPOLIN

9.1.1. COMPARACIÓN DE LOS TIRANTES MANTENIENDO EL RADIO CONSTANTE Y VARIANDO LOS PARÁMETROS: ÁNGULO Y PRESENCIA DE DEFLECTORES

Control (sin trampolín)

SECCIÓN 01(2.00 M)

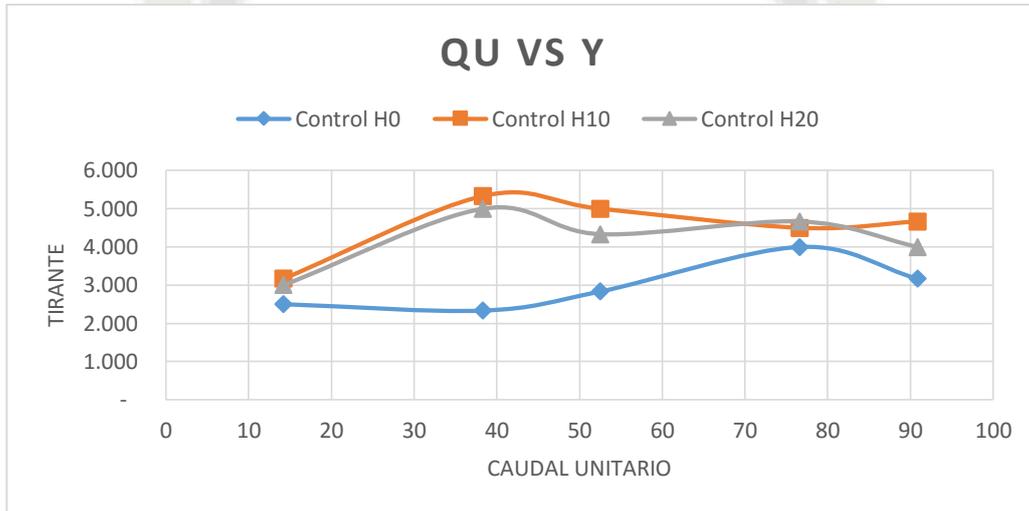


Figura 9.1
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

SECCIÓN 02(2.50 M)

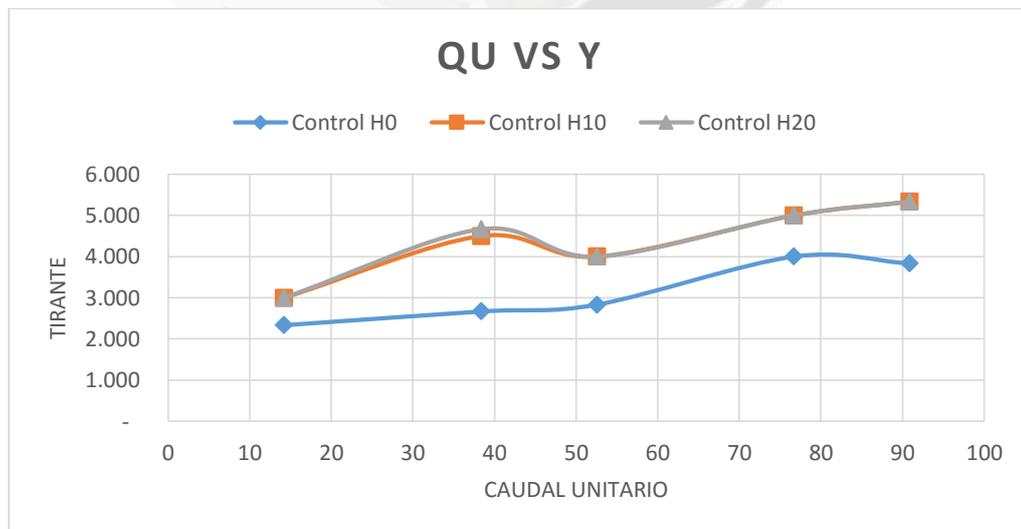


Figura 9.2
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



Radio 5cm

SECCIÓN 01(2.00 M)

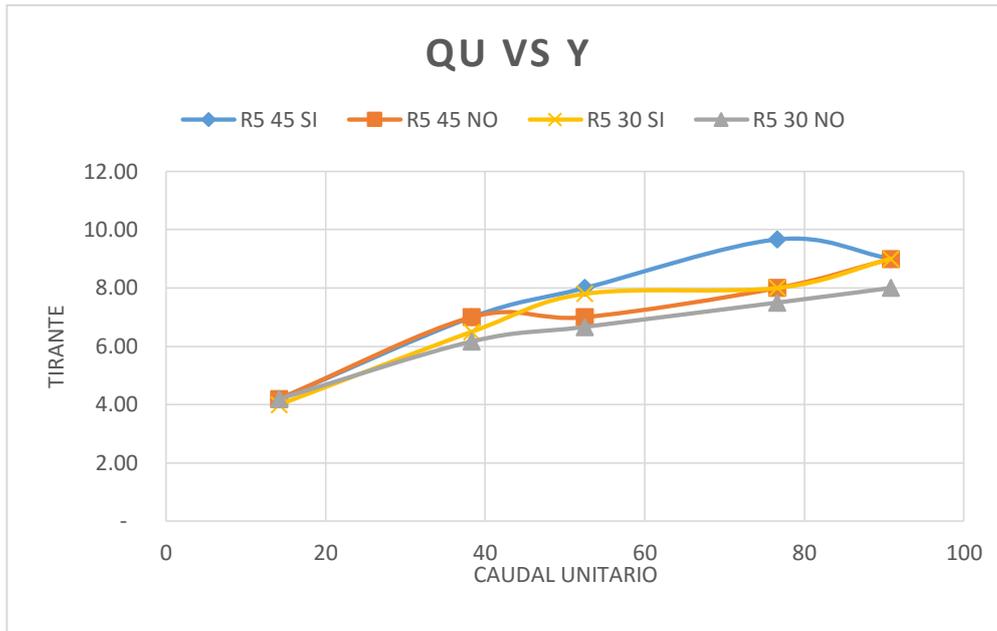


Figura 9.3
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

SECCIÓN 02(2.50 M)

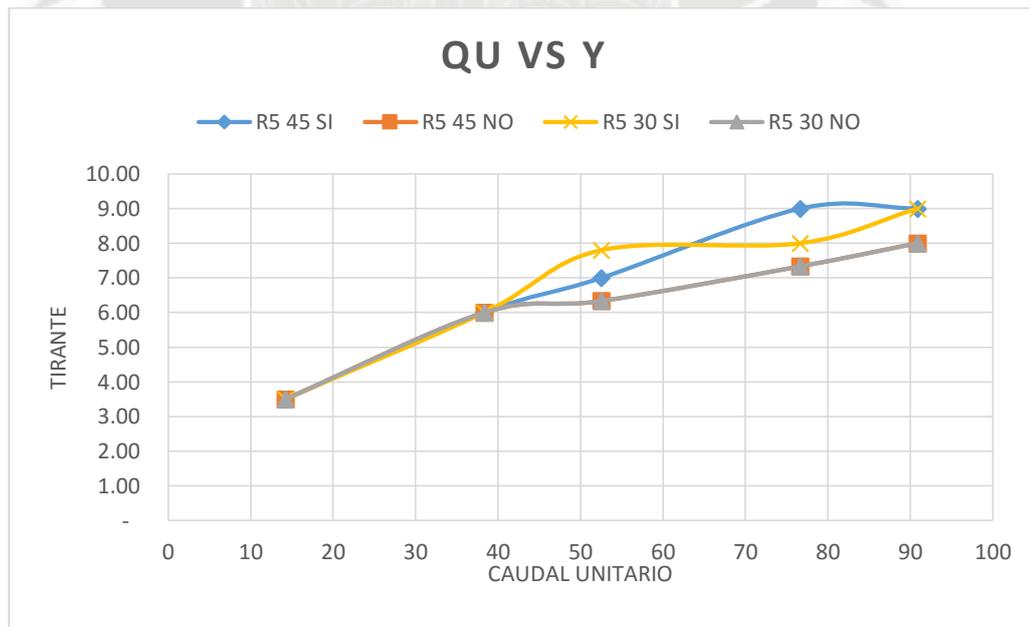


Figura 9.4
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



Radio 10cm

SECCIÓN 01(2.00 M)

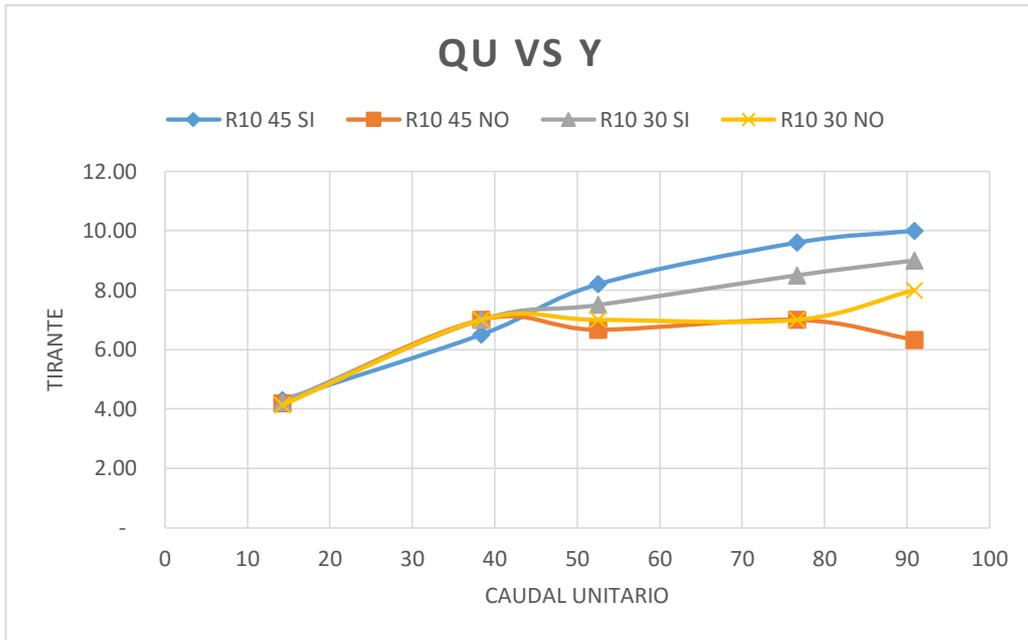


Figura 9.5
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

SECCIÓN 02(2.50 M)

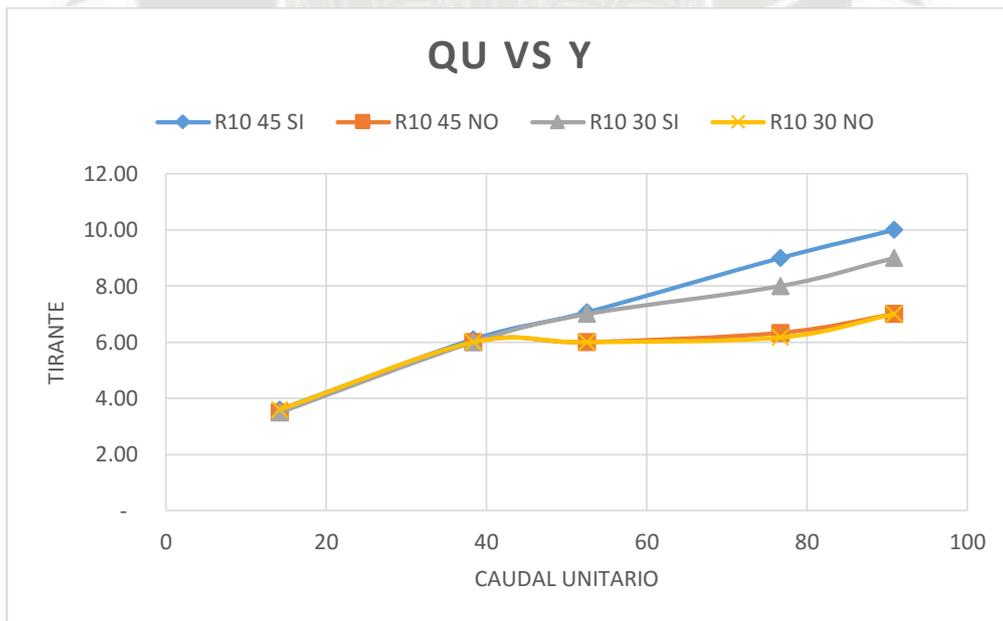


Figura 9.6
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



Radio 15cm

SECCIÓN 01(2.00 M)

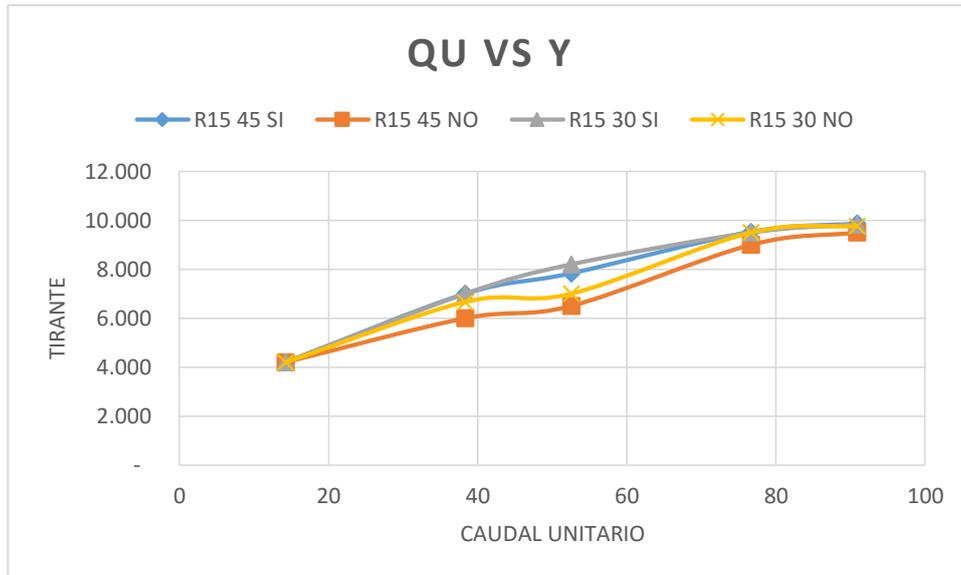


Figura 9.7
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

SECCIÓN 02(2.50 M)

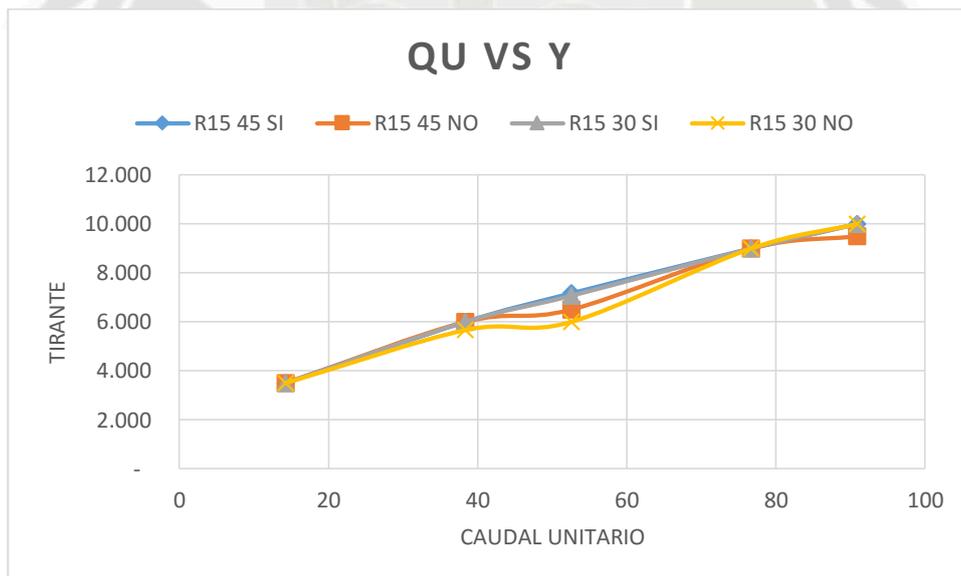


Figura 9.8
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.1.2. COMPARACIÓN DE LOS TIRANTES MANTENIENDO EL ANGULO CONSTANTE Y VARIANDO EL RADIO

Ángulo 45° SIN Deflectores

SECCIÓN 01(2.00 M)

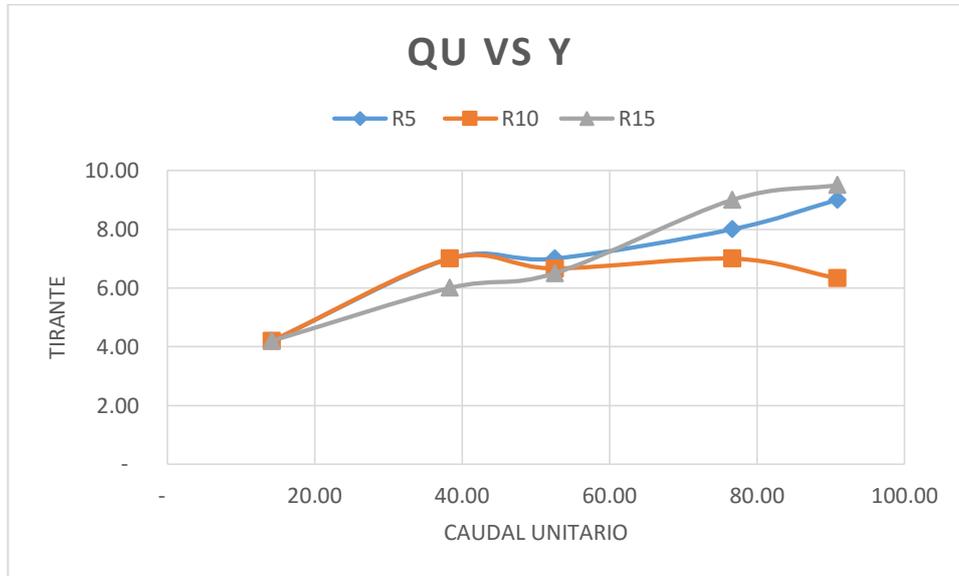


Figura 9.9
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

SECCIÓN 02(2.50 M)

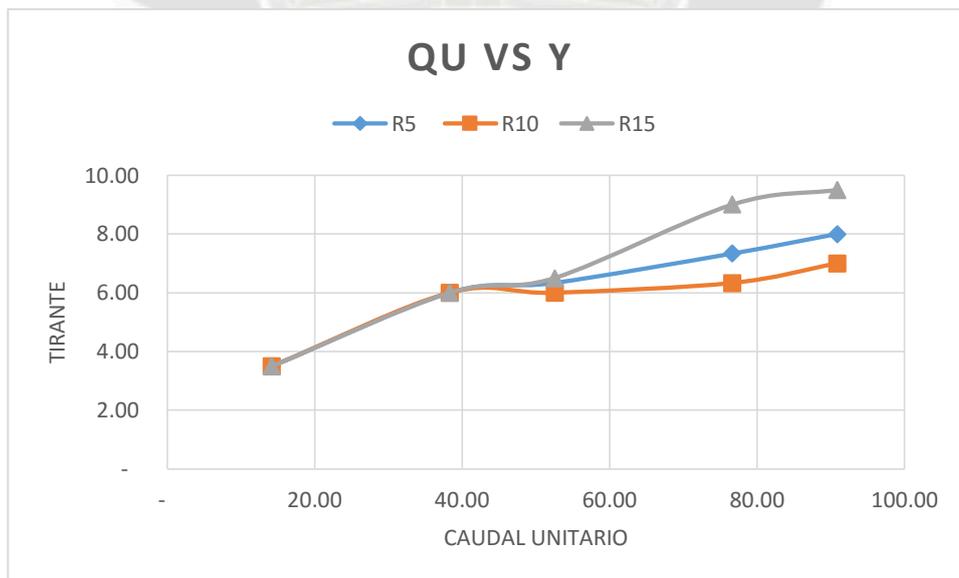


Figura 9.10
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



Ángulo 30° SIN Deflectores

SECCIÓN 01(2.00 M)

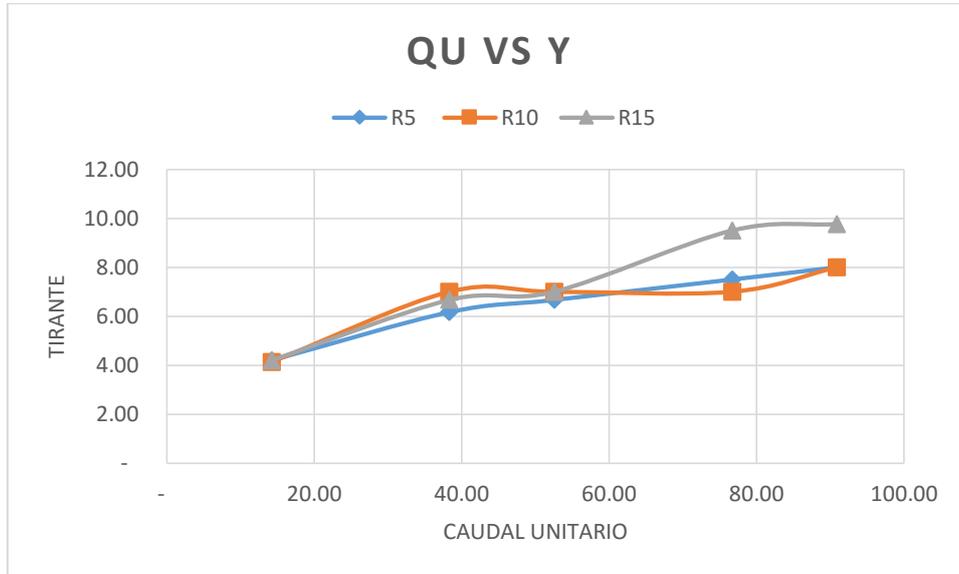


Figura 9.11
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

SECCIÓN 02(2.50 M)

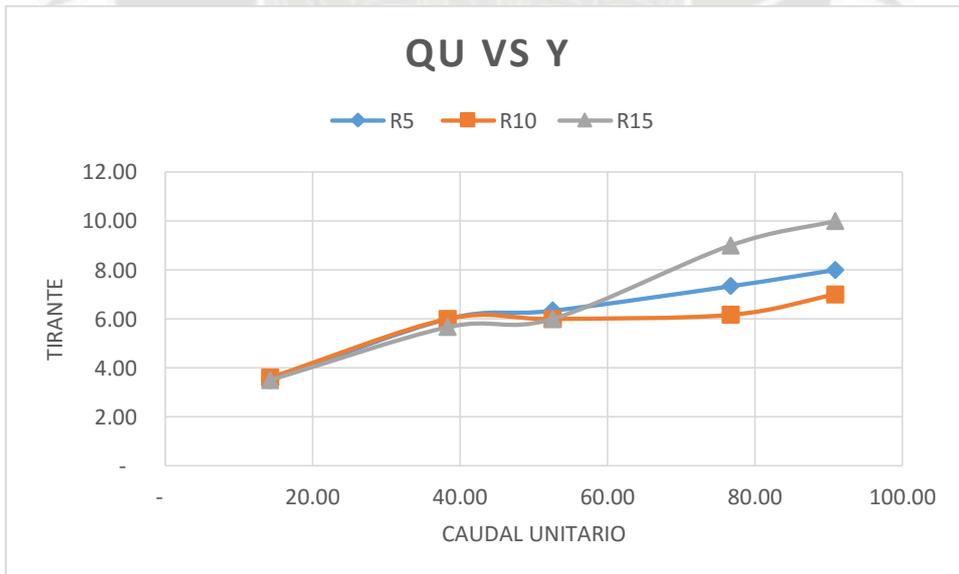


Figura 9.12
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



Ángulo 45° CON Deflectores

SECCIÓN 01(2.00 M)

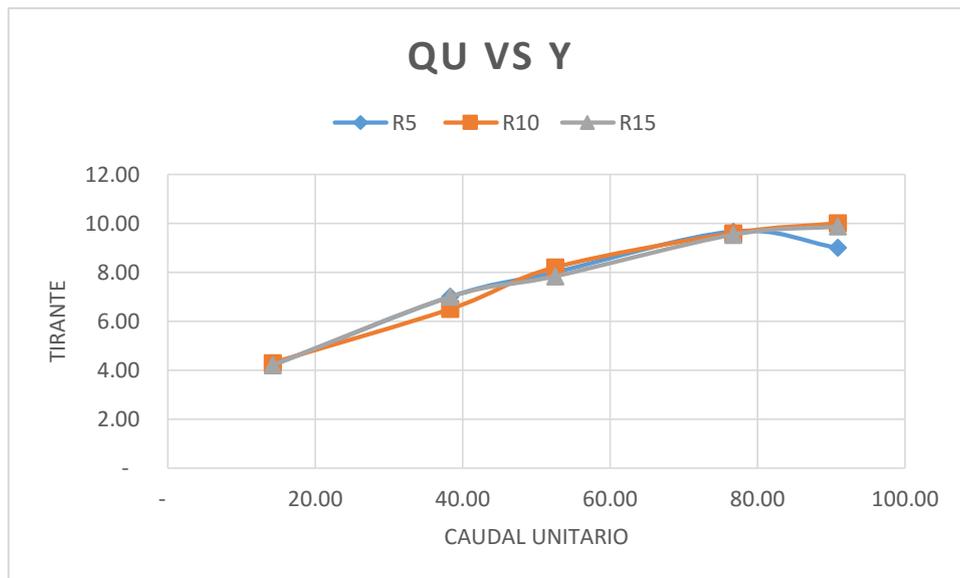


Figura 9.13
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

SECCIÓN 02(2.50 M)

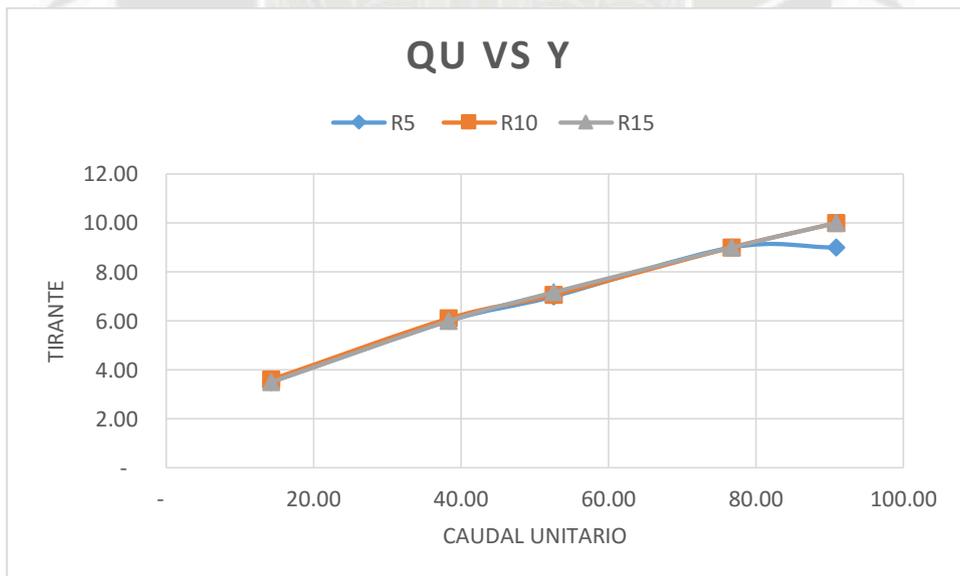


Figura 9.14
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



Ángulo 30° CON Deflectores

SECCIÓN 01(2.00 M)

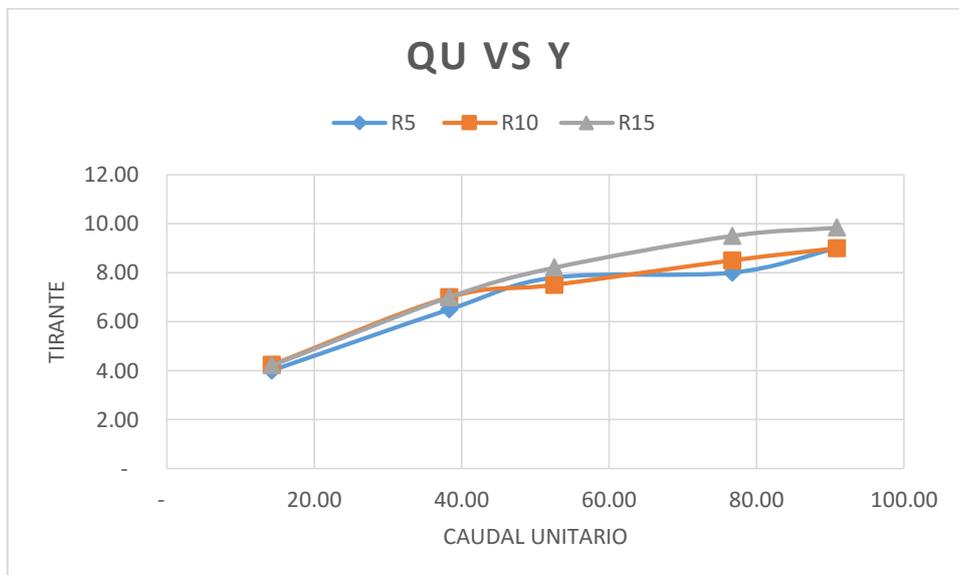


Figura 9.15
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

SECCIÓN 02(2.50 M)

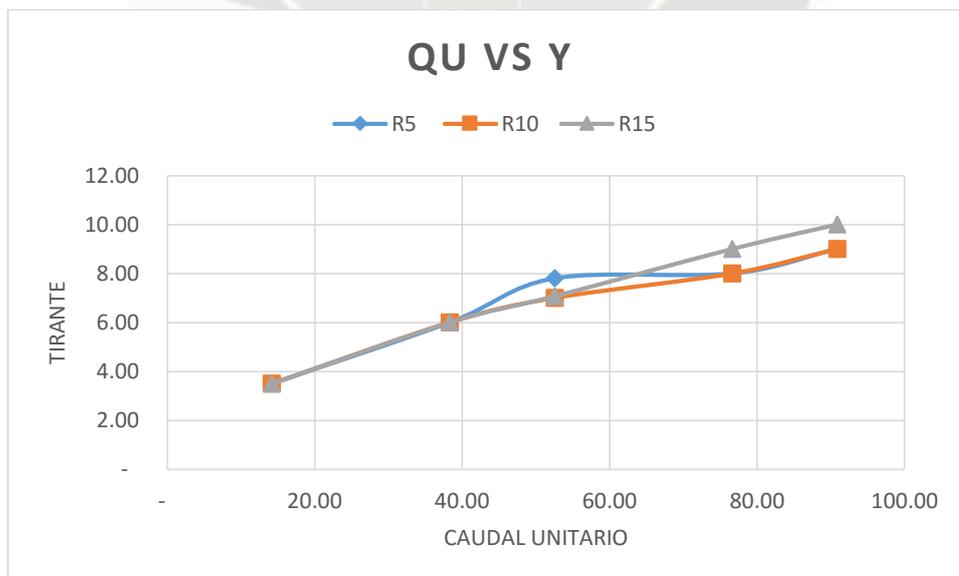


Figura 9.16
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.1.3. COMPARACIÓN DE LOS TIRANTES MANTENIENDO EL RADIO, EL ÁNGULO CONSTANTES Y VARIANDO LA ALTURA DE LA PISCINA DE INMERSIÓN (Radio= 15cm y Ángulo = 45)
SECCIÓN 01(2.00 M)

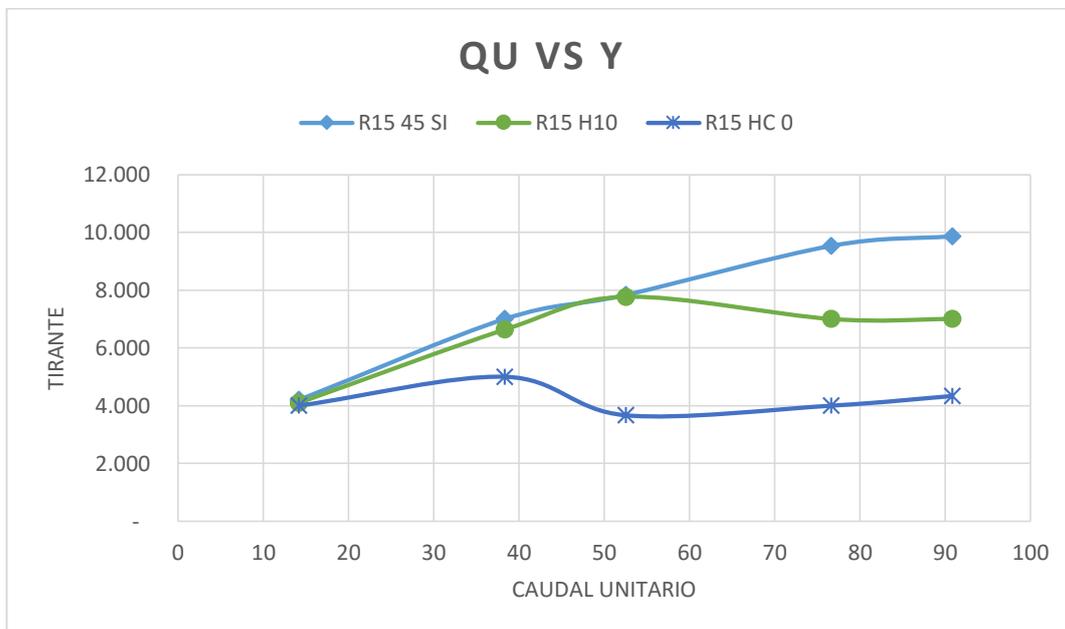


Figura 9.17
 Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

SECCIÓN 02(2.50 M)

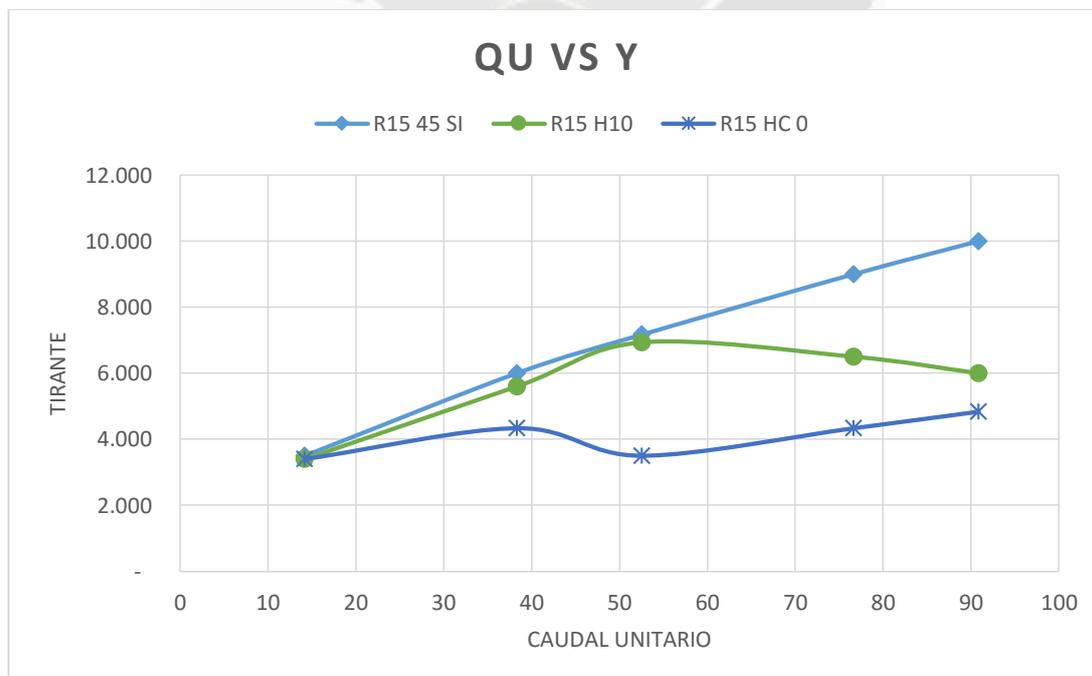


Figura 9.18
 Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.2. COMPARACION DE LAS PRESIONES EXPERIMENTALES PRESENTADAS SOBRE EL CUCHARÓN Y LAS PRESIONES TEÓRICAS DADAS EN LAS ECUACIONES 5.26 Y 5.27

9.2.1. RADIO IGUAL A 5cm

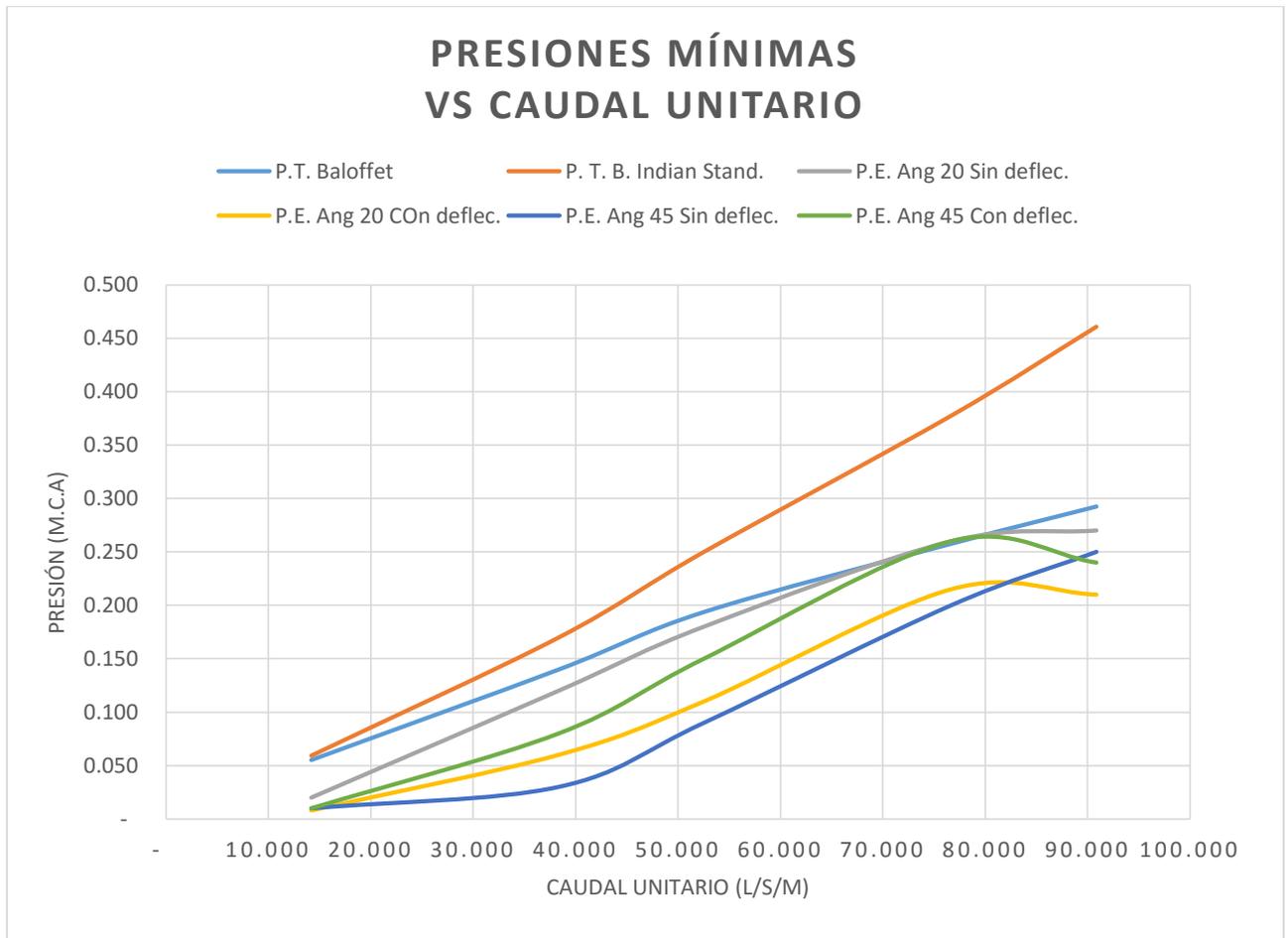


Figura 9.19
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

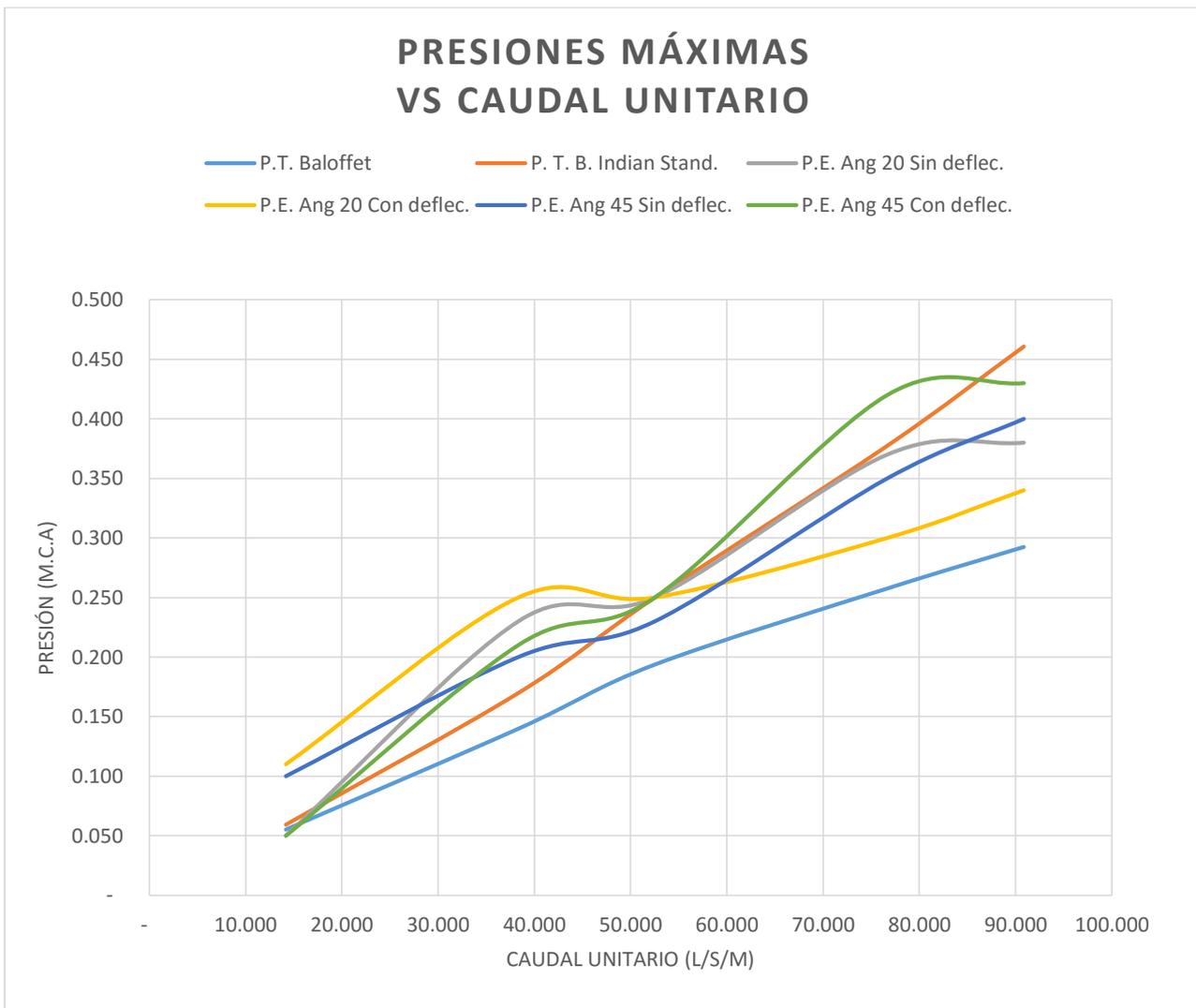


Figura 9.20
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.2.2. RADIO IGUAL A 10cm

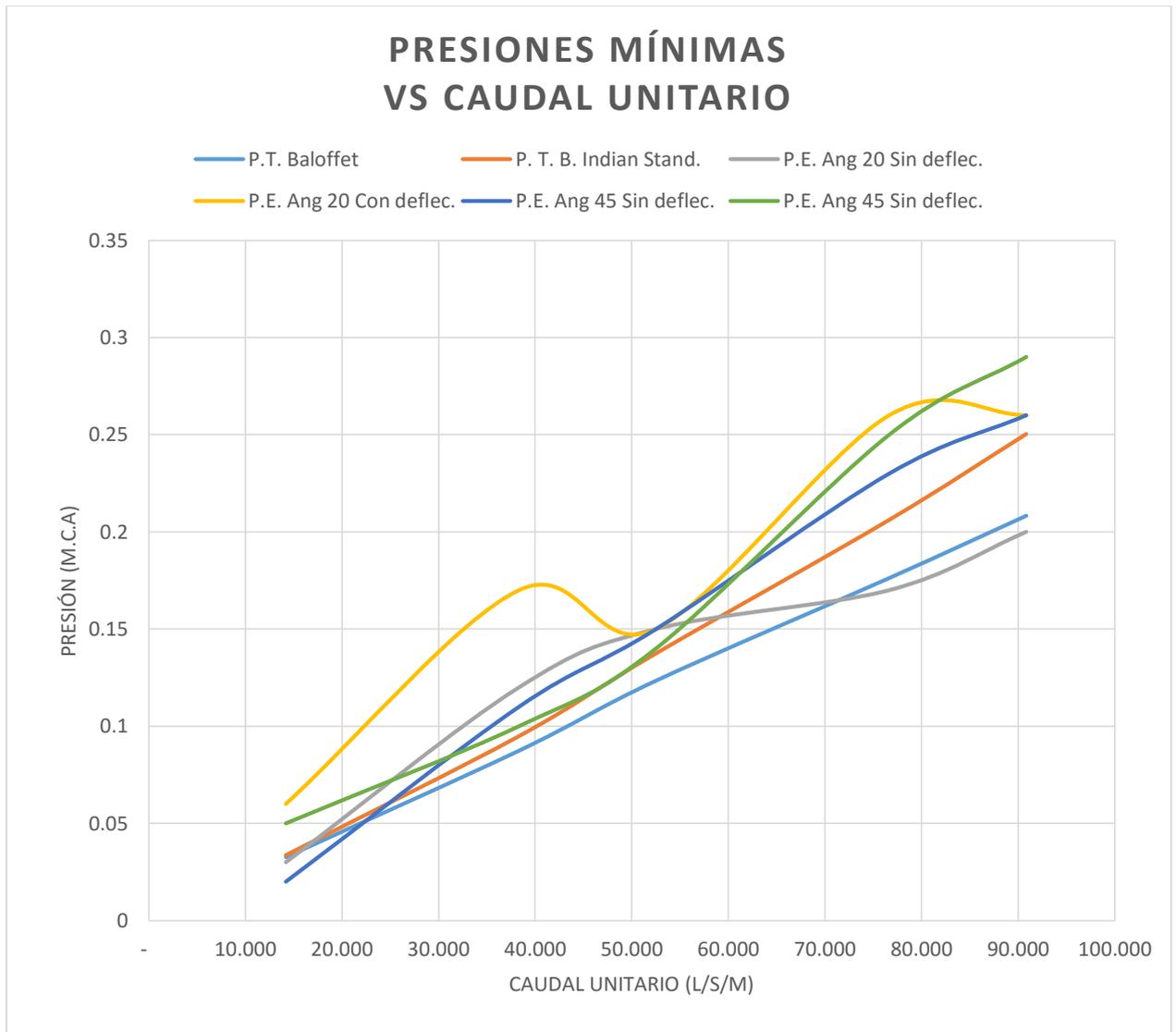


Figura 9.21
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

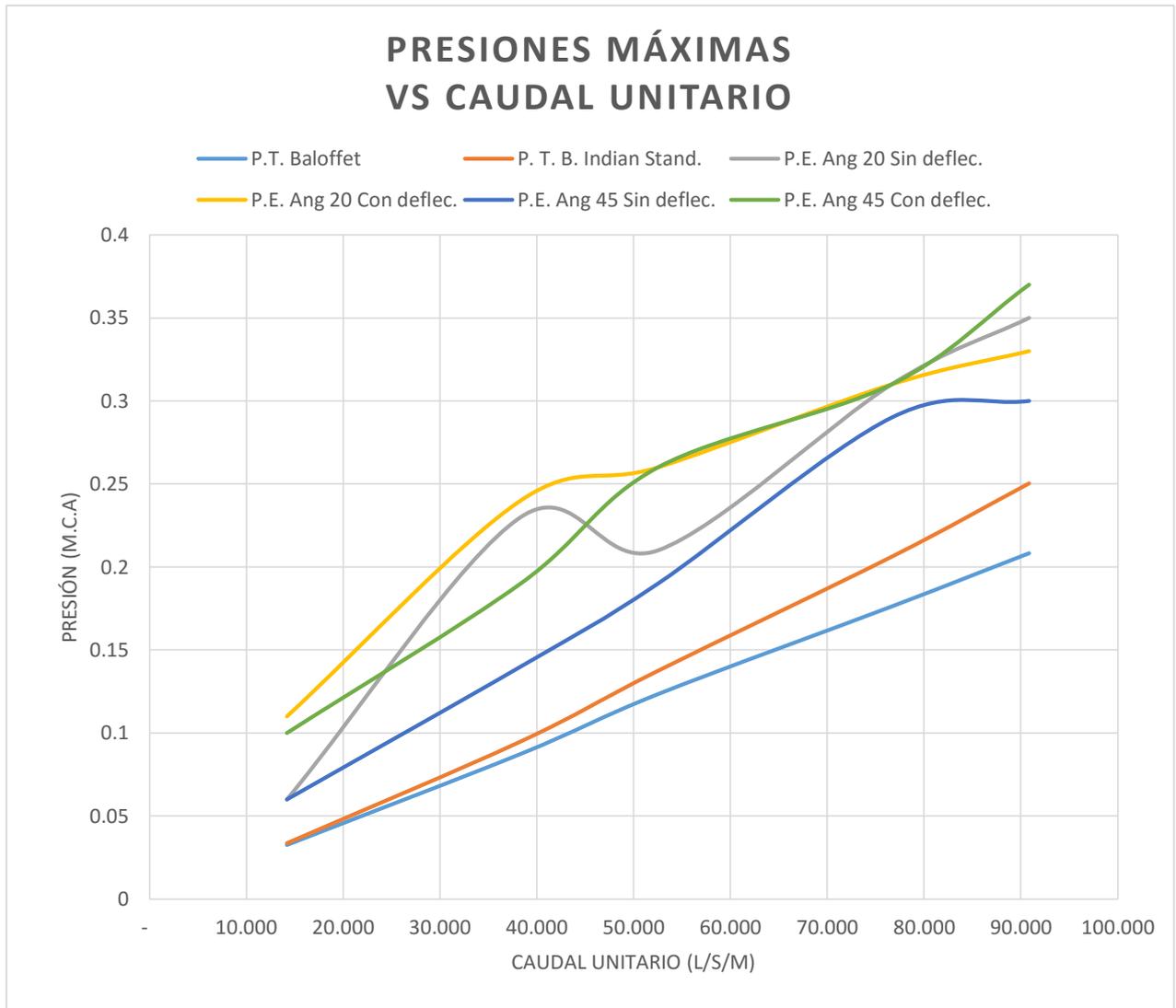


Figura 9.22
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.2.3. RADIO IGUAL A 15cm

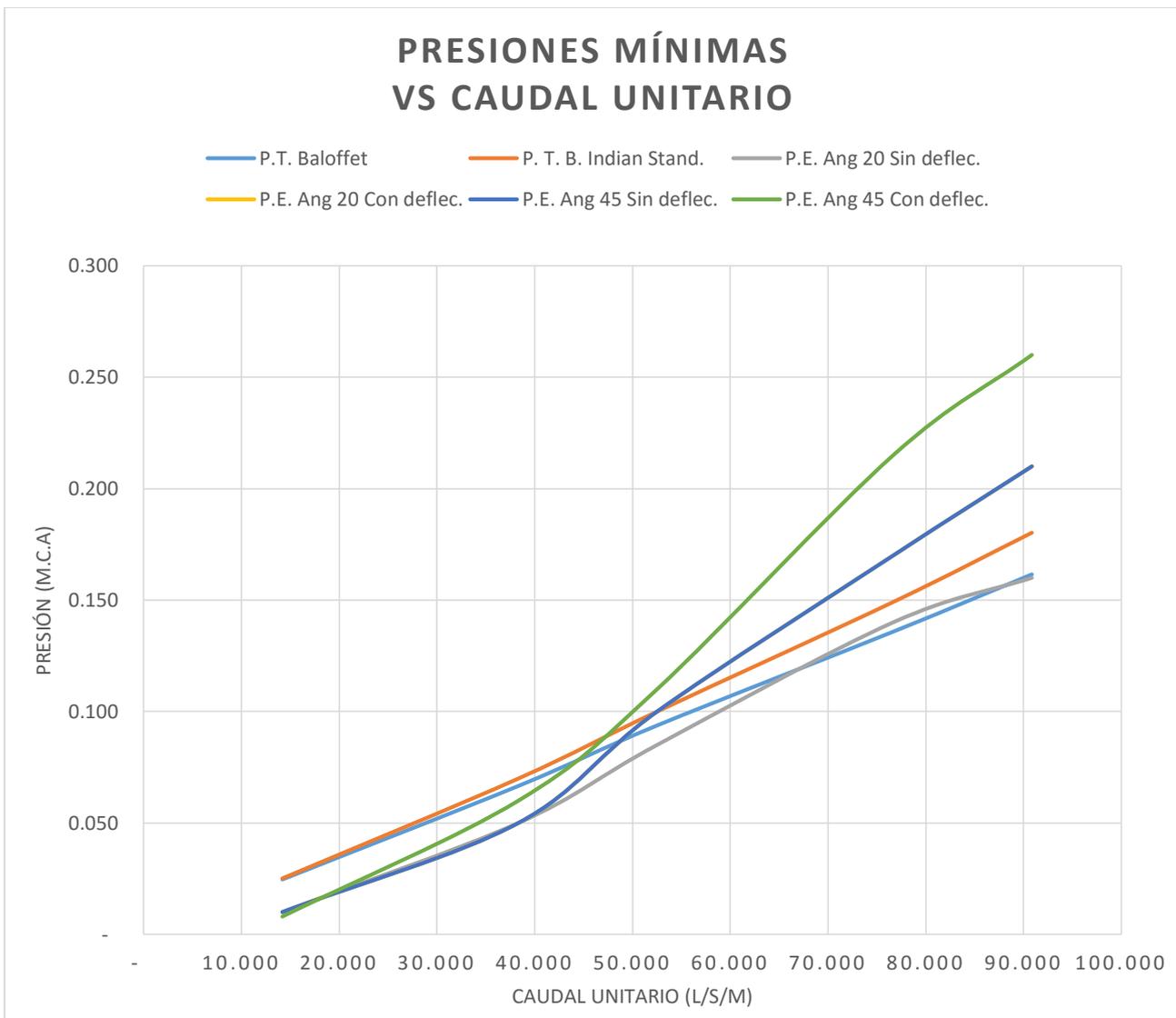


Figura 9.23
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

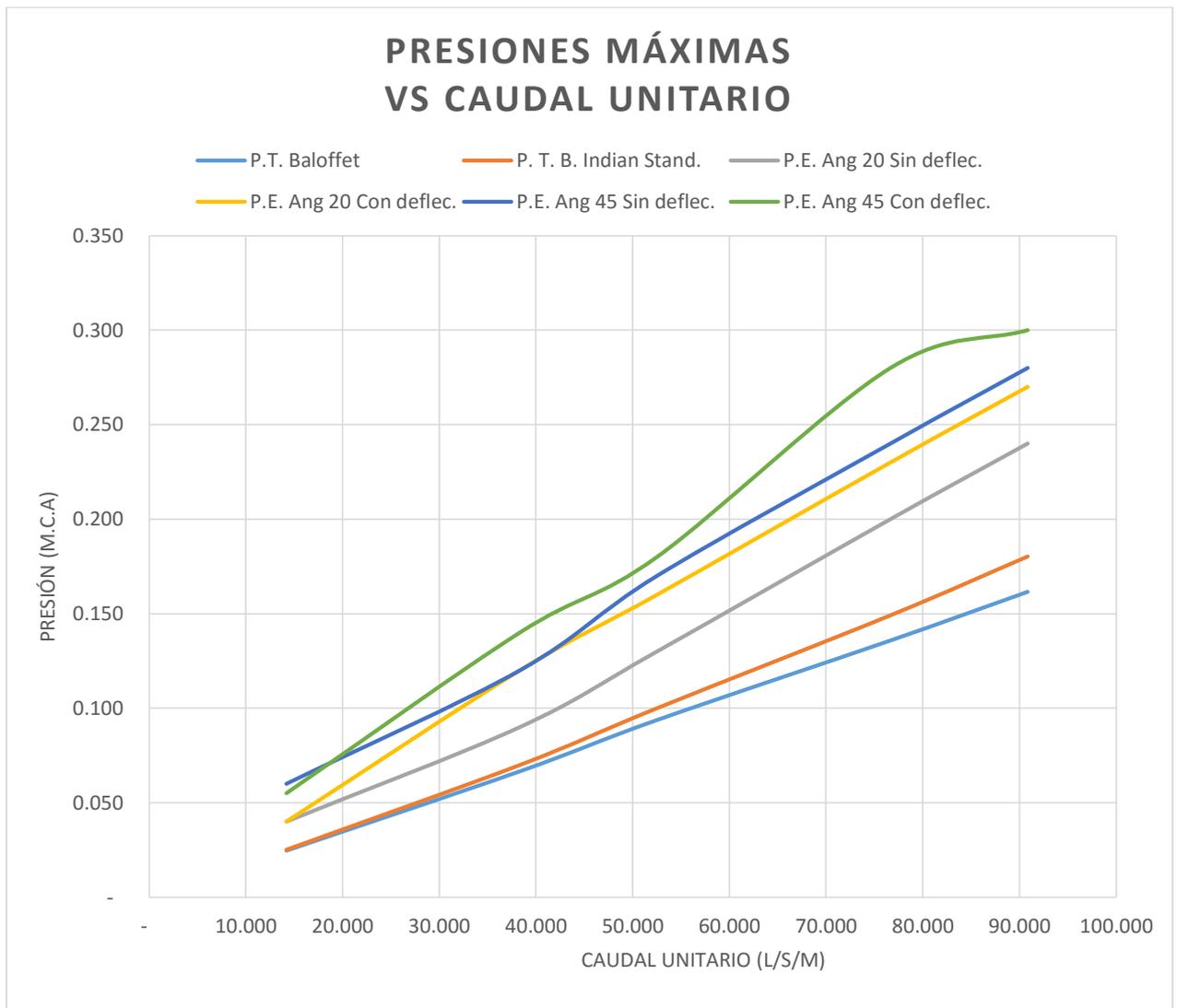


Figura 9.24
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.3. COMPARACION DE LAS ALTURAS Y LONGITUDES MÁXIMAS ALCANZADAS DEL MODELAMIENTO

9.3.1. RADIO IGUAL A 15.00 CM

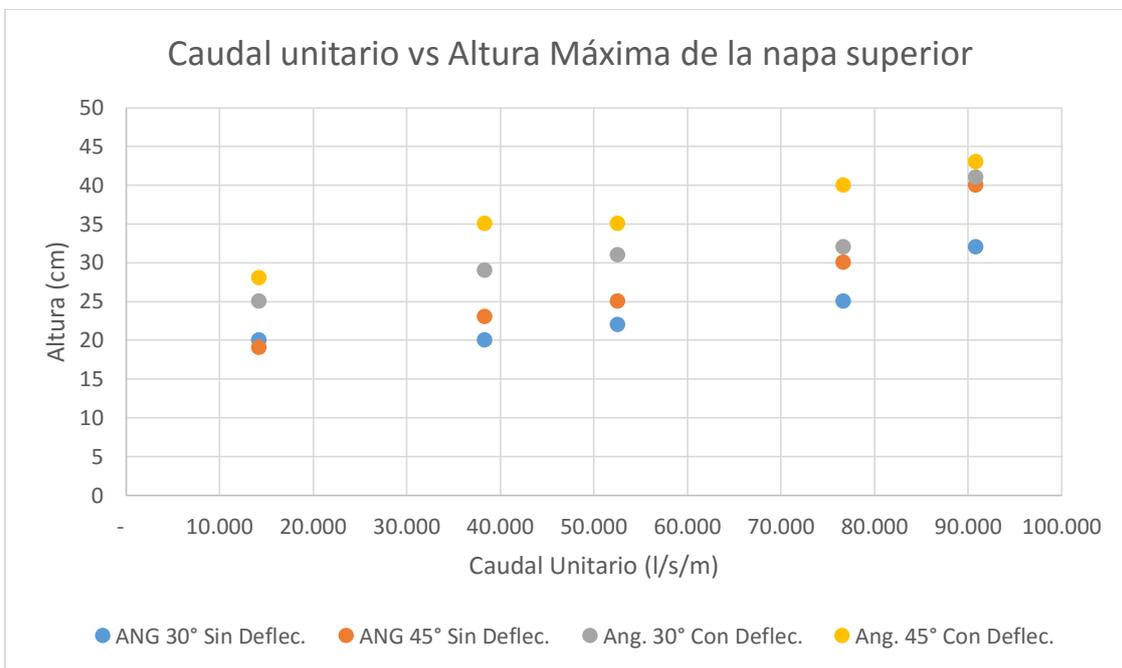


Figura 9.25
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

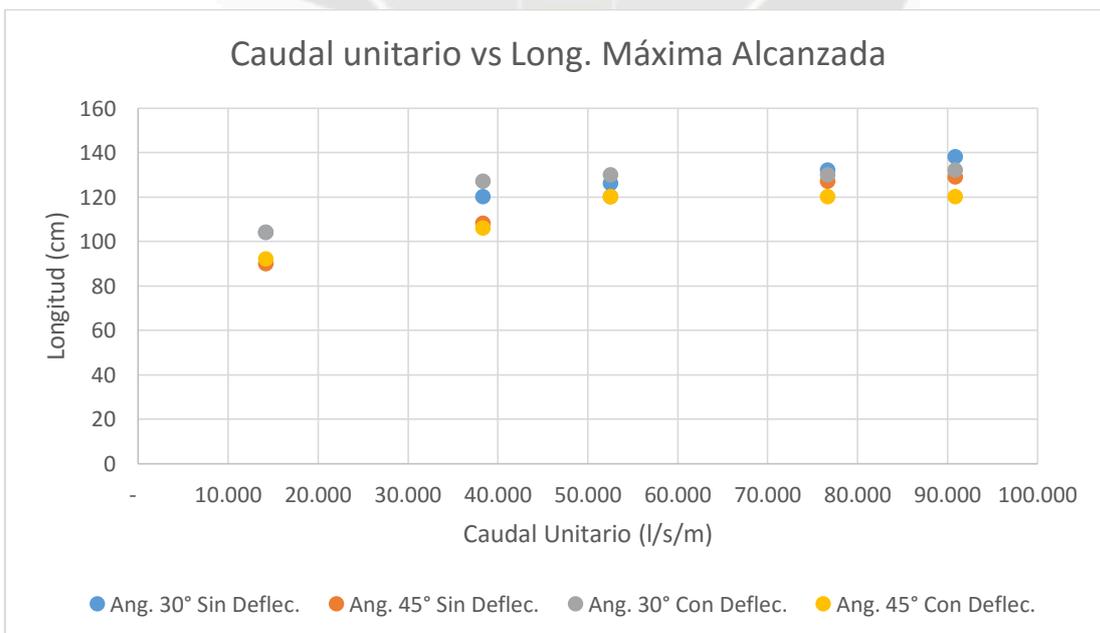


Figura 9.26
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.3.2. RADIO IGUAL A 10.00 CM

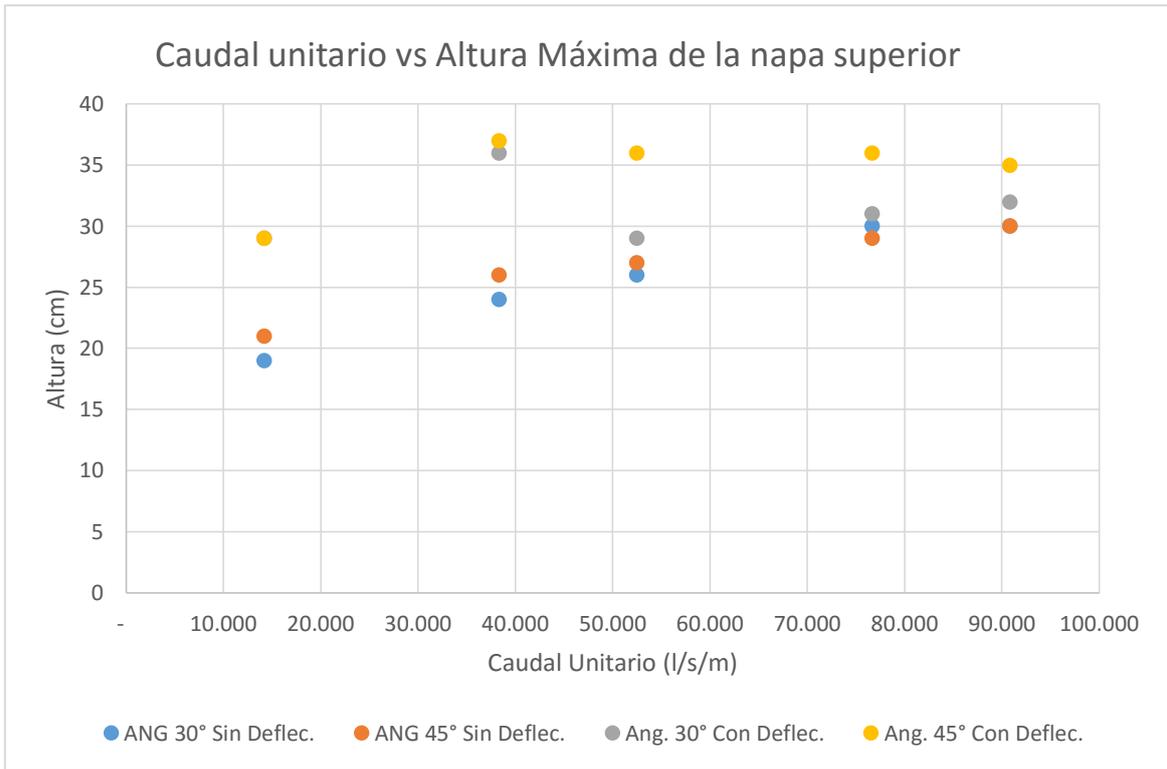


Figura 9.27
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

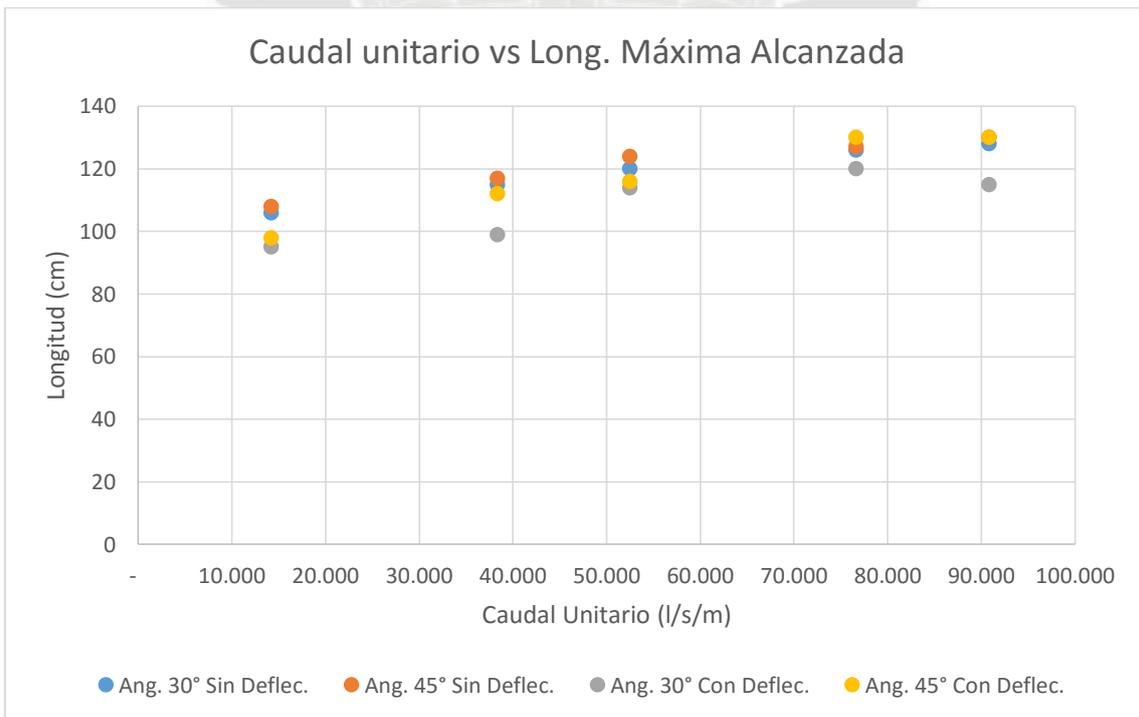


Figura 9.28
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.3.3. RADIO IGUAL A 5.00 CM

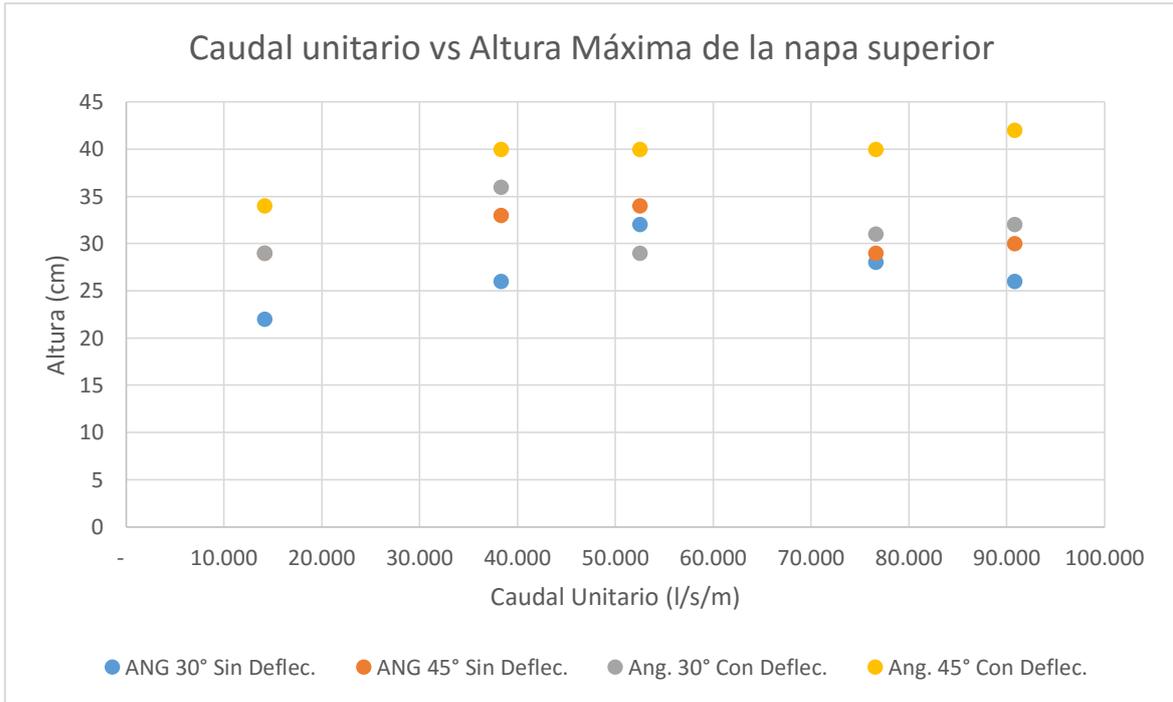


Figura 9.29
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

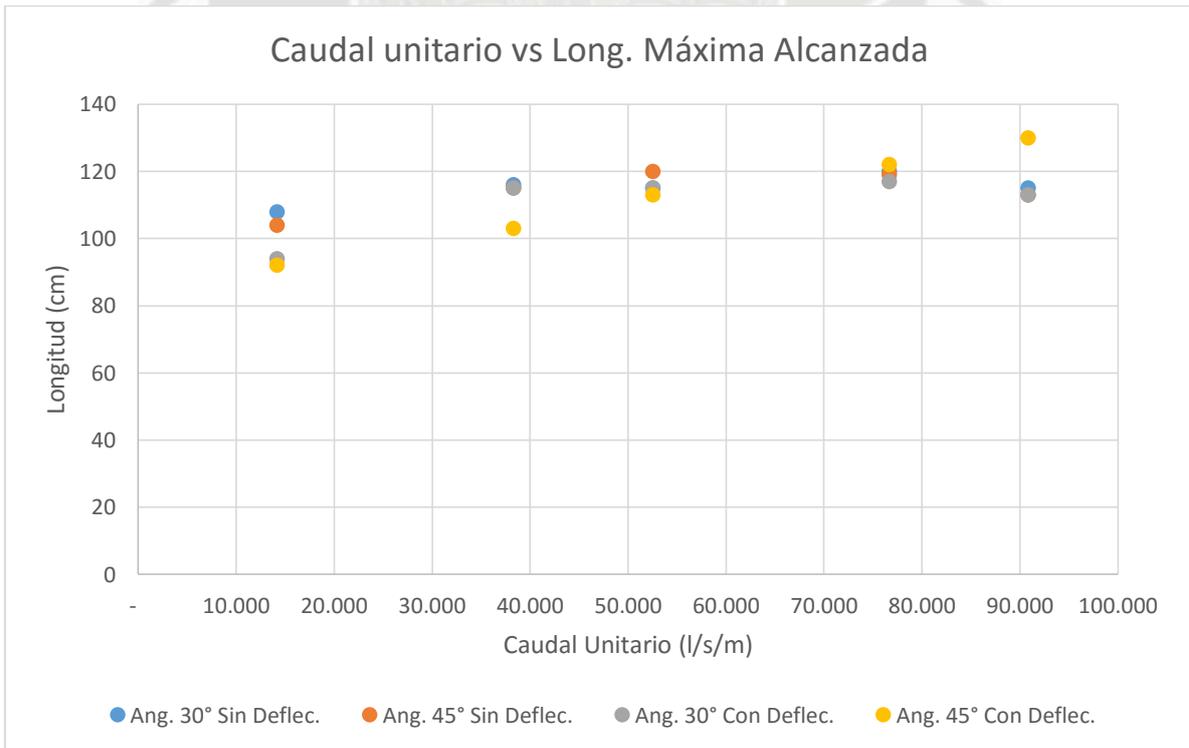


Figura 9.30
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4. COMPARACION DE LAS ALTURAS Y LONGITUDES MÁXIMAS ALCANZADAS EXPERIMENTALES Y TEÓRICAS DE LA ECUACIÓN 5.14

9.4.1. RADIO 5.00 CM ANG. 30° SIN DEFLECTORES

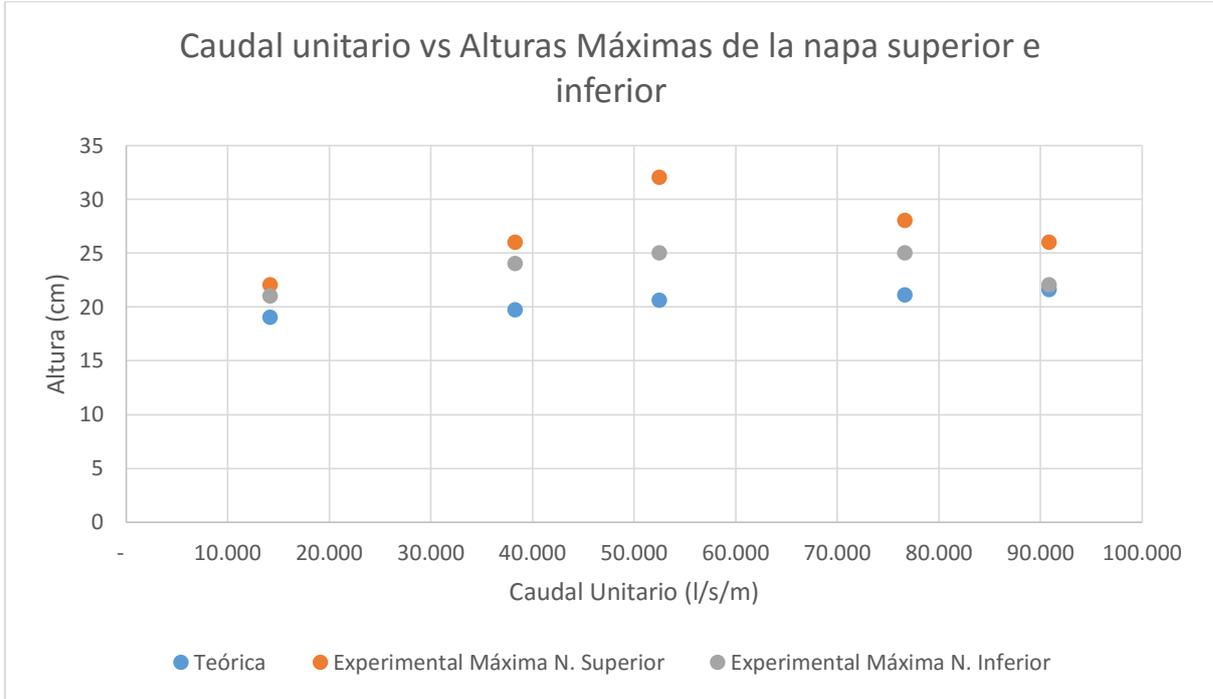


Figura 9.31
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

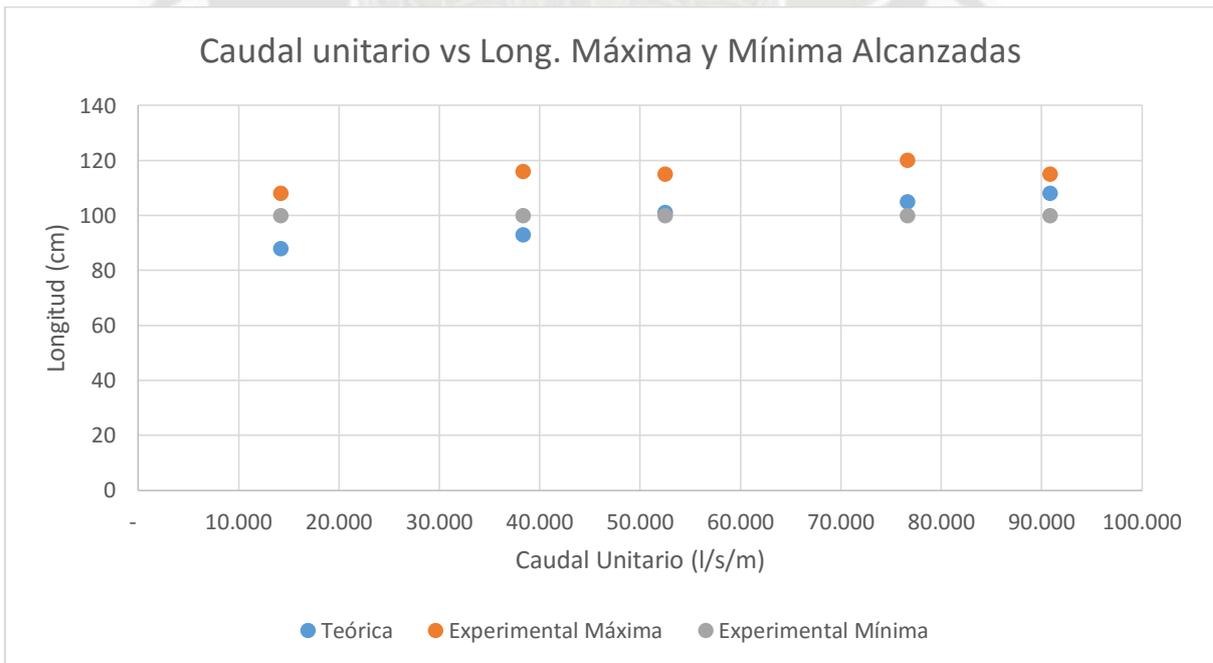


Figura 9.32
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.2. RADIO 5.00 CM ANG. 45° SIN DEFLECTORES

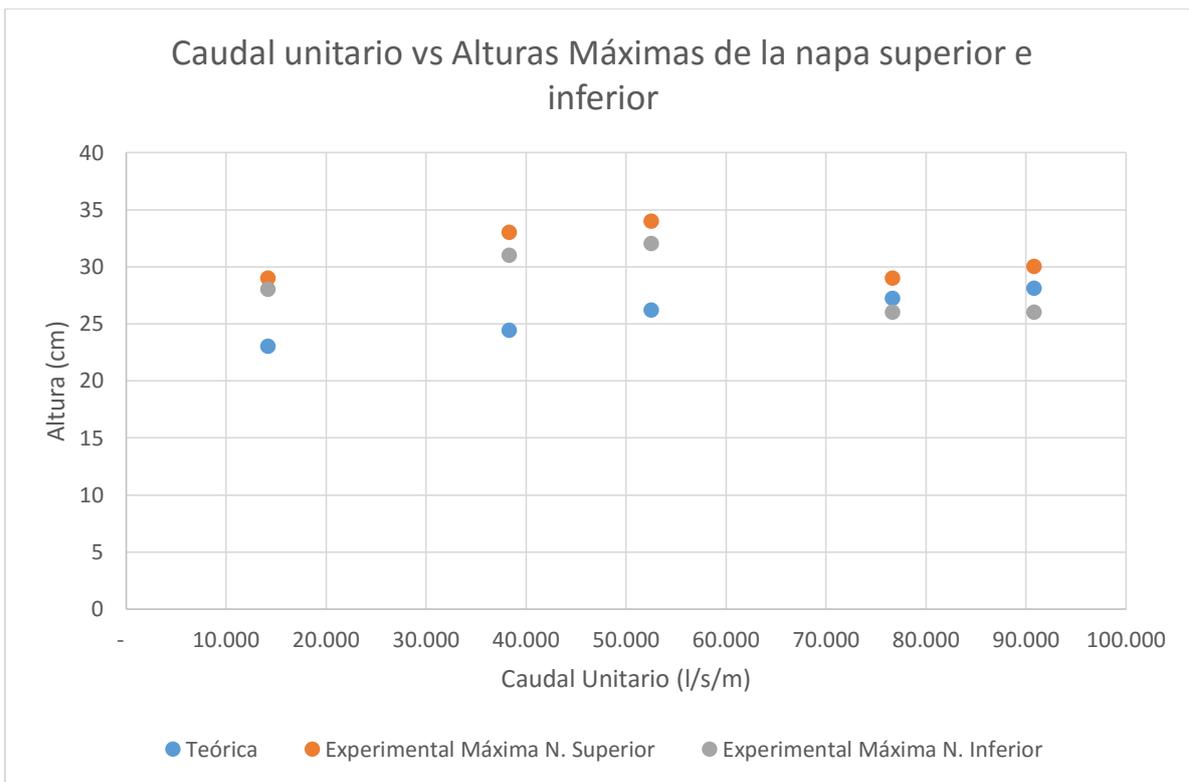


Figura 9.33
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

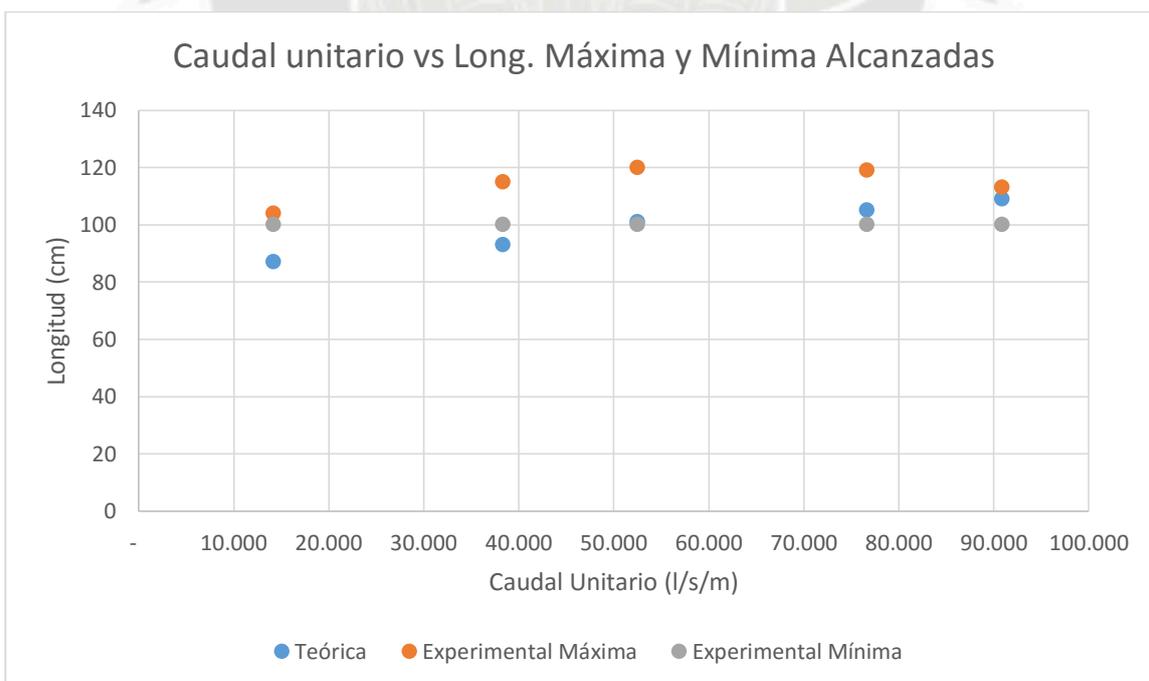


Figura 9.34
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.3. RADIO 5.00 CM ANG. 30° CON DEFLECTORES

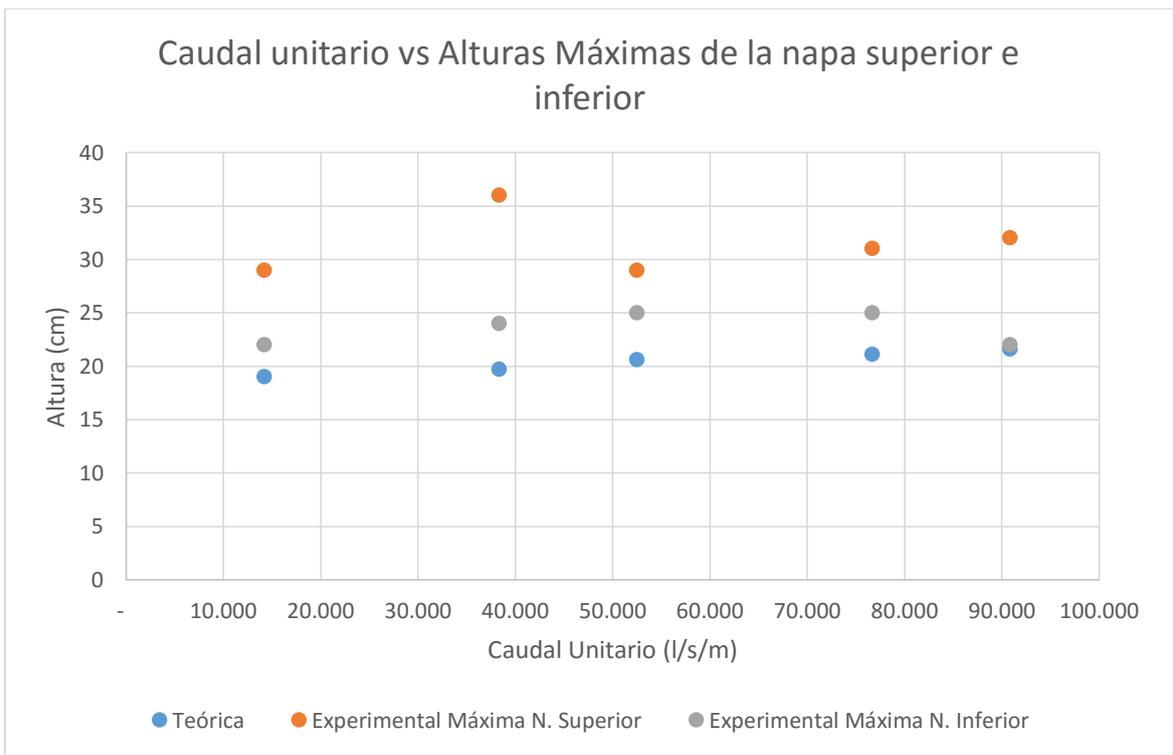


Figura 9.35
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

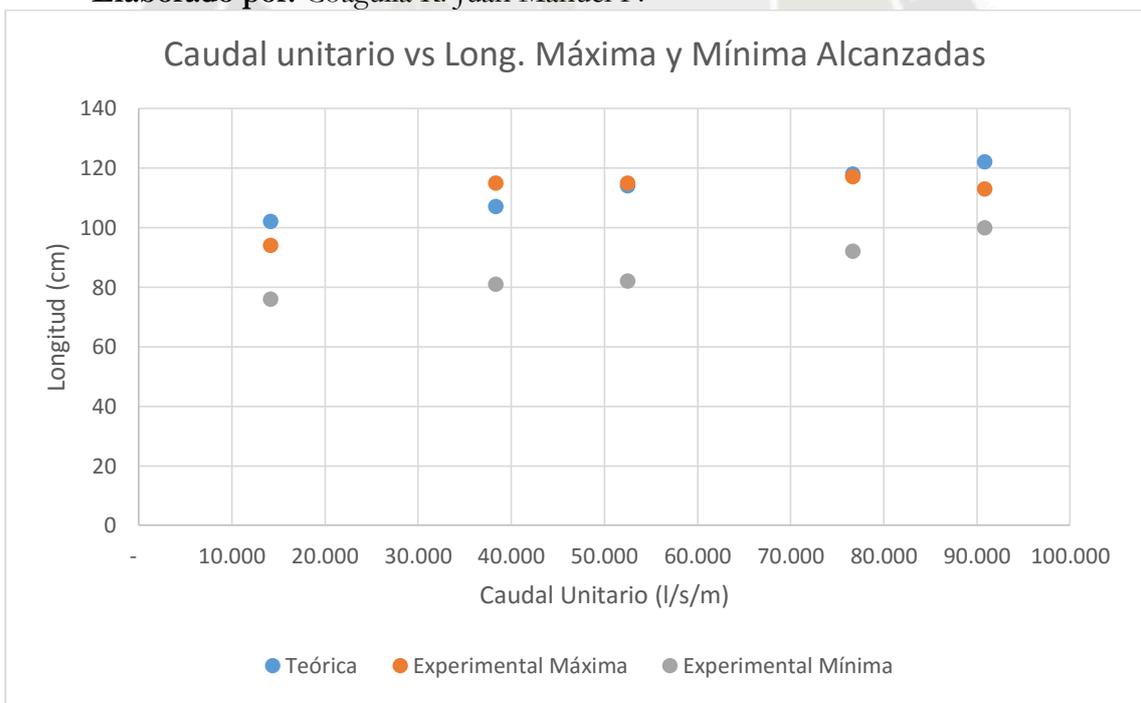


Figura 9.36
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.4. RADIO 5.00 CM ANG. 45° CON DEFLECTORES

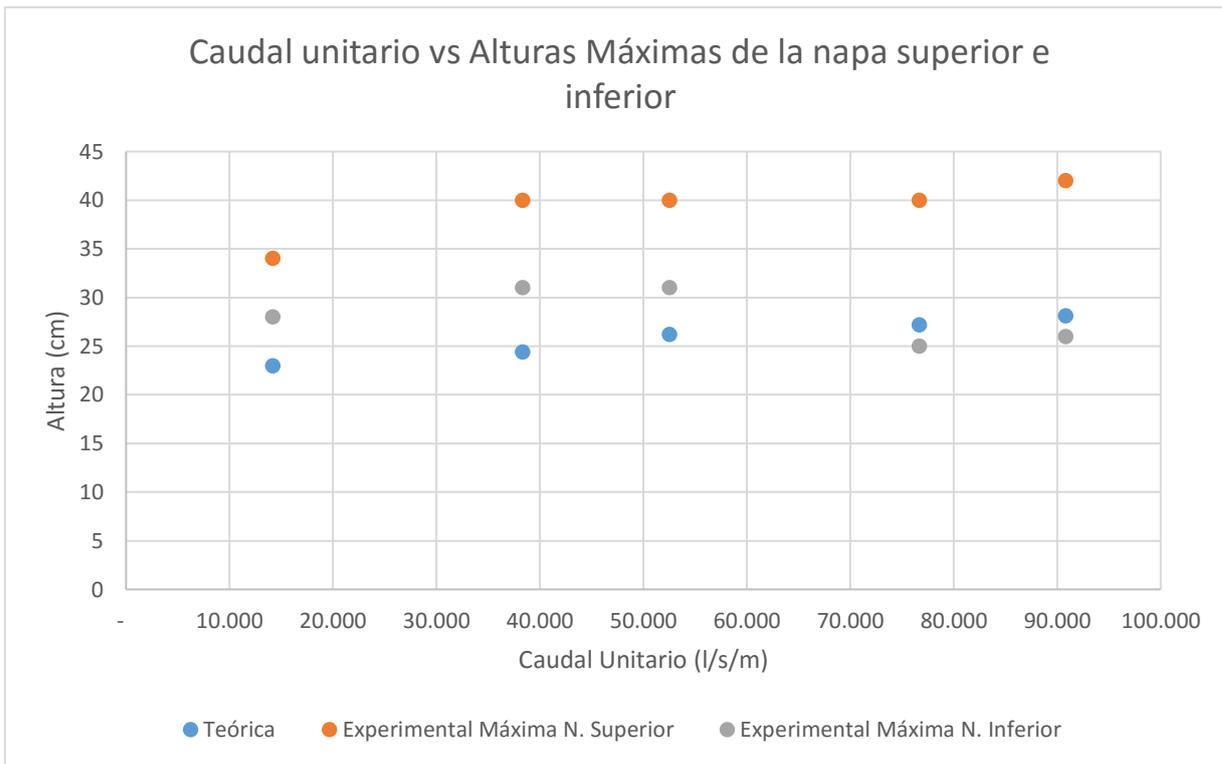


Figura 9.37
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

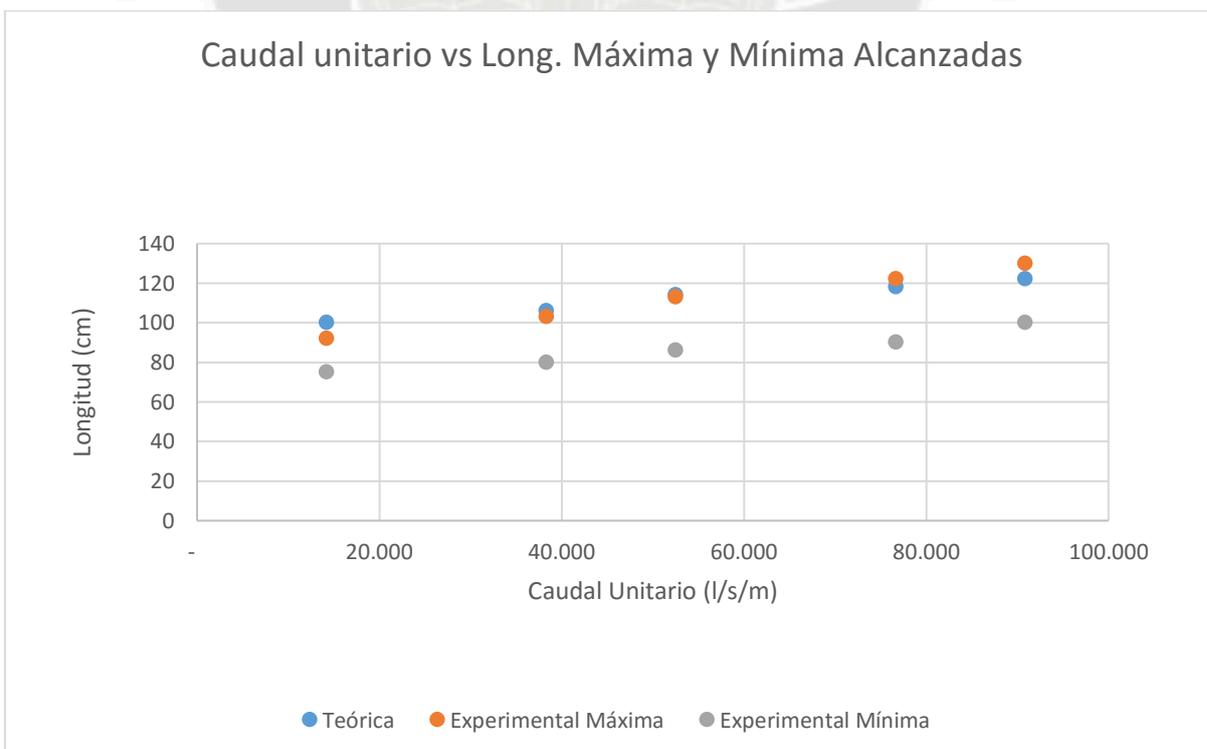


Figura 9.38
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.5. RADIO 10.00 CM ANG. 30° SIN DEFLECTORES

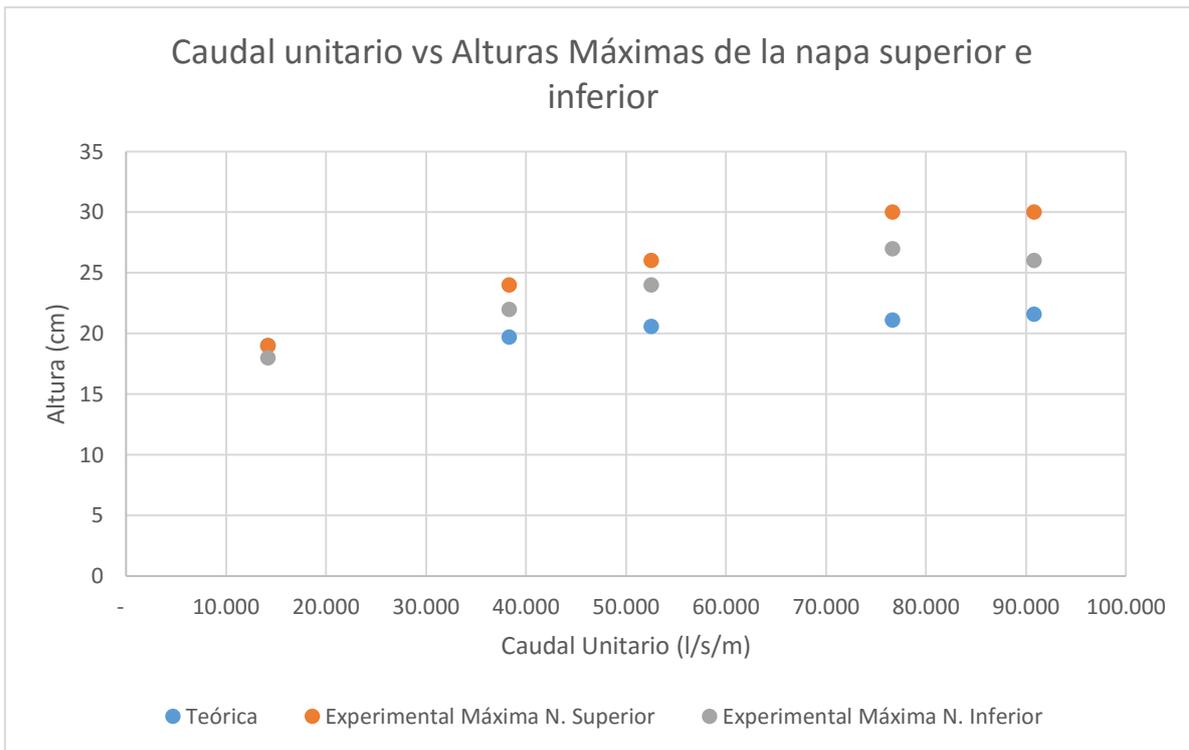


Figura 9.39
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

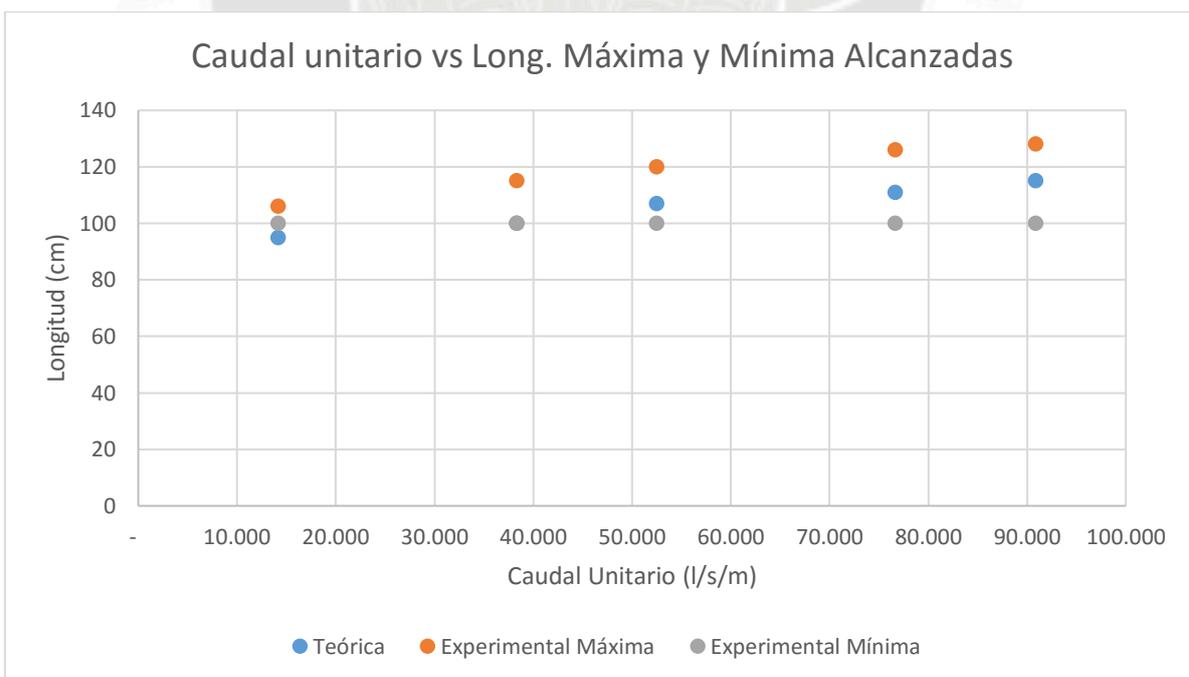


Figura 9.40
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.6. RADIO 10.00 CM ANG. 45° SIN DEFLECTORES

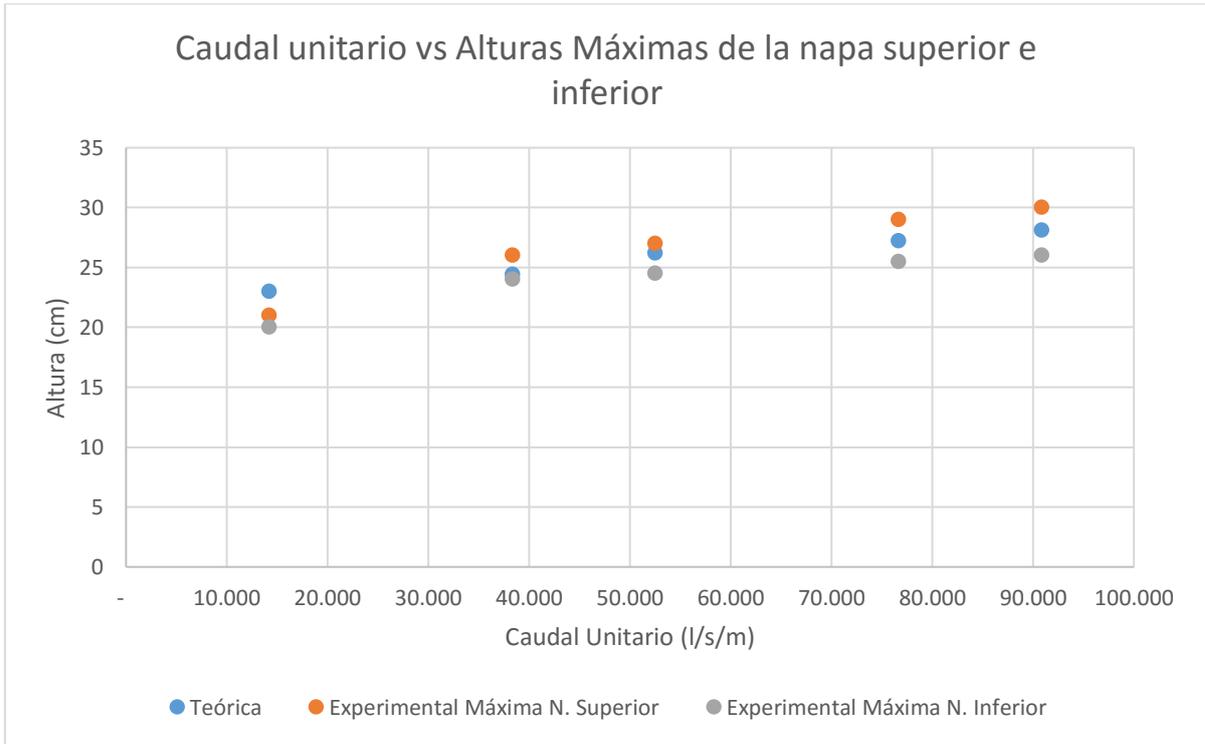


Figura 9.41
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

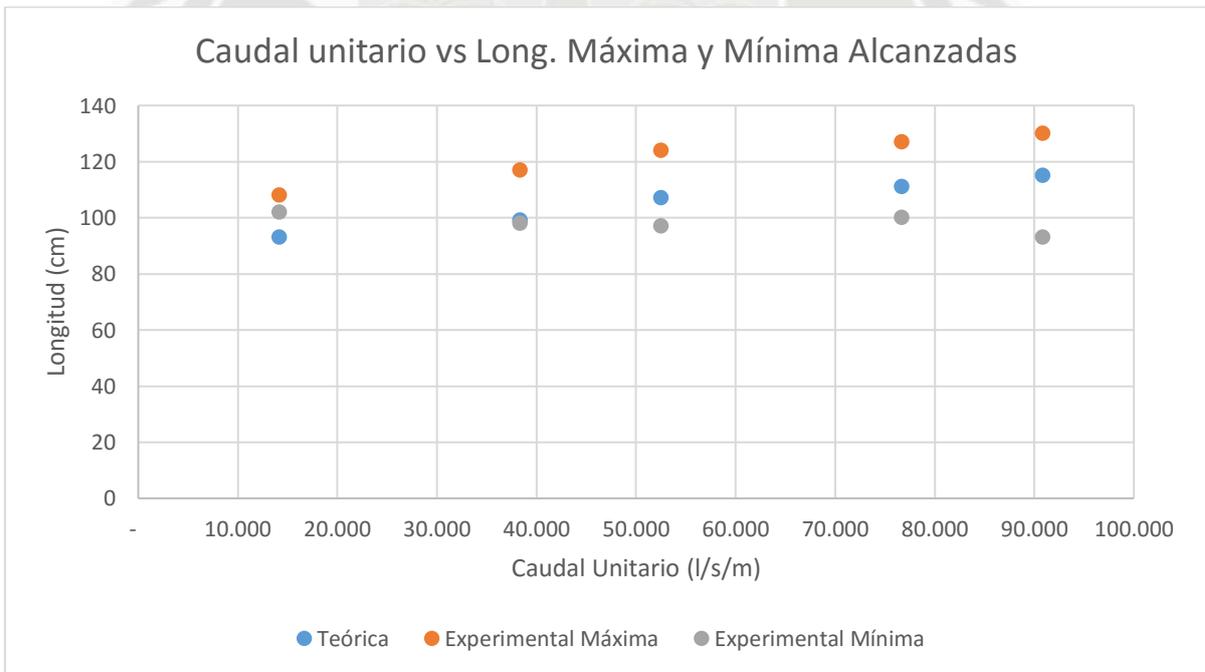


Figura 9.42
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.7. RADIO 10.00 CM ANG. 30° CON DEFLECTORES

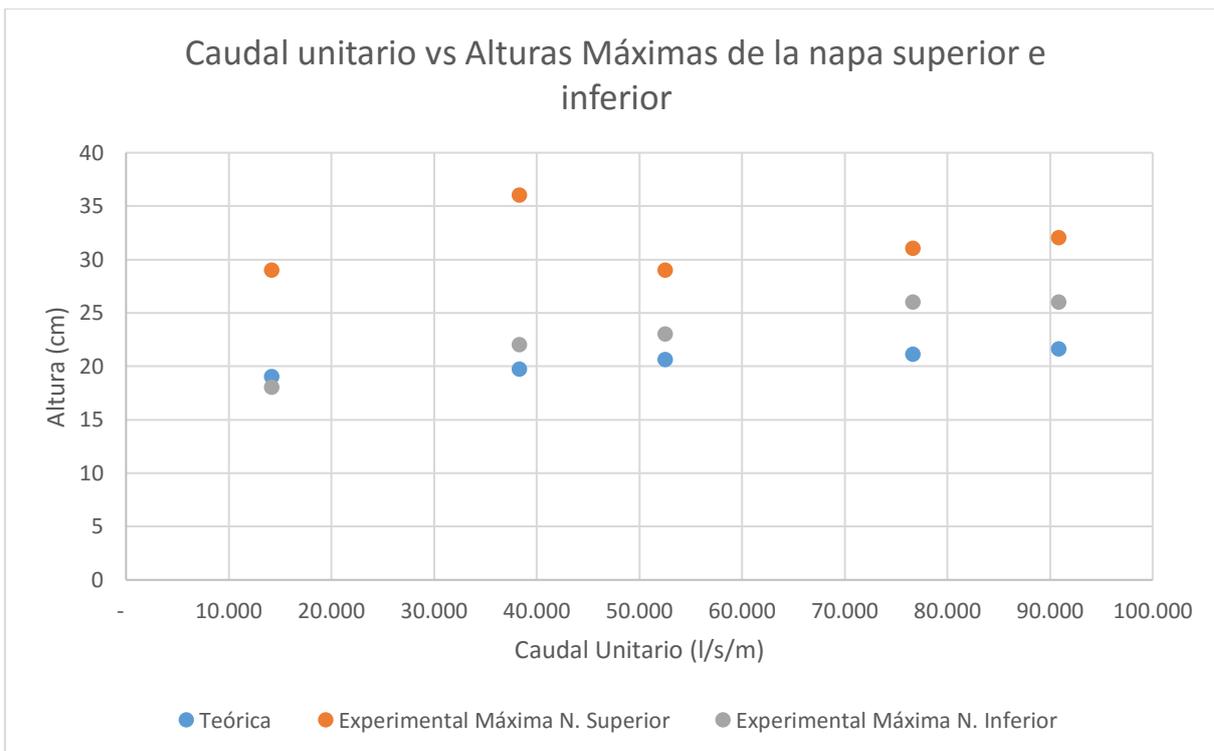


Figura 9.43
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

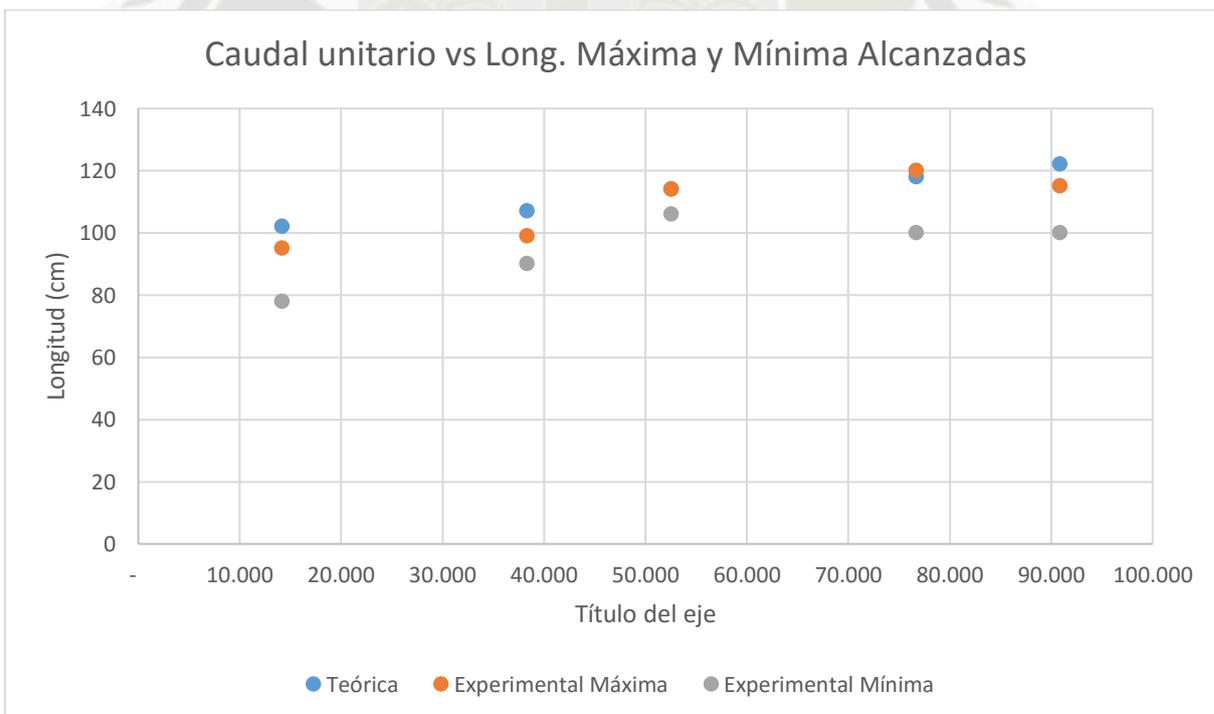


Figura 9.44
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.8. RADIO 10.00 CM ANG. 45° COM DEFLECTORES

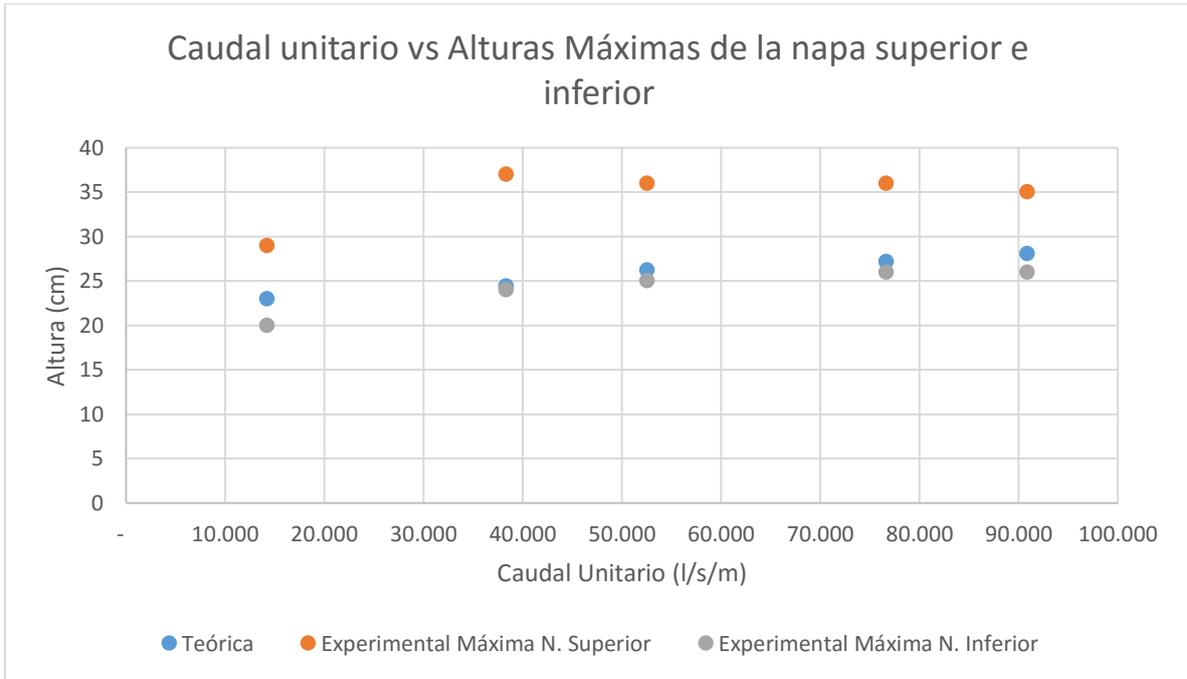


Figura 9.45
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

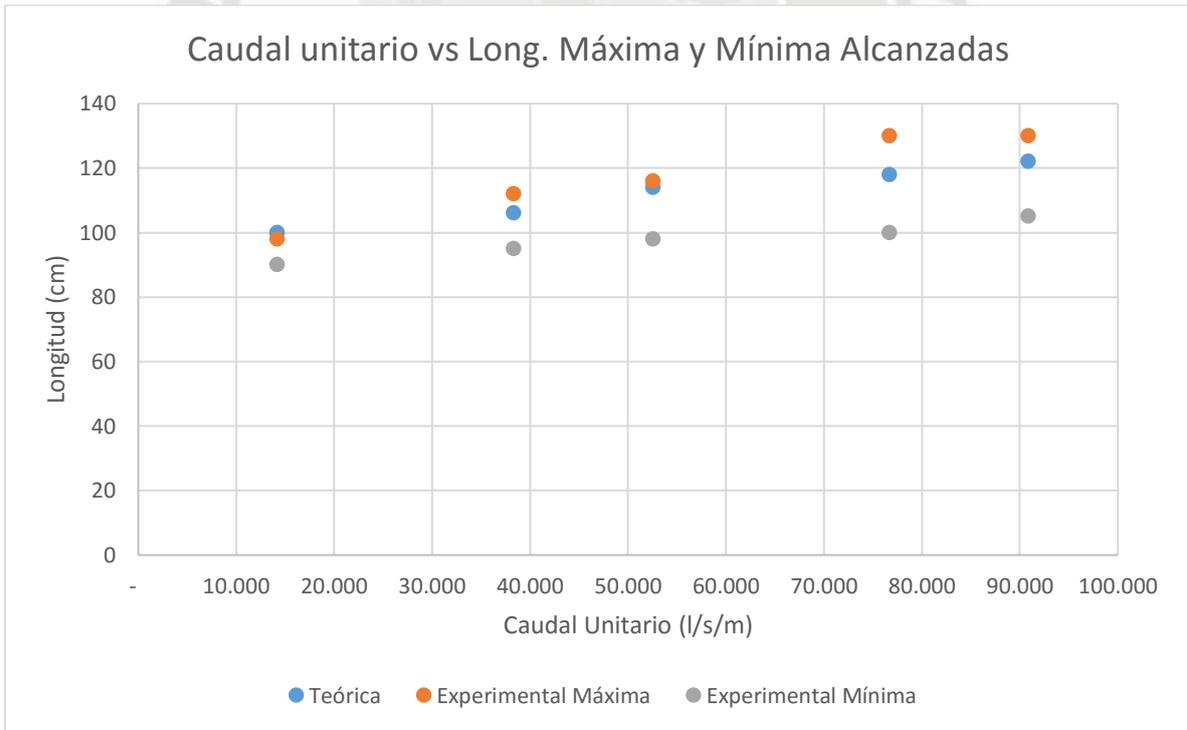


Figura 9.46
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.9. RADIO 15.00 CM ANG. 30° SIN DEFLECTORES

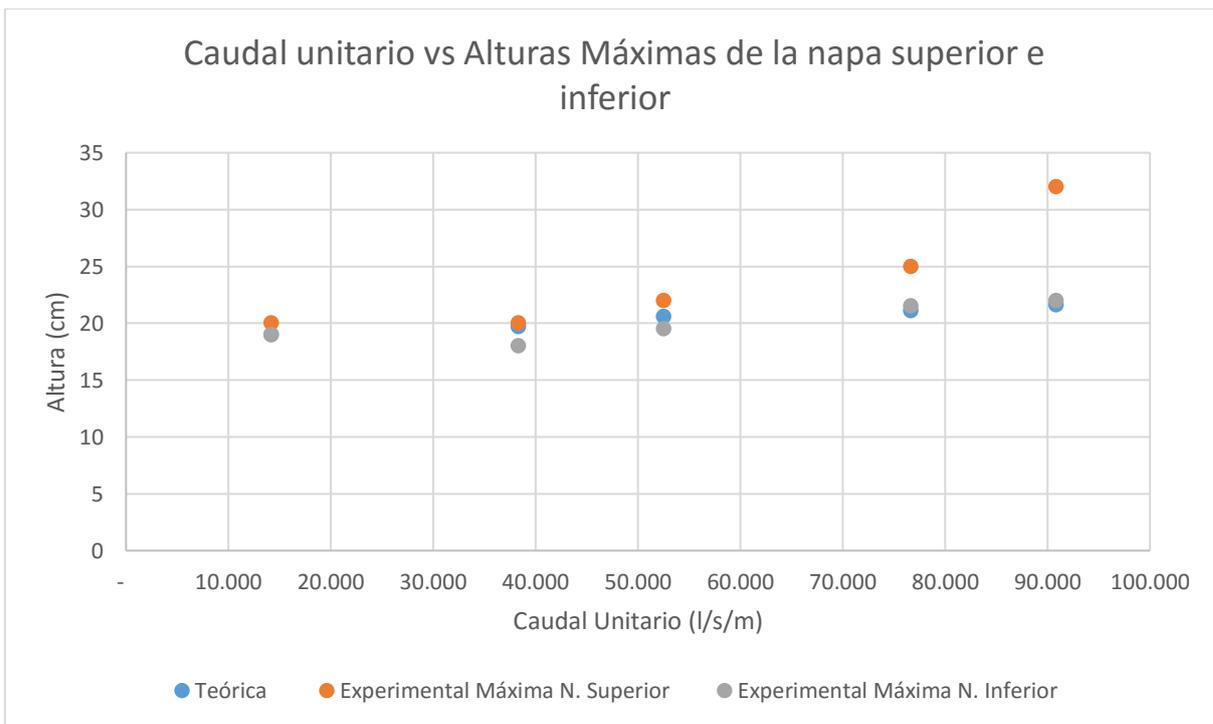


Figura 9.47
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

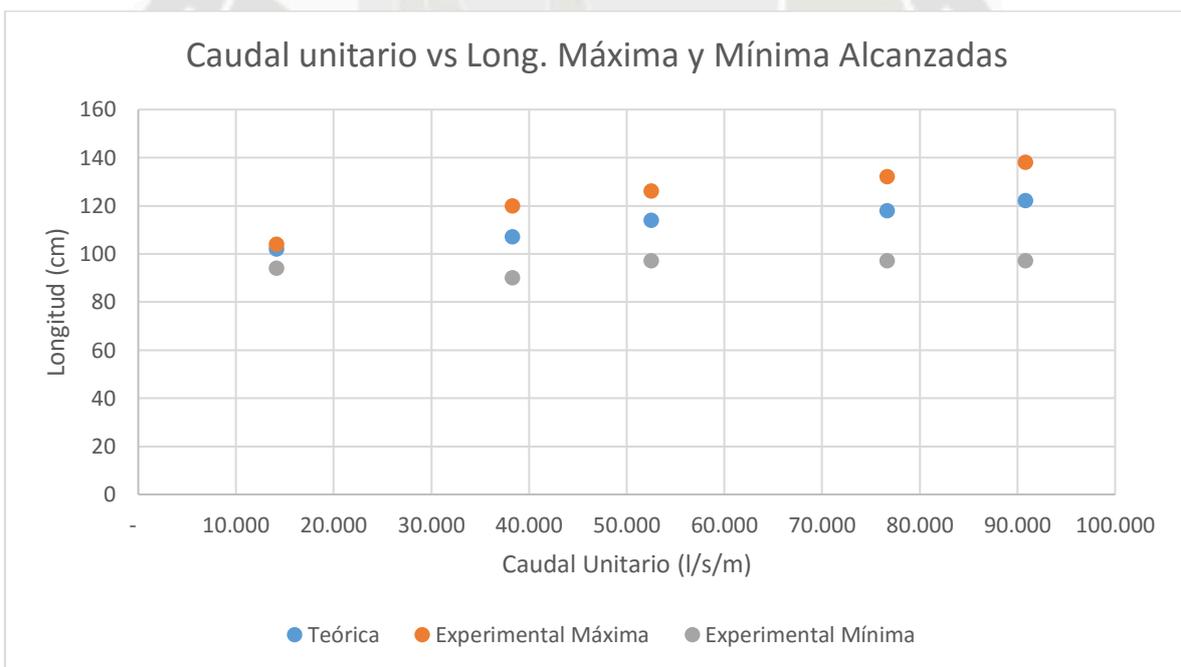


Figura 9.48
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.10. RADIO 15.00 CM ANG. 45° SIN DEFLECTORES

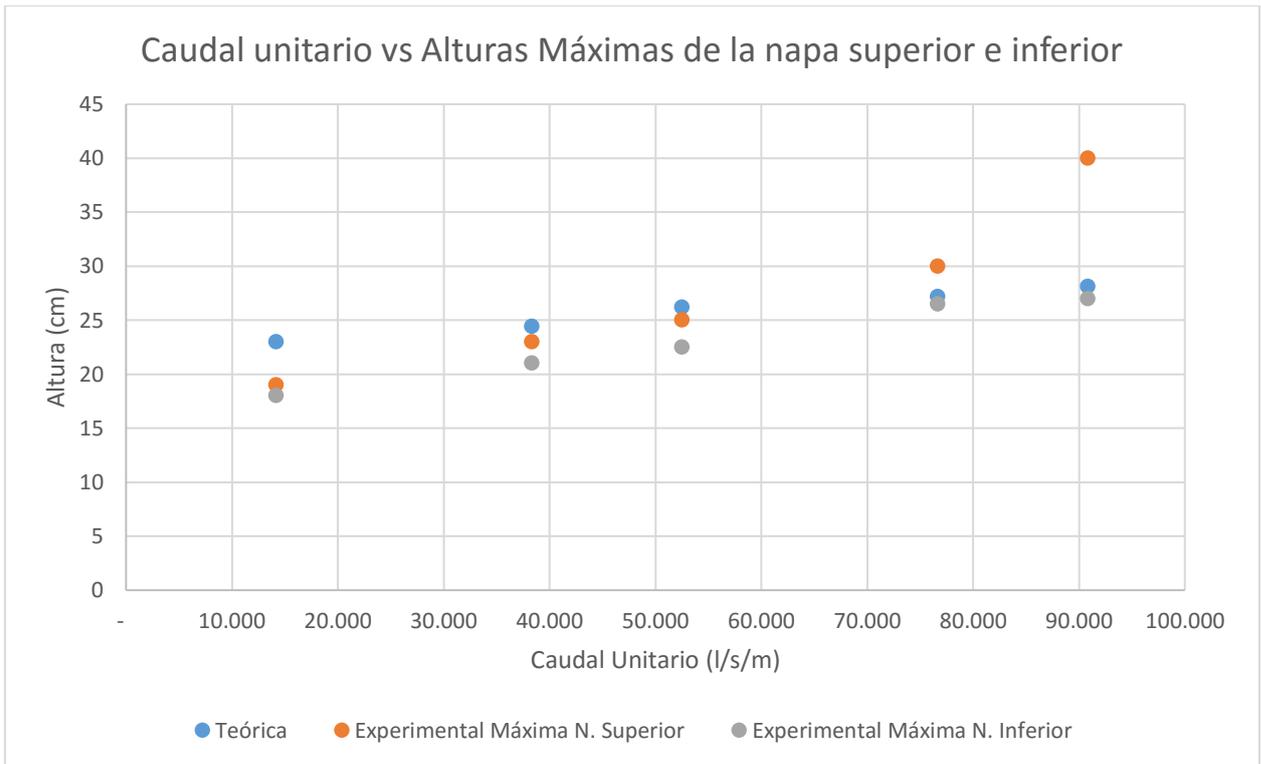


Figura 9.49
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

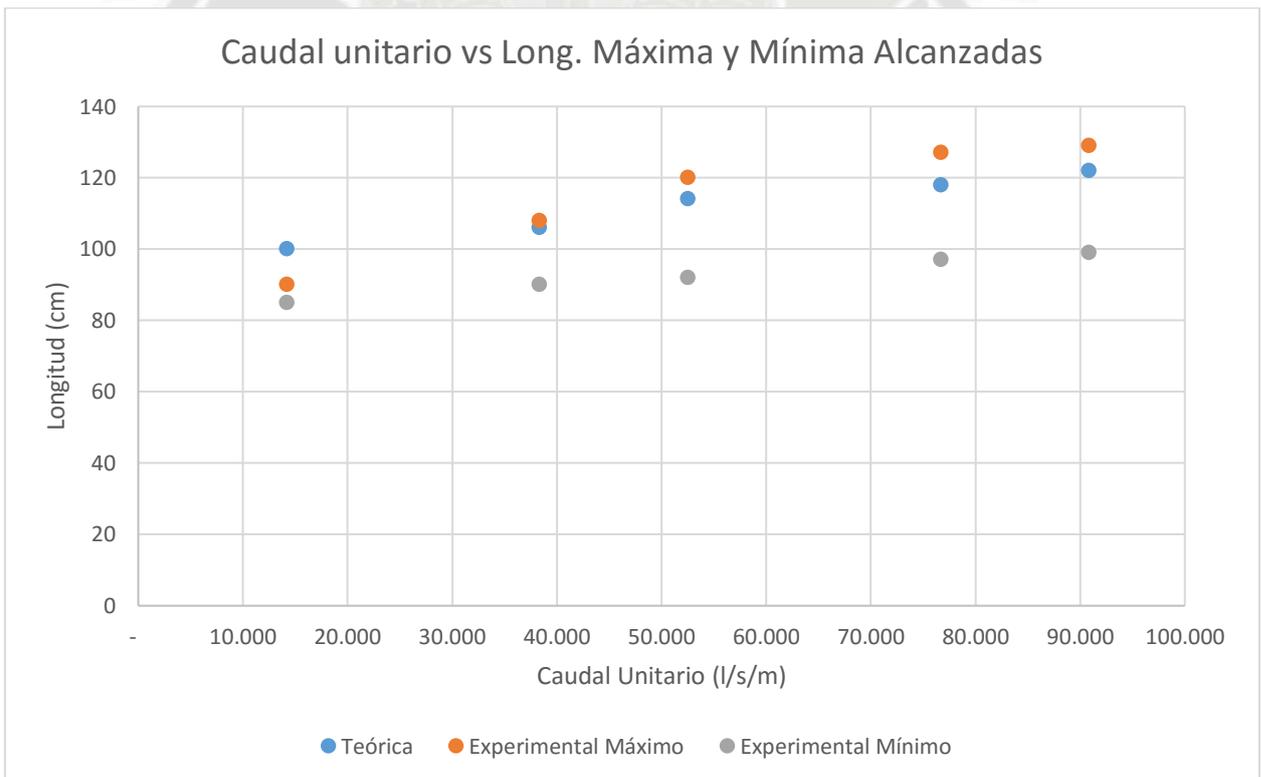


Figura 9.50
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.11. RADIO 15.00 CM ANG. 30° CON DEFLECTORES

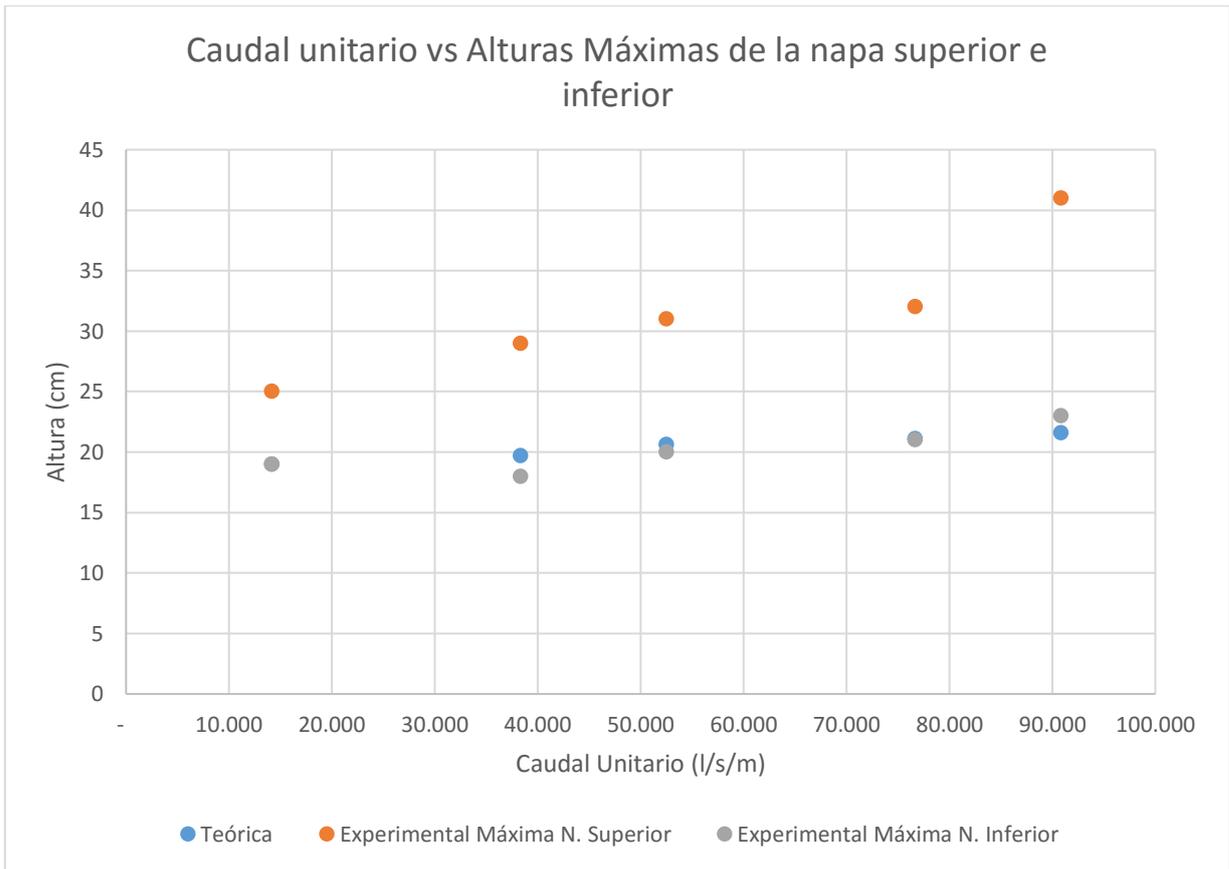


Figura 9.51
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

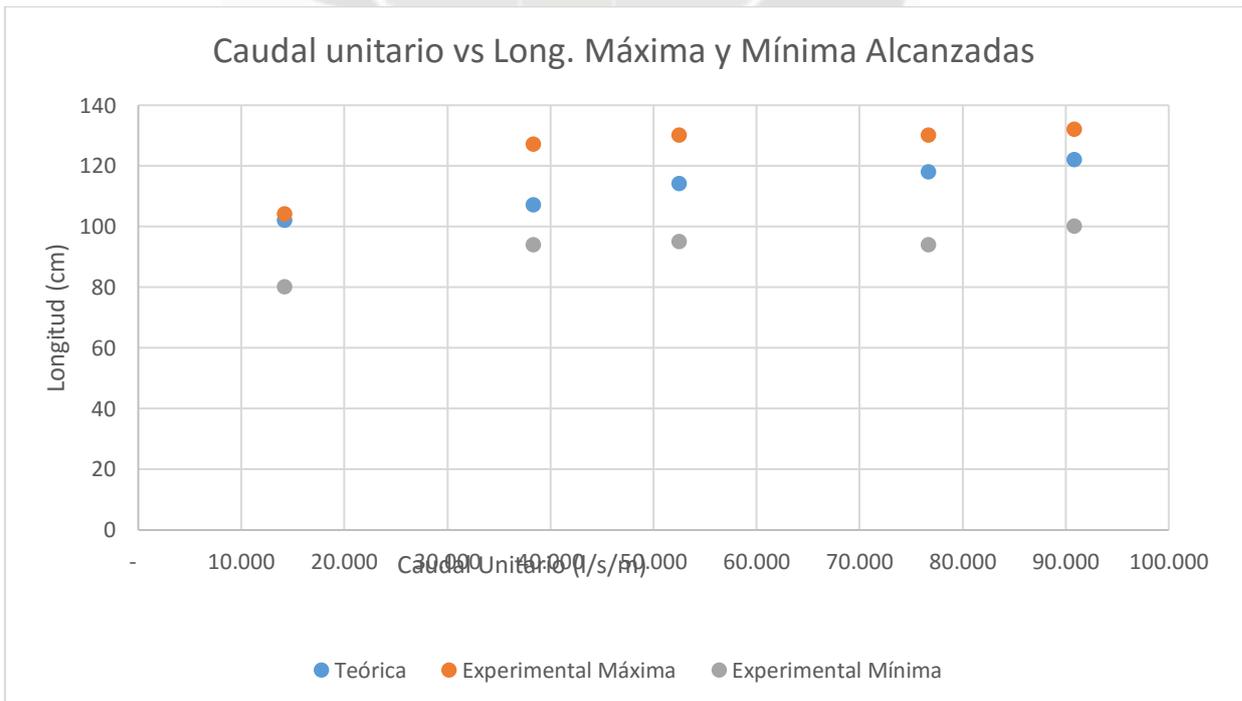


Figura 9.52
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.4.12. RADIO 15.00 CM ANG. 45° CON DEFLECTORES

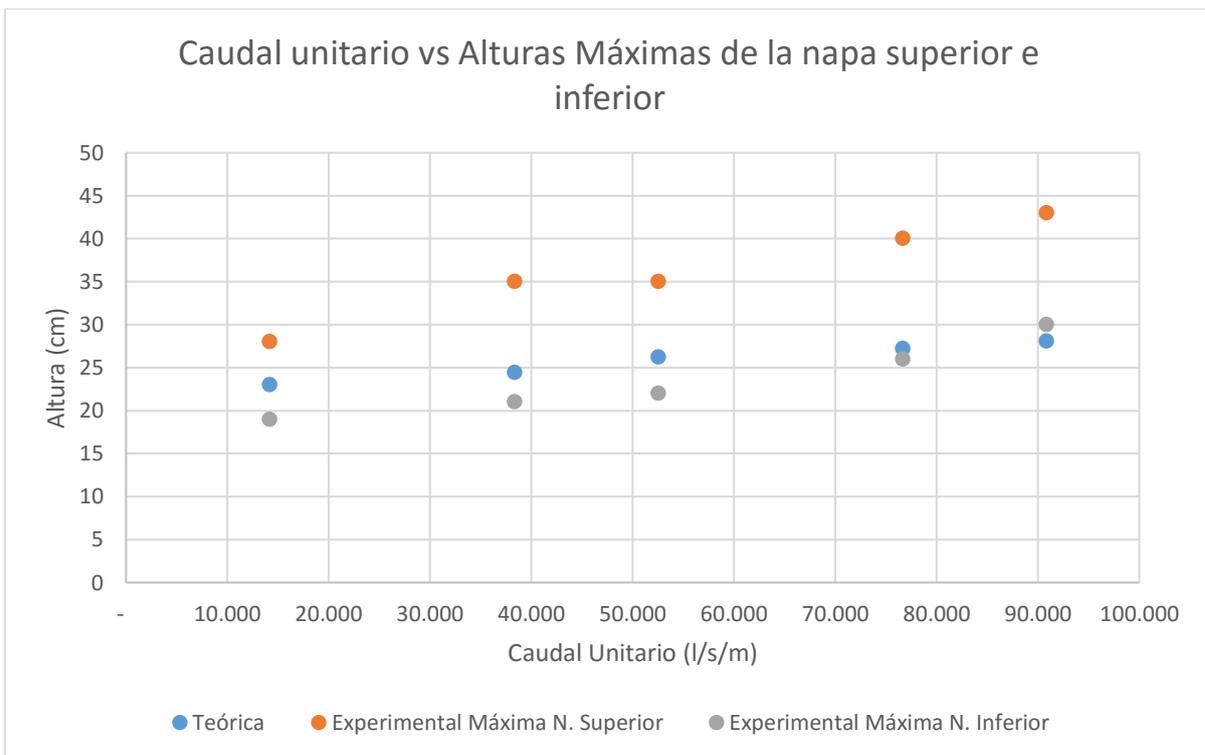


Figura 9.53
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.

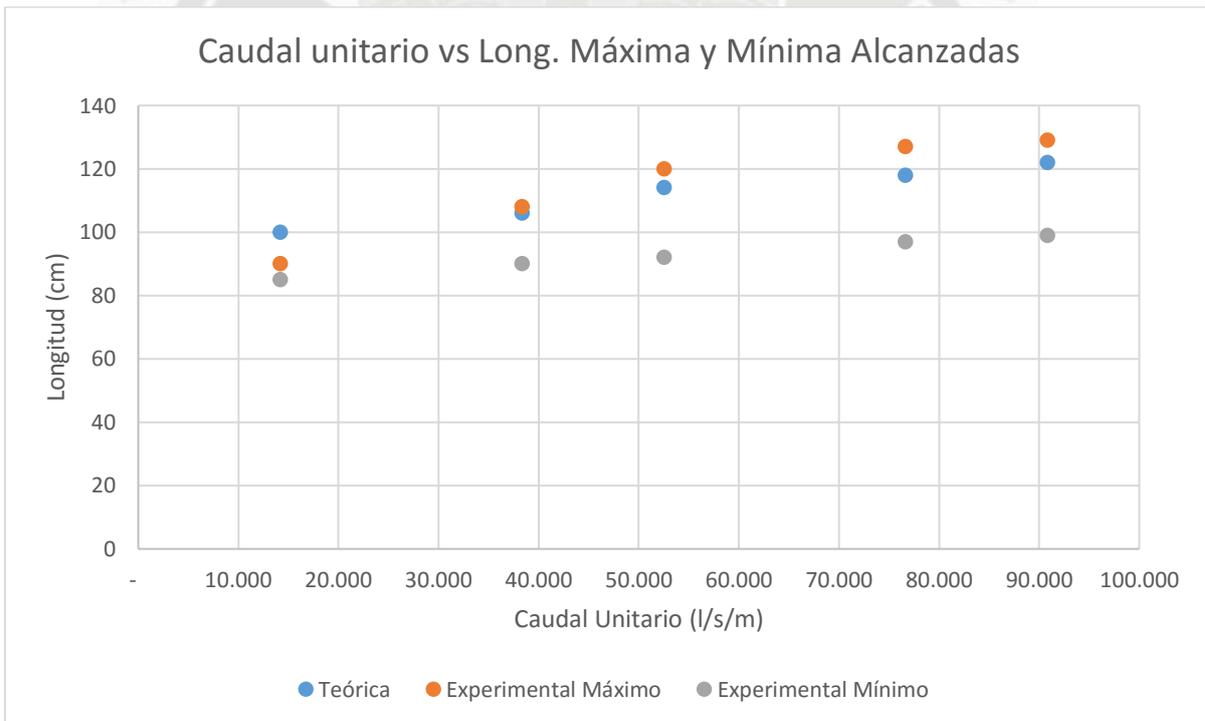


Figura 9.54
Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



9.5. COMPARACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON RESPECTO A LA VARIACIÓN DE TODOS LOS PARÁMETROS ESTUDIADOS

		R	5		
		Ángulo	45		
		Deflectores	SI		
Q	y3p(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada	
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%	
14.20	3.50	44	3.97	91%	
38.33	6.00	48	7.17	85%	
52.53	7.00	50	8.61	83%	
76.67	9.00	52.5	11.08	79%	
90.87	9.00	53.5	11.92	78%	

Tabla 9.18

		R	5		
		Ángulo	30		
		Deflectores	SI		
Q	y3p(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada	
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%	
14.20	3.50	44	3.97	91%	
38.33	6.00	48	7.17	85%	
52.53	7.80	50	9.10	82%	
76.67	8.00	52.5	10.63	80%	
90.87	9.00	53.5	11.92	78%	

Tabla 9.19

		R	5		
		Ángulo	45		
		Deflectores	NO		
Q	y3p(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada	
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%	
14.20	3.50	44	3.97	91%	
38.33	6.00	48	7.17	85%	
52.53	6.33	50	8.31	83%	
76.67	7.33	52.5	10.47	80%	
90.87	8.00	53.5	11.70	78%	

Tabla 9.20

		R	5		
		Ángulo	30		
		Deflectores	NO		
Q	y3p(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada	
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%	
14.20	3.50	44	3.97	91%	
38.33	6.00	48	7.17	85%	
52.53	6.33	50	8.31	83%	
76.67	7.33	52.5	10.47	80%	
90.87	8.00	53.5	11.70	78%	

Tabla 9.21

Elaborados por: Coaguila R. Juan Manuel P.



	R	10		
	Ángulo	45		
	Deflectores	SI		
Q	y_{3p}(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%
14.20	3.60	44	4.05	91%
38.33	6.10	48	7.23	85%
52.53	7.07	50	8.65	83%
76.67	9.00	52.5	11.08	79%
90.87	10.00	53.5	12.37	77%

Tabla 9.22

	R	10		
	Ángulo	30		
	Deflectores	SI		
Q	y_{3p}(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%
14.20	3.50	44	3.97	91%
38.33	6.00	48	7.17	85%
52.53	7.00	50	8.61	83%
76.67	8.00	52.5	10.63	80%
90.87	9.00	53.5	11.92	78%

Tabla 9.23

	R	10		
	Ángulo	45		
	Deflectores	NO		
Q	y_{3p}(2.50 m)	E inicial	E final	
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	
14.20	3.50	44	3.97	
38.33	6.00	48	7.17	
52.53	6.00	50	8.20	
76.67	6.33	52.5	10.53	
90.87	7.00	53.5	11.83	

Tabla 9.24

Elaborados por: Coaguila R. Juan Manuel P.



	R	10	
	Ángulo	30	
	Deflectores	NO	
Q	y3p(2.50 m)	E inicial	E final
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)
14.20	3.60	44	4.05
38.33	6.00	48	7.17
52.53	6.00	50	8.20
76.67	6.17	52.5	10.60
90.87	7.00	53.5	11.83
Tabla 9.25			

	R	15		
	Ángulo	45		
	Deflectores	SI		
Q	y3p(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%
14.20	3.500	44	3.97	91%
38.33	6.000	48	7.17	85%
52.53	7.167	50	8.71	83%
76.67	9.000	52.5	11.08	79%
90.87	10.000	53.5	12.37	77%

Tabla 9.26

	R	15		
	Ángulo	30		
	Deflectores	SI		
Q	y3p(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%
14.20	3.500	44	3.97	91%
38.33	6.000	48	7.17	85%
52.53	7.067	50	8.65	83%
76.67	9.000	52.5	11.08	79%
90.87	10.000	53.5	12.37	77%

Tabla 9.27

Elaborados por: Coaguila R. Juan Manuel P.



		R	15		
		Ángulo	45		
		Deflectores	NO		
Q	y _{3p} (2.50 m)	E inicial	E final	E disipada	
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%	
14.20	3.500	44	3.97	91%	
38.33	6.000	48	7.17	85%	
52.53	6.500	50	8.37	83%	
76.67	9.000	52.5	11.08	79%	
90.87	9.500	53.5	12.12	77%	

Tabla 9.28

		R	15		
		Ángulo	30		
		Deflectores	NO		
Q	y _{3p} (2.50 m)	E inicial	E final	E disipada	
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%	
14.20	3.500	44	3.97	91%	
38.33	5.667	48	6.98	85%	
52.53	6.000	50	8.20	84%	
76.67	9.000	52.5	11.08	79%	
90.87	10.000	53.5	12.37	77%	

Tabla 9.29

		R	15		
		Ángulo	45		
		Deflectores	SI		
		H PISCINA	0		
Q	y _{3p} (2.50 m)	E inicial	E final	E disipada	
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%	
14.20	3.400	44	3.90	91%	
38.33	4.333	48	6.58	86%	
52.53	3.500	50	9.96	80%	
76.67	4.333	52.5	13.31	75%	
90.87	4.833	53.5	14.97	72%	

Tabla 9.30

Elaborados por: Coaguila R. Juan Manuel P.



	R	15		
	Ángulo	45		
	Deflectores	SI		
	H PISCINA	10		
Q	y3p(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%
14.20	3.400	44	3.90	91%
38.33	5.600	48	6.94	86%
52.53	6.933	50	8.58	83%
76.67	6.500	52.5	10.49	80%
90.87	6.000	53.5	12.58	76%

Tabla 9.31

	R	CONTROL		
	H PISCINA	0		
Q	y3p(2.50 m)	E inicial	E final	E disipada
(l/s)	(cm)	(cm)	(cm)	%
14.20	2.333	44	3.40	92%
38.33	2.667	48	8.59	82%
52.53	2.833	50	12.69	75%
76.67	4.000	52.5	14.53	72%
90.87	3.833	53.5	19.94	63%

Tabla 9.32

Elaborados por: Coaguila R. Juan Manuel P.

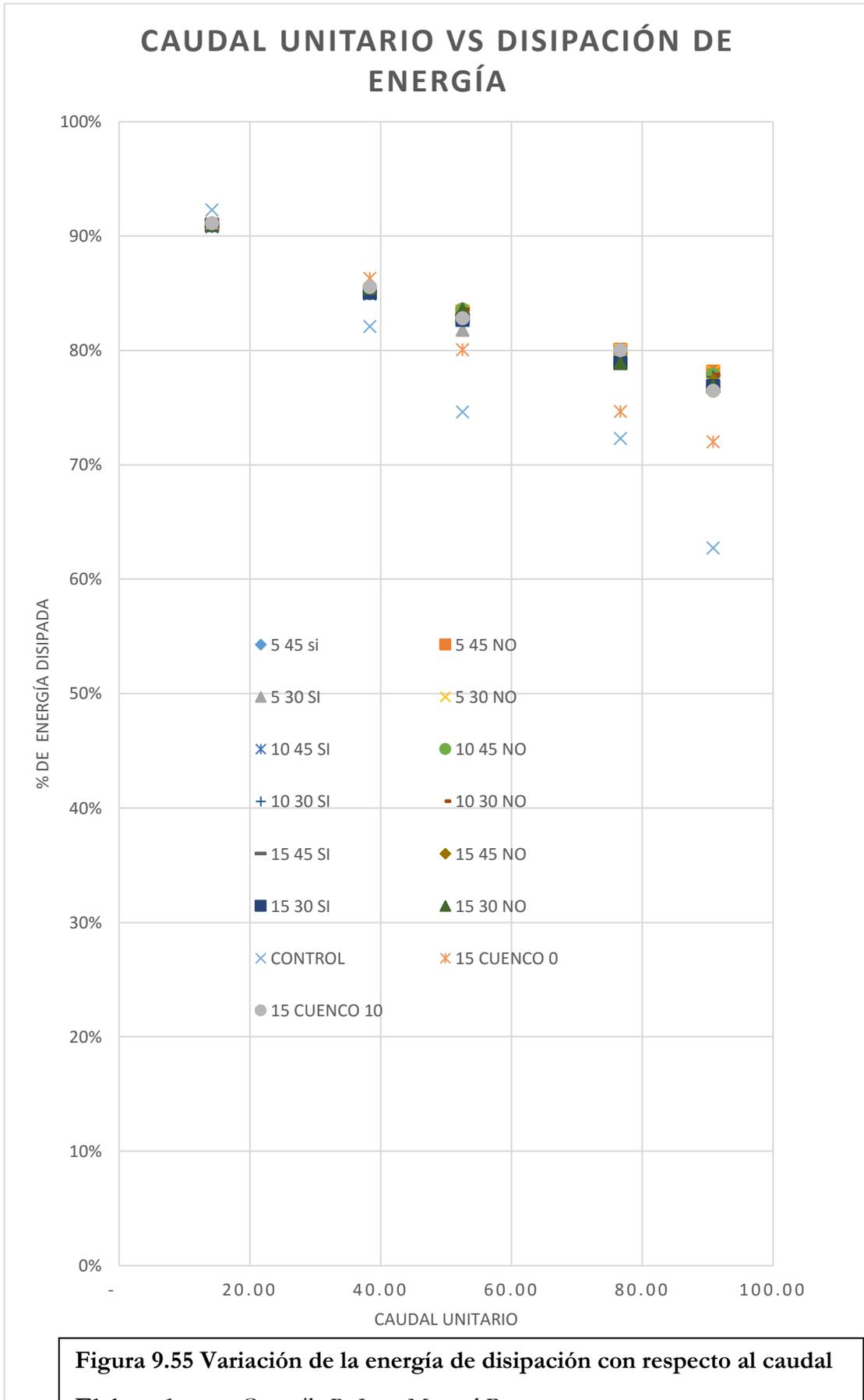


Figura 9.55 Variación de la energía de disipación con respecto al caudal
 Elaborado por: Coaguila R. Juan Manuel P.



10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se compararon los datos obtenidos mediante el modelamiento hidráulico con los datos teóricos obtenidos mediante las ecuaciones que se presentaron en el capítulo 5, para los radios y presiones máximas en el cucharón concluyendo lo siguiente:

- Se debe de diseñar la estructura terminal o disipador de energía de acuerdo al tipo de aliviadero que se presente, para caso particular del trampolín, este se encuentra con mayor frecuencia en los aliviaderos tipo cimacio.
- Para el diseño del disipador de energía no es necesario conocer la forma del aliviadero presente, lo más importante para su diseño es el calado de aproximación al trampolín el cual se puede calcular mediante el ábaco de la figura 5.11 (para cimacios con pendientes que van de 0.8:1 a 0.6:1)
- Para la elección del disipador de energía que vaya a estar presente en una presa se debe de tener en cuenta las condiciones ambientales, económicas y geográficas del lugar donde se ubique el disipador, siendo el disipador tipo trampolín el más económico pero se debe evaluar el posible riesgo que este pueda causar a las estructuras existentes aguas abajo de la presa.



- El parámetro más importante en el diseño de disipadores de energía es el calado de aproximación, particularmente en el trampolín el valor del calado define el radio de la cubeta, para el caso de los cuencos disipadores las dimensiones de los bloques de impacto están en función de este calado.
- De las ecuaciones 5.1 a la 5.7 se propone diseñar con el radio en función del calado del flujo de aproximación, el cual es función del caudal unitario, lo cual se confirma ya que para elevados caudales unitarios un radio pequeño presenta un mal desempeño resultando en un comportamiento hidráulico difícil de predecir.
- El ángulo de lanzamiento que se vaya a elegir normalmente debe concordar para que exista el mayor alcance horizontal a menos que las condiciones geográficas existentes requieran que el alcance se de en un punto específico.
- Para las alturas máximas alcanzadas y las longitudes máximas el factor que se encarga de controlar estas es el ángulo de lanzamiento y la altura de lanzamiento, teniendo presente que ángulo menor y una altura de lanzamiento mayor pueden llegar a un mayor alcance horizontal.
- La elevación del lanzamiento debe darse cumpliendo la condición que el flujo sea completamente aireado, por lo que el borde del lanzamiento deberá estar a suficiente altura sobre el máximo nivel de agua en el cauce.
- Las ecuaciones 5.26 y 5.27 nos dan los valores que tomaran las presiones en el cucharón del trampolín, estos datos obtenidos teóricamente coinciden con los datos obtenidos mediante el modelamiento para las presiones constantes, por lo que no se considera necesario aplicar la ecuación obtenida mediante el análisis dimensional, además en el modelamiento al dar lectura a las presiones en los piezómetros se obtuvo que hubo una inestabilidad de estas al aumentar el caudal, debiéndose al pobre desempeño que se genera en el trampolín a medida que el radio se hace más pequeño.



- La presencia de los deflectores hace que el chorro de agua sea lanzado por dos ángulos diferentes, por lo que al momento de alcanzar la superficie del cauce abarca una mayor área dando como resultado una menor socavación.
- El aliviadero se diseñó para un caudal mayor al máximo caudal ensayado para que no exista aireación del flujo, como se mencionó anteriormente la forma del aliviadero no influye significativamente en la disipación de energía.
- Se utilizaron 03 bombas en la investigación de la misma marca y la misma potencia (Marca Markers 02 hp) diferenciándose en el diámetro de succión e impulsión, siendo para 02 de las bombas 3” y para la otra bomba 2” y sus caudales bombeados son 11.50 l/s y 4.256 l/s respectivamente. Cabe notar la gran diferencia entre estos caudales teniendo en cuenta que la única diferencia entre la bomba de 2”x2” y las bombas de 3”x3” es el diámetro de su tubería de succión y de su válvula de pie que son de 2” y 3” respectivamente.
- En la construcción del modelo al momento de entregar el agua al canal por medio de las tuberías de impulsión se debió hacerlo de la tal manera que se genere flujo uniforme aguas arriba del aliviadero, para esto se optó por realizar perforaciones a lo largo de las tuberías de entrada como se observa en la figura 6.10.
- En el caso de aliviaderos y disipadores de energía, mayormente las fuerzas predominantes son las gravitatorias por lo que se emplea la similitud de Froude para hallar los caudales a escala real, para la investigación el máximo caudal que se pudo ensayar fue de 27.256 l/s, utilizando la ecuación 7.18 y con una escala de 1/50 el caudal máximo a escala real es de $481.82\text{m}^3/\text{s}$
- Se calculó las relaciones adimensionales que existen entre los parámetros involucrados en la disipación de la energía para un trampolín, a partir de los ensayos experimentales se concluyó que el la variación en el radio del trampolín no influye en la disipación de energía como se puede observar en los gráficos de las figuras 9.9 a la 9.16, por lo que la ecuación 7.34 no sería resaltante para el estudio.



- Se construyó un modelo de control con el objetivo de comparar la cantidad de energía disipada, con la presencia de un dissipador y sin este. Se pudo comprobar que existe una disipación de energía sin ningún tipo de dissipador, esto se debe a que naturalmente se disipa la energía por el cambio de pendiente que se presente del aliviadero al nivel del cauce, el modelo de control presento una disipación de la energía del 63% al 92%, este último dato correspondiente al menor caudal ensayado, siendo mayor que la mayor energía disipada por los trampolines esto se debe que al depender la energía del calado y de la velocidad del flujo, en esta se presenta un bajo calado con una velocidad un poco más alta de la presentada por los trampolines, dando cabe a que la energía de disipación sea mayor.
- Los primeros ensayos que se realizaron con el flujo cayendo directamente sobre el cauce, con lo que existía disipación de energía debido a la dispersión del flujo en el aire y el posterior impacto con el cauce, pero el flujo que se presentaba aguas abajo era muy inestable siendo un flujo no permanente a lo largo de las sección longitudinal y transversal, por lo que se decidió implementar la piscina de inmersión de la fotografía 6.22.
- La piscina de inmersión ayudó muy favorablemente, siendo esta el factor más influyente en la disipación de la energía, además al estar presente esta, el flujo paso de No permanente a permanente, además esta influye más mientras mayor sea el caudal pues para el menor caudal se observó que no era necesaria porque el calado de aguas abajo era suficiente para amortiguar el chorro lanzando obteniéndose la misma cantidad de energía disipada
- De la figura 9.25 a la 9.26 se compara las alturas y las longitudes máximas alcanzadas variando los ángulos, además que se presente o no deflectores, concluyendo que la máxima altura se obtiene con un ángulo de 45° y la presencia de deflectores, y para longitud máxima alcanzada no se puede precisar cual es la combinación de parámetros que la logran.



- Los porcentajes de disipación de la energía estando la piscina de inmersión presente fueron desde 77% al 91%
- Se recomienda utilizar los datos de este trabajo para escalas no mayores a 1/50 para que no se presenten efectos de escala





11. BIBLIOGRAFÍA

- STREETER, Víctor y otros “Mecánica de Fluidos” Ed. MC Graw Hill Interamericana S.A Colombia – 2000
- SHAMES, Irving H. “Mecánica de Fluidos” Ed. MC Graw Hill Interamericana S.A Colombia – 1997
- Máximo Villón Bejar, “Hidráulica de Canales” Ed. Villón Perú-2007
- FRANK M. WHITE, “Mecánica de Fluidos” MC Graw Hill Interamericana S.A Colombia – 2010
- P. NOVAK “Estructuras Hidráulicas” MC Graw Hill Interamericana S.A Colombia
- DISEÑO DE PEQUEÑAS PRESAS- Bureau of Reclamation
- HYDRAULIC DESIGN OF STILLING BASINS AND ENERGY DISSIPATORS-United States Department of the interior. BUREAU OF RECLAMATION
- MANUAL BÁSICO DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA- Tesis Escuela Politécnica del Ejército 2013
- CRITERIA FOR HYDRAULIC OF BUCKET TYPE ENERGY DISSIPATORS- Bureau of Indian Standars
- BASES Y CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE FORMAS ESPECIALES DE SALTOS DE ESQUÍ EN PRESAS-Jorge Augusto Toapaxi Alvarez
- VILLARINO- Tratado básico de presas Tomo II 4ta edición corregida y ampliada 1998
- HYDRAULIC DESING OF SPILLWAYS- Wayne Coyne
- MODELOS REDUCIDOS-Jaime Garcia Palacios