

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO PARA LA
OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TABIQUE BIFURCADOR DE
FLUJO CON REGIMEN DE APROXIMACIÓN SUPER CRÍTICO.**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

AUTOR:

CARLOS MICHEL ANDRADE ESCOBAR

friend_mich1985@hotmail.com

DIRECTORA: ING. XIMENA HIDALGO BUSTAMANTE

Quito, Octubre 2016

DECLARACIÓN

Yo, Carlos Michel Andrade Escobar declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

CARLOS MICHEL ANDRADE ESCOBAR

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Carlos Michel Andrade Escobar, bajo mi supervisión.

ING. XIMENA HIDALGO BUSTAMANTE
DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

A la Ingeniera Ximena Hidalgo, al Doctor Marco Castro, a todos y cada uno de mis compañeros en el CIERHI. Por su guía, apoyo y asesoramiento durante este proyecto de titulación.

Carlos Michel Andrade Escobar

DEDICATORIA

A mis padres a mi tía Adriana y a mi hermana.
Gracias por su apoyo incondicional.

Carlos Michel Andrade Escobar

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	2
INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO.....	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4 ALCANCE.....	4
CAPÍTULO 2	5
DESCRIPCIÓN DE LOS BIFURCADORES.....	5
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE TABIQUES BIFURCADORES CON FLUJO DE APROXIMACIÓN EN RÉGIMEN SUPERCRÍTICO EN CANALES ABIERTOS. ...	5
2.2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE TRES GEOMETRÍAS DE TABIQUES BIFURCADORES EN CANALES ABIERTOS CON FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPER CRÍTICO.....	8
2.2.1 ESTRUCTURA DE BIFURCACIÓN DE CAUDALES TIPO No1: AGUAS ARRIBA DE LA RAPIDA ESCALONADA EL BATAN.....	9
2.2.2 ESTRUCTURA DE BIFURCACIÓN DE CAUDALES TIPO No 2: AGUAS ARRIBA DE LA RAPIDA ESCALONADA EL BATAN.....	10
2.2.3 ESTRUCTURA DE BIFURCACIÓN DE CAUDALES TIPO No 3: AGUAS ARRIBA DE LA RAPIDA ESCALONADA EL BATAN.....	11
2.3 CONCLUSIONES DEL CAPITULO 2.....	12
CAPÍTULO 3	13
ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELACIÓN FÍSICA.....	13
3.1 INTRODUCCIÓN ACERCA DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS	13
3.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS	15
3.1.1.1 Modelos físicos.....	15
3.2 TEORÍA DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	16

3.2.1 MAGNITUDES FÍSICAS FUNDAMENTALES, DERIVADAS Y SUS DIMENSIONALES.....	17
3.2.2 TEOREMA DE π O DE BUCKINGHAM.....	19
3.3 TEORÍA DE LA SEMEJANZA MECÁNICA.....	31
3.3.1 Similitud geométrica.....	31
3.3.2 Similitud cinemática.....	31
3.3.3 Similitud dinámica.....	32
3.3.4 SEMEJANZA HIDRÁULICA.....	33
3.4 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA.....	35
3.4.1 SIMILITUD DE FROUDE.....	36
3.4.2 EFECTOS DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL Y VISCOSIDAD.....	37
3.5 SELECCIÓN DE LA ESCALA.....	40
3.5.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA ESCALA.....	40
3.5.2 SELECCIÓN DE ESCALA GEOMÉTRICA EN EL SISTEMA MODELO.....	42
3.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3.....	43
CAPITULO 4.....	44
CONSTRUCCIÓN INSTRUMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	44
4.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO.....	44
4.1.1 ZONA DE INGRESO AL MODELO.....	45
4.1.1.1 Tanque de ingreso, uniformización, aforo, canal hidrodinámico, compuerta.....	45
4.1.2 MODELOS FÍSICOS PROPIAMENTE DICHOS.....	50
4.1.2.1 Modelo Estructura tipo No.1.....	50
4.1.2.1.1 <i>Diseño Fabricación e Instalación de la Escala Visual para la Estructura No 1.</i>	54
4.1.2.2 Modelo Estructura tipo No.2.....	55
4.1.2.2.1 <i>Diseño Fabricación e Instalación de la Escala Visual para la Estructura No 2.</i>	57
4.1.2.3 Modelo Estructura tipo No.3.....	58
4.1.2.3.1 <i>Diseño Fabricación e Instalación de la Escala Visual para la Estructura No 3.</i>	59

4.1.2.4 ZONA DE SALIDA CANALES DE DESCARGA.....	61
4.2 INSTRUMENTACIÓN DE LOS MODELOS.....	62
4.2.1 VERTEDERO TRIANGULAR DE PARED DELGADA $\theta= 90^\circ$	62
4.2.2 LIMNÍMETRO.....	63
4.2.3 PROBETA	64
4.3 CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS FÍSICOS.....	64
4.3.1 CALIBRACIÓN DEL VERTEDERO DE ALIMENTACIÓN AL CANAL HIDRODINÁMICO.....	64
4.3.1.1 CURVA EXPERIMENTAL DE DESCARGA PARA VERTEDERO TRIANGULAR DE PARED DELGADA CON ANGULO $\theta = 90^\circ$	66
4.3.1.2 VERIFICACIÓN DE CONTINUIDAD DEL MODELO.....	69
4.3.2 VERIFICACIÓN DE LA SIMILITUD GEOMÉTRICA.....	69
4.3.3 VERIFICACIÓN DE LA SIMILITUD DE FROUDE.....	72
4.4 FASES DE LA INVESTIGACIÓN	74
4.5 PLAN DE PRUEBAS	75
4.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4	79
CAPITULO 5	80
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DISEÑO ORIGINAL.....	80
5.1 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DE LOS TABIQUE BIFURCADORES CON FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO EN CANALES ABIERTOS.....	80
5.2 PLAN DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DE LOS TABIQUE BIFURCADORES CON FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO EN CANALES ABIERTOS.....	80
5.3 RESULTADOS OBTENIDOS.....	82
5.3.1 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DEL FLUJO EN LAS ESTRUCTURAS DEL TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO DE APROXIMACIÓN EN RÉGIMEN SUPERCRÍTICO.....	82

5.3.1.1 Estructura del Tabique Bifurcador No. 1 con flujo de aproximación con régimen supercrítico.	82
5.3.1.2 Estructura del Tabique Bifurcador No. 2 con flujo de aproximación con régimen supercrítico.	97
5.3.1.3 Estructura del Tabique Bifurcador No. 3 con flujo de aproximación con régimen supercrítico.	113
5.3.2 ONDAS DE CHOQUE POR EL PASO DEL FLUJO ATRAVES DEL TABIQUE BIFURCADOR CON FLUJO DE APROXIMACIÓN EN REGIMEN SUPERCRITICO.	123
5.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO 5	126
5.5 RECOMENDACIONES DEL CAPÍTULO 5	127
CAPITULO 6	128
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL TABIQUE ÓPTIMO.....	128
6.1 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DEL TABIQUE ÓPTIMO CON FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRITICO.....	128
6.3 COMPARACION DE LOS PARAMETROS DEL TABIQUE ÓPTIMO CON LOS OTROS DOS TABIQUES.	129
6.4 RESULTADOS OBTENIDOS.....	135
6.6 CONCLUSIONES.....	136
6.6.1 CONCLUSIONES DEL TABIQUE BIFURCADOR ESTRUCTURA No. 1.....	136
6.6.2 TABIQUE BIFURCADOR ESTRUCTURA No. 2.....	136
6.6.3 TABIQUE BIFURCADOR ESTRUCTURA No. 3.....	137
CONCLUSIONES.....	138
7.1 CONCLUSIONES.....	138
7.2 CONCLUSIONES ACERCA DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL	140
7.2.1 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 1.....	140

7.2.2 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 2.....	144
7.2.3 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 3 OPTIMIZADA.....	149
7.3 RECOMENDACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS TABIQUES BIFURCADORES CON OPERACIÓN EN FLUJOS SUPERCRÍTICOS.....	153
7.3.1 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 1.....	153
7.3.2 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 2.....	158
7.3.3 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 3.....	162
ANEXOS.....	167

INDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 2.1	7
FIGURA N° 2.2	7
FIGURA N° 2.3	9
FIGURA N° 2.4	11
FIGURA N° 2.5	12
FIGURA N° 3.6	40
FIGURA N° 3.7	41
FIGURA N° 3.8.....	41
FIGURA N° 3.9	41
FIGURA N° 4.10	44
FIGURA N° 4.11	45
FIGURA N° 4.12	50
FIGURA N° 4.13.....	51
FIGURA N° 4.14	54
FIGURA N° 4.15.....	55
FIGURA N° 4.16.....	56
FIGURA N° 4.17.....	58
FIGURA N° 4.18.....	62
FIGURA N° 4.19.....	76

INDICE DE GRAFICOS

GRAFICO N° 3.1	38
GRÁFICO N° 4.2.....	60
GRAFICO N° 4.3	68
GRÁFICO N° 4.4.....	70
GRAFICO N° 4.5	71
GRÁFICO N° 4.6.....	71
GRÁFICO N° 4.7.....	72
GRÁFICO N° 5.8.....	124
GRÁFICO N° 5.9.....	125
GRAFICO N° 5.10	126
GRAFICO N° 6.11	130
GRAFICO N° 6.12	132
GRAFICO N° 6.13	134
GRAFICO N° 7.14	142
GRÁFICO N° 7.15	143
GRÁFICO N° 7.16	143
GRAFICO N° 7.17	147
GRÁFICO N° 7.18	147
GRÁFICO N° 7.19	148
GRAFICO N° 7.20	150
GRAFICO N° 7.21	151
GRÁFICO N° 7.22	151
GRAFICO N° 7.23	155
GRAFICO N° 7.24	156

GRAFICO N° 7.25	157
GRAFICO N° 7.26	160
GRAFICO N° 7.27	161
GRAFICO N° 7.28	162
GRÁFICO N° 7.29	163
GRÁFICO N° 7.30	164
GRÁFICO N° 7.31	165

INDICE DE CUADROS

CUADRO N° 3.1	21
CUADRO N° 3.2	42
CUADRO N° 4.3	67
CUADRO N° 4.4	68
CUADRO N° 4.5	69
CUADRO N° 4.6	73
CUADRO N° 4.7	73
CUADRO N° 4.8.....	74
CUADRO N° 4.9	76
CUADRO N° 4.10.....	77
CUADRO N° 4.11.....	78
CUADRO N° 4.12.....	79
CUADRO N° 5.13.....	81
CUADRO N° 5.14.....	82
CUADRO N° 5.15	86
CUADRO N° 5.16	89
CUADRO N° 5.17	92
CUADRO N° 5.18	95
CUADRO N° 5.19	98
CUADRO N° 5.20	101
CUADRO N° 5.21	104
CUADRO N° 5.22	107
CUADRO N° 5.23	110
CUADRO N° 5.24	113
CUADRO N° 5.25	115

CUADRO N° 5.26	117
CUADRO N° 5.27	119
CUADRO N° 5.28	121

INDICE DE FOTOS

FOTO N° 2.1.....	10
FOTO N° 2.2.....	10
FOTO N° 3.3.....	20
FOTO N° 3.4.....	21
FOTO N° 4.5.....	46
FOTO N° 4.6.....	46
FOTO N° 4.7.....	47
FOTO N° 4.8.....	47
FOTO N° 4.9.....	48
FOTO N° 4.10.....	49
FOTO N° 4.11.....	49
FOTO N° 4.12.....	51
FOTO N° 4.13.....	52
FOTO N° 4.14.....	52
FOTO N° 4.15.....	53
FOTO N° 4.16.....	53
FOTO N° 4.17.....	54
FOTO N° 4.18.....	55
FOTO N° 4.19.....	56
FOTO N° 4.20.....	57
FOTO N° 4.21.....	59
FOTO N° 4.22.....	59
FOTO N° 4.23.....	60
FOTO N° 4.24.....	61
FOTO N° 4.25.....	61

FOTO N° 4.26.....	63
FOTO N° 4.27.....	64
FOTO N° 4.28.....	65
FOTO N° 4.29.....	65
FOTO N° 4.30.....	66
FOTO N° 6.31.....	131
FOTO N° 6.32.....	133
FOTO N° 6.33.....	135
FOTO N° 7.34.....	141
FOTO N° 7.35.....	141
FOTO N° 7.36.....	145
FOTO N° 7.37.....	146
FOTO N° 7.38.....	149
FOTO N° 7.39.....	150
FOTO N° 7.40.....	153
FOTO N° 7.41.....	154
FOTO N° 7.42.....	158
FOTO N° 7.43.....	159

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1	32
Ecuación 3.2	38
Ecuación 4.3	62
Ecuación 4.4	63
Ecuacion 6.4	132
Ecuacion 6.5	132
Ecuacion 6.6	132
Ecuacion 6.7	133
Ecuacion 6.8	133
Ecuacion 6.9	133
Ecuacion 6.10	135
Ecuacion 6.11	135
Ecuacion 6.12	135

SIMBOLOGÍA

e_L	Escala de longitud
e_T	Escala de tiempo
e_V	Escala de velocidad
e_a	Escala de aceleración
e_F	Escala de fuerzas
F_r	Número de Froude
R_e	Número de Reynolds
W_e	Número de Weber
M_a	Número de Mach
ρ	Densidad del agua
E_u	Número de Euler
g	gravedad
F_{r_m}	Número de Froude en modelo
'	Peso específico del agua
e_R	Escala de Reynolds
λ	Coefficiente de pérdidas por fricción
v	Velocidad de flujo
σ	Viscosidad cinemática del agua a 20°C
Q	Caudal
C	Coefficiente de descarga de vertederos
h	Valor de la carga de agua sobre vertederos
L_h	Longitud principal abscisa onda de choque
L_h'	Longitud secundaria abscisa onda de choque
L_v	Longitud principal ordenada onda de choque
L_v'	Longitud secundaria ordenada onda de choque
y_1	Longitud primera de separación en planta de la perturbación
y_2	Longitud segunda de separación en planta de la perturbación
y_3	Longitud tercera de separación en planta de la perturbación

y4	Longitud cuarta de separación en planta de la perturbación
X	Longitud abscisa de inicio de la perturbación
h1	Longitud primera en elevación de la perturbación
h2	Longitud segunda en elevación de la perturbación
h3	Longitud tercera en elevación de la perturbación
Y3	Calado de aproximación a la estructura
b	Ancho canal
v3	Velocidad de aproximación a la estructura

RESUMEN

Este estudio presenta un análisis comparativo de tres geometrías de tabiques bifurcadores de caudales con régimen de aproximación supercrítico, las geometrías de las dos primeras estructuras fueron proporcionadas por la EPMAPS, y son parte del estudio experimental en modelo físico de las rápidas con perfil escalonado y liso de la quebrada el Batán. En cuanto a la geometría de la última estructura fue desarrollada en base a los resultados arrojados en el transcurso del estudio, se realizó el modelo físico con una escala 1:15.

Los modelos físicos de las tres estructuras bifurcadoras de caudales con flujo de aproximación supercrítico, reproducen el comportamiento del flujo tridimensional que permite la separación del caudal de aproximación con régimen supercrítico en canales abiertos. Los principios teóricos usados para realizar la modelación física y el análisis e interpretación de resultados experimentales, se obtienen modificaciones y parámetros de diseño. La investigación experimental se realiza en tres fases: (i) construcción y calibración de los modelos físicos, (ii) análisis del comportamiento hidráulico de los diseños originales y (iii) optimización de la geometría para garantizar un adecuado funcionamiento de las estructuras de bifurcación con flujos de aproximación con régimen supercrítico.

En este estudio se presenta una relación de diseño en las longitudes de la geometría del tabique bifurcador para flujos de aproximación con régimen supercrítico, además de una comparación de resultados entre tres geometrías para ratificar el diseño adoptado.

ABSTRACT

This study presents a comprehensive comparative analysis about the geometry of three splitter partitions of caudal with approximate supercritical regime, the geometry of the first two structures were given by the EPMAPS, and are part of the experimental study on the physical model about rapid flows with staggered smooth profile in El Batan's Cliff. And about the last structure geometry, it was developed on basis in the results given with the study development, the physical model was made on 1:15 scale

The physics models of the three splitter structures of caudal with supercritical flow, reproduce the behavior of the tridimensional flux that allows the separation of caudal with supercritical regime approximation on open canals. The theoretical principles used for reproduce the physical modeling and the analysis and results interpretation of experimental results, were obtained modifications and design parameters. The experimental research was made on three phases: (i) construction and calibration of the physical models, (ii) analysis of the hydraulic function of the original designs and (iii) geometry optimization to guarantee an adequate functionality of the flux splitter structures with approximate supercritical flow. On this study is presented the relation of longitudinal dimensions of geometry design of the flow splitter partitions with supercritical regime, besides a comparative of results between geometries to ratify the adopted design.

PRESENTACIÓN

En este Proyecto se realiza una comparativa entre tres estructuras, evidenciando que no se puede utilizar la hidráulica unidireccional para abordar problemas de flujos más complejos como es el caso del régimen supercrítico. Se analiza las perturbaciones generadas en el flujo con cada una de las geometrías

Con una geometría de tabique que tenga un diseño apropiado para flujos con régimen de aproximación supercrítico, se logra una menor incidencia generada por las perturbaciones lo que estabiliza de mejor manera el flujo aguas debajo de la estructura optimizada.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La región andina se caracteriza por tener topografías con pendientes fuertes, en todo el continente americano encontramos elevaciones montañosas, estas cadenas montañosas tienen en sus valles asentamientos poblacionales o ciudades que marcan un reto histórico para su abastecimiento de agua, es así que en las culturas tanto prehispánicas como de la colonia, las ciudades andinas han encontrado la necesidad de conducir el líquido vital, la manera más común para la conducción en nuestros pueblos andinos es la conducción por gravedad, debido a que por nuestra región atraviesa la cordillera de los andes de donde nacen muchas de las vertientes de las cuales se alimentan las distintas ciudades, esto ha generado la necesidad de generar obras que puedan conducir el agua de un lugar a otro siendo vital el separar caudales, general reservas para épocas de bajas precipitaciones, abastecer los sistemas de riego en las zonas rurales.

Lo que ha conllevado a tener grandes retos ingenieriles partiendo de que la ingeniería como tal se cimienta en la resolución de necesidades.

En las distintas culturas encontramos obras de conducción, pero en algunas se destaca el interés por las obras hidráulicas por la necesidad que tenían, por ejemplo la cultura Inca tiene obras ingenieriles hidráulicas realmente impresionantes, por los retos que presentaron para su construcción y la carencia de recursos tecnológicos de ese tiempo.

Este es un legado para nuestras sociedades, así como un orgullo para los pueblos latinoamericanos, ahora el uso de la ingeniería es vital para el desarrollo de los pueblos, se busca la conservación de los recursos no renovables y el buen manejo de los mismos así como también la alta eficiencia de las obras civiles.

En el caso concreto de las obras hidráulicas en nuestras sociedades andinas juegan un papel preponderante es así que el desarrollo de las sociedades está estrechamente ligado al buen manejo de este recurso.

Al tener pendientes fuertes las diversas topografías andinas, y además pertenecer a una región montañosa que cambia de alturas constantemente, se hace necesario un análisis de flujos con régimen supercrítico.

1.2 OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO

Analizar experimentalmente con la ayuda de un modelo físico a escala el comportamiento hidráulico de 3 geometrías de tabiques bifurcador, cuyo flujo de aproximación está en régimen supercrítico.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

I. Determinar el comportamiento del flujo al atravesar por el tabique bifurcador, con las diferentes geometrías mediante ensayos experimentales.

II. Determinar las características del fenómeno, y realizar una comparación de las mismas para cada una de las tres estructuras, en el paso por el tabique bifurcador, mediante ensayos experimentales.

III. Realizar una comparación entre los resultados experimentales en las diversas geometrías de tabiques bifurcadores e identificar cuáles son los parámetros que intervienen en el correcto funcionamiento y eficiente comportamiento de flujo en régimen supercrítico en las estructuras de conducción cuando existen estructuras de bifurcación.

IV. Obtener una geometría optimizada, que genera la menor onda de choque posible, y que genere un correcto comportamiento del flujo reduciendo al máximo los efectos de la onda de choque en las paredes del canal aguas abajo de la separación del flujo.

1.4 ALCANCE

Se pretende que la investigación arroje resultados a través del análisis experimental de la incidencia de la geometría del tabique bifurcador en el paso del flujo por la misma, este análisis se documentara con fotos y videos que permitan un correcto discernimiento del fenómeno.

No se realiza una calibración con instrumentación electrónica, pues este tipo de equipos son inexistentes en el laboratorio utilizado.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE LOS BIFURCADORES

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE TABIQUES BIFURCADORES CON FLUJO DE APROXIMACIÓN EN RÉGIMEN SUPERCRÍTICO EN CANALES ABIERTOS.

Muchas obras hidráulicas tienen operación con flujos en régimen supercrítico, al separar este tipo de flujos se requiere un especial cuidado en el diseño de la geometría de las estructuras de separación de caudales, se debe hacer énfasis en el diseño de la geometría del tabique bifurcador, debido a las condiciones de régimen supercrítico, se generan ondas de choque importantes, así como perturbaciones que inciden en las estructuras aguas abajo de la separación del flujo.

En muchos casos se da un uso a las estructuras distinto para aquel que fueron concebidas, por lo que el funcionamiento de las mismas no siempre es el más adecuado, siendo muy importante el estudio minucioso de las estructuras de separación.

La mayoría de sistemas de agua en un punto necesitan realizar una separación de caudales en muchos casos se asume que la geometría del tabique bifurcador es la idónea pero ya en la operación real de estas estructuras se puede evidenciar que no es así.

Las estructuras hidráulicas que operan con flujo en régimen supercrítico tienen algunas dificultades de operación cuando se debe separar caudales debido a un precario diseño de los bifurcadores, es así que en el caso específico de un bifurcador el cual está compuesto de las paredes laterales de aproximación, el tabique bifurcador, es preponderante el correcto diseño de su geometría.

Estos tabiques separan al flujo y su importancia geométrica en flujos con régimen supercrítico es preponderante pues su mal funcionamiento bajo estas condiciones genera perturbaciones significativas.

Si el flujo es supercrítico, no podemos abordar ningún problema de manera unidimensional pues no generará resultados ni remotamente cercanos a la realidad.

Por lo que estos tabiques bifurcadores dan la oportunidad de una vasta investigación para analizar su comportamiento en la operación con flujos de régimen supercrítico.

La optimización del diseño hidráulico de estos tabique es entonces un pilar fundamental para un correcto diseño hidráulico en distintas estructuras, en este estudio se realizará una investigación del tabique bifurcador en canales abiertos prismático con flujo de aproximación en régimen supercrítico.

Se suscribe un proyecto por la EPN TECH EP, por medio del Centro de Investigaciones y Estudios de Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional que tiene por título "CONTRATACIÓN DEL SERVICIO ESPECIALIZADO CENTRAL DE IÑAQUITO EN LA QUEBRADA EL BATÁN, COLECTOR, ELABORACIÓN DEL MODELO FÍSICO DE LA RAPIDA ESCALONADA, RAPIDA LISA, VERTEDERO DE EXCESOS Y DISIPADOR DE ENERGÍA DE LA DESCARGA DEL COLECTOR".

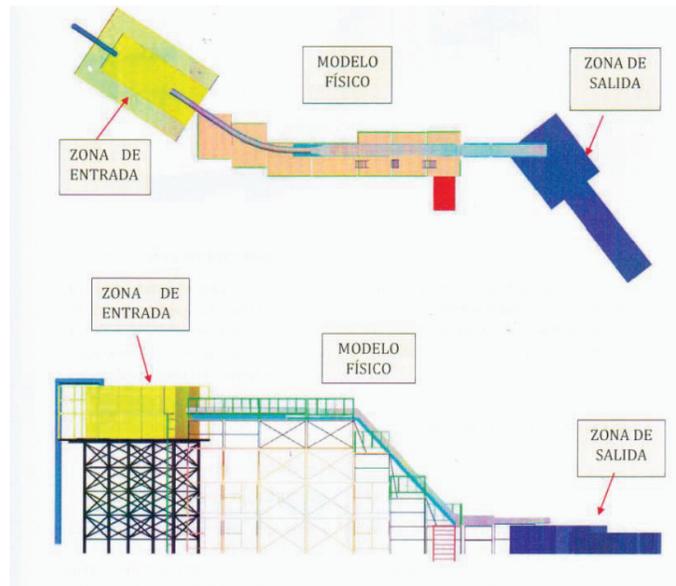
Este estudio nace bajo la necesidad de realizar una optimización en la rápida escalonada, el colector Iñaquito tiene una prolongación que va desde la Plaza Argentina hasta el río Machángara esta obra finalizo su periodo de construcción en el 2009 por parte de La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS), estas obras se realizaron para un control de escorrentía, las obras del proyecto son:

- i. Túnel sección herradura con su bifurcador
- ii. Dos rápidas escalonadas
- iii. La Obra de descarga y restitución del agua a la quebrada El Batan.

Al entrar en operación estas estructuras hidráulicas se observa que la separación de caudales se da de una manera abrupta siendo un factor que influye en la operación de estas

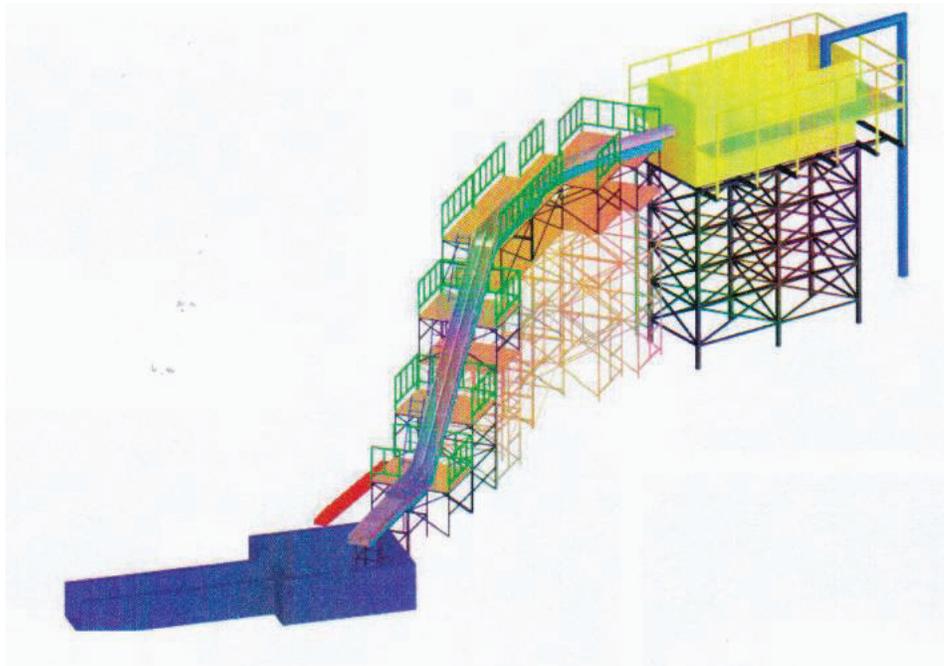
estructuras hidráulicas comprometiendo el correcto funcionamiento del cuenco de disipación número 1.

Figura N° 2.1



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Figura N° 2.2



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Este estudio realiza un estudio a profundidad de los bifurcadores con flujo de aproximación en régimen supercrítico.

EPN TECH – CIERHI (2016) 'Informe definitivo de la rápida de perfil escalonado de la quebrada El Batán'

2.2 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE TRES GEOMETRÍAS DE TABIQUES BIFURCADORES EN CANALES ABIERTOS CON FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPER CRÍTICO.

Este proyecto de titulación ha relacionado la presente investigación con la geometría diseñada originalmente por la EPMAPS datos que se obtuvieron del para la geometría de la Estructura No.1, que se encuentra operando en el DMQ. La Estructura No. 2 está basada en el levantamiento de la estructura ya construida y la Estructura No.3 es un diseño propuesto en esta investigación para optimizar el funcionamiento de las estructuras antes mencionadas, y marcar parámetros del uso de tabique bifurcadores en canales abiertos con flujos de aproximación con régimen súper crítico.

Estas estructuras generalmente se usan aguas arriba de cualquier estructura hidráulica, son utilizadas para separar los caudales existentes. La información concerniente a la Estructura No.1 relativa al diseño y dimensionamiento fue proporcionada por el Departamento de Estudios y Diseños de la Empresa Pública Metropolitana de Agua potable y Saneamiento EPMAPS de Quito.

Para el estudio del comportamiento hidráulico de la Estructura No. 1, parte de la presente investigación, se utiliza las características geométricas presentadas por la EPMAPS.

EPN TECH – CIERHI (2016) 'Informe definitivo de la rápida de perfil escalonado de la quebrada El Batán'

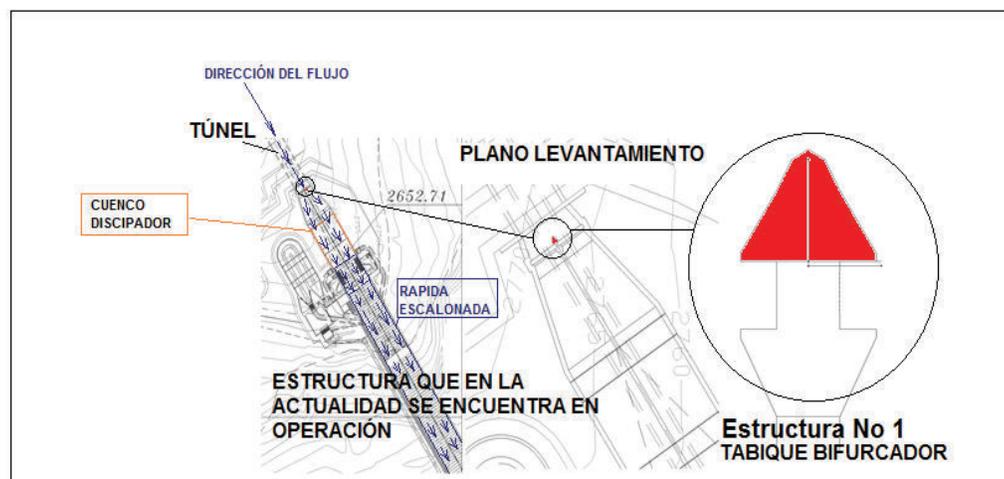
2.2.1 ESTRUCTURA DE BIFURCACIÓN DE CAUDALES TIPO N°1: AGUAS ARRIBA DE LA RAPIDA ESCALONADA EL BATAN.

Esta estructura bifurcadora se encuentra aguas arriba de la rápida escalonada de El Batán, por esta estructura para un caudal de hasta $150 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal que se divide en dos cámaras, el tabique bifurcador opera con un flujo de aproximación en régimen supercrítico, debido a que la pendiente del fondo del baúl es una pendiente fuerte, lo que genera fuertes perturbaciones en el flujo y una separación de caudal anti técnica hacia cada cámara, es decir de manera desigual ingresa más a una cámara que a otra cámara.

EPN TECH – CIERHI (2016) 'Informe definitivo de la rápida de perfil escalonado de la quebrada El Batán'

Por lo que es necesario un análisis del fenómeno para plantear una solución, a continuación se presenta donde se encuentra la Estructura No.1,

Figura N° 2.3



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

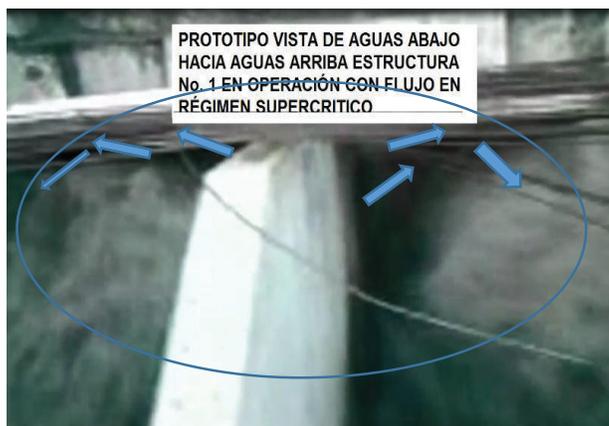
La estructura No. 1 se encuentra construida y en operación a continuación presentamos fotos

Foto N° 2.1



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE.

Foto N° 2.2



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE.

2.2.2 ESTRUCTURA DE BIFURCACIÓN DE CAUDALES TIPO No 2: AGUAS ARRIBA DE LA RAPIDA ESCALONADA EL BATAN.

La información concerniente a la Estructura No.2 relativa al diseño y dimensionamiento fue proporcionada por el Departamento de Estudios y Diseños de la Empresa Pública

Metropolitana de Agua potable y Saneamiento EPMAPS de Quito. Se muestra a continuación los planos de la geometría.

FIGURA N° 2.4



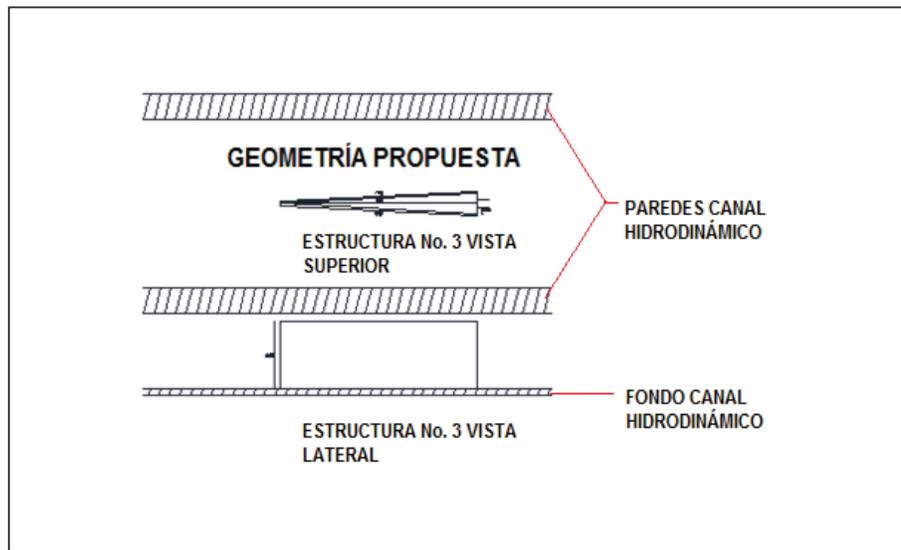
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

2.2.3 ESTRUCTURA DE BIFURCACIÓN DE CAUDALES TIPO No 3: AGUAS ARRIBA DE LA RAPIDA ESCALONADA EL BATAN.

La información concerniente a la Estructura No.3 relativa al diseño y dimensionamiento fue generada en el presente estudio. Siendo preponderante el cambio de tabique para la correcta operación de la rápida escalonada.

Esta estructura cumple con las condiciones para generar un mínimo de perturbaciones casi imperceptibles. Se genera una geometría más esbelta para tener un área de ataque en la nariz del tabique bifurcador que afecte lo menos posible al flujo y se genere una transición en la separación del flujo más suave, para tener la menor incidencia de tensión superficial en el modelo se utilizará acrílico en la construcción de la geometría optimizada.

FIGURA N° 2.5



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

2.3 CONCLUSIONES DEL CAPITULO 2

Se observa que el prototipo genera ondas de choque, las cuales tienen impactos considerables en las paredes laterales, este estudio analiza este efecto de la geometría del prototipo la cual se obtiene de los levantamientos obtenidos de la base de datos del 'Informe definitivo de la rápida de perfil escalonado de la quebrada El Batán' EPN TECH – CIERHI (2016), el cual es diferente de la geometría presentada en diseños del mismo informe.

Se propone una geometría que minimice la generación de estos impactos por las ondas de choque aguas abajo de la estructura bifurcadora, se busca conseguir este efecto minimizando el área de contacto de la nariz del bifurcador con el flujo, por lo que se presenta una geometría mucho más esbelta en el bifurcador optimizado.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELACIÓN FÍSICA

3.1 INTRODUCCIÓN ACERCA DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

Se realiza el estudio del comportamiento del tabique de una estructura bifurcadora en canales de conducción, que operen con flujo de aproximación en régimen supercrítico. Como un recuento histórico siempre se vio la necesidad de interpretar el comportamiento del fluido a nivel dinámico y poder diseñar estructuras hidráulicas que permitan hacer uso de este recurso a voluntad, dentro de estas estructuras hidráulicas se encuentran las de separación o división de caudales, en este estudio se enfatizará un análisis de la geometría de los tabiques bifurcadores y los efectos de la misma en la separación del flujo y su paso por la estructura.

Las estructuras antropogénicas son tridimensionales lo que nos obliga a realizar un análisis tridimensional del comportamiento del fluido, y es precisamente ahí donde encontramos una vasta dificultad, debido a que las ecuaciones que se utilizan en la hidráulica teórica para determinar los diferentes parámetros en tres dimensiones, son las ecuaciones de Navier Stokes, las cuales presentan complejidad en el desarrollo matemático, por lo que se realizan varias simplificaciones a estas, y así obtenemos las ecuaciones unidimensionales conocidas en la mayoría de bibliografía hidráulica.

Por lo que es necesario realizar análisis en el área de la hidráulica experimental, en modelos físicos los cuales nos den una validación de los modelos teóricos y de ser necesario nos brinden datos que permitan realizar un diseño que puede ajustarse de mejor manera al comportamiento real.

La habilidad de aproximarse más a la realidad dependerá de la real comprensión de los fenómenos por parte del diseñador quien siempre asumirá un "riesgo calculado", es por esto que en el desarrollo profesional se mantiene una frase que dice " Solo el agua es la que conoce y sabe a ciencia cierta la hidráulica", pues ese "riesgo calculado" por el diseñador es un riesgo adoptado por toda la vida útil de la estructura, que en muchos casos supera la vida del diseñador, y se debe tener conciencia de que este riesgo es latente y lo asumiremos. Y la

única manera de aproximarnos lo máximo al comportamiento real del fluido es con un modelo físico.

Este es en efecto, el caso de nuestro estudio donde se hace evidente la necesidad de una modelación física, por lo tanto estaremos en el campo de la hidráulica experimental, por la complejidad del estudio del fenómeno. Debido a un carente estudio del comportamiento del fluido en régimen de aproximación supercrítico en estructuras de bifurcación en canales, se puede evidenciar que la teoría existente puede brindar varias soluciones para el problema, hay una gran cantidad de variables inmersas en el fenómeno hidráulico, es así que necesitamos realizar una investigación científica que nos permita simular de mejor manera el fenómeno.

El método que utiliza la investigación de la hidráulica tiene base en la "Teoría de Semejanza" por medio de la similitud mecánica, que nos permite realizar un análisis en laboratorio de un sistema llamado modelo, lo entenderemos por medio de leyes y principios que gobiernen su comportamiento, nos permitirá llegar a obtener de manera cuantitativa los valores de las diversas magnitudes físicas, también de manera cualitativa la descripción del fenómeno, de esta manera podremos determinar el comportamiento de un sistema similar al sistema modelo llamado sistema prototipo.

Según la Real Academia de la Lengua española la definición de modelo es "arquetipo o punto de referencia para imitarlo o reproducirlo.", además podemos encontrar otro concepto más ingenieril de la literatura técnica donde se indica que un modelo es "la representación de un sujeto, estado o evento" (Kobus, H. 1978).

Se busca encontrar los patrones de comportamiento de los fenómenos del sistema prototipo en un sistema modelo y por consiguiente deberán tener relación directa entre ellos es decir ser semejantes, la estricta igualdad nunca estará presente en ámbitos ingenieriles experimentales y de aplicación, eso lo dejamos enclaustrado para las áreas teóricas netas, ya que son condiciones irreales.

3.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

Los modelos se dividen en:

- Modelos Físicos
- Modelos Numérico

El tipo de modelación que escogemos está en función de:

- Factores limitantes principales
- Exactitudes requeridas
- Simplicidad
- Inversión tiempo y costos
- Flexibilidad
- Demostrabilidad
- Credibilidad
- Reacoplamiento a la naturaleza (posibilidad de calibración)
- Posibilidad de pronóstico

Este estudio realizará una modelación física, que permita cuantificar los distintos parámetros del flujo al pasar por el tabique de una estructura bifurcadora con flujos que tengan regímenes de aproximación supercríticos, y así determinar que geometría es la mejor bajo estas condiciones. Por lo que empezaremos a abordar los conceptos de modelos físicos a continuación.

3.1.1.1 Modelos físicos

El modelo es un sistema que cumple con el mismo comportamiento del sistema llamado prototipo, en esta semejanza se busca entender el comportamiento del flujo con estructuras antrópicas (vertederos, compuertas, pilas, represas, etc.), los modelos físicos se clasifican en:

- Modelos con geometría similar: las diferentes medidas geométricas del modelo tienen una relación de semejanza con el prototipo en las tres dimensiones lo que no distorsiona la geometría analizada.

En este estudio se tiene una geometría similar entre el modelo y el prototipo.

¹Lr es el número de escala Lr en nuestro análisis para la primera y segunda geometría será:

$$L_r = \frac{L_p}{L_m} = \frac{5}{1} = 5 \text{ Y esta escala se la representa así } 1:5$$

Más adelante en el numeral 2.5.2 se ampliara los criterios de selección de escala.

- Modelos distorsionados: las distintas medidas geométricas en cada eje a ser analizado o plano de estudio tienen distintas escalas el uno del otro lo que generará una distorsión la cual puede ser manejada y expresar una relación de distorsión. En cada eje se tendrá una escala distinta del anterior.
- Modelos disimiles: en este caso no existe ningún tipo de proporción de semejanza entre los sistemas modelo y prototipo.

3.2 TEORÍA DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL

El fenómeno hidráulico es un fenómeno físico, así que se lo define con las magnitudes física, las que dependiendo del modelo van a variar y esto se cumple de tal manera que ningún modelo será igual al anterior, y dependiendo de la necesidad de análisis en cada caso se tendrá diferentes magnitudes, no existe una generalización pues cada fenómeno tiene características únicas.

Para poder determinar las magnitudes y las dimensiones de cada magnitud, que intervienen en el fenómeno debemos entenderlo muy bien, analizarlo y observar su comportamiento.

¹ "Todas las magnitudes geométricas Ln en la naturaleza (prototipo) están en una relación constante con las correspondientes Lm en el Modelo.

Esta relación se denomina como número de escala Lr del modelo" (Hidalgo, M. "Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas". Quito. Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional.)

$$L_r = \frac{L_n}{L_m}$$

Este análisis nos brinda una potente herramienta para descartar variables innecesarias y de esta manera poder optimizar esfuerzos y recursos. En el método se analiza parámetros adimensionales los cuales relacionan las diversas magnitudes físicas que intervienen en el fenómeno. De esta manera representamos al modelo a nivel matemático de mejor manera.

3.2.1 MAGNITUDES FÍSICAS FUNDAMENTALES, DERIVADAS Y SUS DIMENSIONALES

La hidráulica pertenece a un campo físico en el que se verifica la existencia de un objeto si tiene materia o masa, tamaño o dimensiones, posición en un determinado tiempo (t), por lo que se puede determinar tres magnitudes fundamentales que rigen el campo físico de la hidráulica: MASA (M), LONGITUD (L), TIEMPO (T).

El sistema definido para trabajar en nuestro campo físico es con el S.I.(SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES MÉTRICAS), la relación que asocia a cada una de la magnitudes básicas en nuestro campo físico hidráulico generan ecuaciones homogéneas es decir que dichas ecuaciones tienen términos que tienen misma ecuación de dimensiones por lo tanto, son homogéneos en sus unidades, y equivalentes en su valor numérico.

Si designamos por Q para expresar una magnitud derivada y se ha escogido a q_1, q_2, \dots, q_m , como magnitudes fundamentales, el análisis matemático permite plantear la relación funcional:

Magnitud Derivada = f (Magnitudes Fundamentales)

$$Q = f (q_1, q_2, \dots, q_m) \quad \text{ejemplo:}$$

$$\text{Velocidad} = f (\text{Longitud}, \text{Tiempo})$$

$$V = f (L, T)$$

Esto puede expresarse como un monomio de potencias de las magnitudes fundamentales q_1, q_2, \dots, q_m , así las magnitudes derivadas las podremos expresar así:

$$Q = C * q_1^{a_1} * q_2^{a_2} * \dots * q_m^{a_m}$$

Los distintos valores de exponentes a_1, a_2, \dots, a_m , definen el dimensional de la magnitud derivada, y deben cumplir con el principio de homogeneidad dimensional (en cualquier ecuación deducida analíticamente que represente el comportamiento de un fenómeno físico todos los términos deben tener la misma dimensión, tienen que ser homogéneos. Y se debe satisfacer cualquier sistema de unidades. Los fenómenos naturales y las magnitudes ligadas a ellos son independientes del sistema de unidades utilizadas). (Hidalgo, M. "Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas". Quito. Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional.)

TABLA N° 3.1

	C.G.S	M.K.S
Longitud	L	L
Masa	M	$FL^{-1}T^2$
Tiempo	T	T
Área=Largo*Ancho	L^2	L^2
Volumen= Largo*Ancho*Alto	L^3	L^3
Densidad= masa/volumen	ML^{-3}	$FL^{-4}T^2$
Velocidad= Longitud/Tiempo	LT^{-1}	LT^{-1}
Aceleración= Velocidad/Tiempo	LT^{-2}	LT^{-2}
Velocidad Angular= Vel.ang./Tiempo	T^{-1}	T^{-1}
Caudal= Volumen/Tiempo	L^3T^{-1}	L^3T^{-1}
Cantidad de Movimiento * Velocidad	MLT^{-1}	FT
Fuerza o Peso = Masa * Aceleración	MLT^{-2}	F
Presión o tensión = Fuerza/superficie	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}

TABLA N° 3.1 CONTINUACION

Momento de una fuerza = Fuerza * Longitud	ML^2T^{-2}	FL
Trabajo de Energía = Fuerza * Longitud	ML^2T^{-2}	FL
Energía por unidad de peso	L	L
Energía por unidad de volumen	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
Potencia = trabajo/tiempo	ML^2T^{-3}	FLT^{-1}
Peso Específico = peso/volumen	$ML^{-2}T^{-2}$	FL^{-3}
Viscosidad= tensión/ gradiente de la velocidad	$ML^{-1}T^{-1}$	$FL^{-2}T$
Viscosidad Cinemática = viscosidad/ densidad	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}
Tensión Superficial = Energía/ Área	MT^{-2}	FL^{-1}

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE.

3.2.2 TEOREMA DE π O DE BUCKINGHAM

Es un proceso que nos permite primero visualizar cuales variables dependientes tenemos y debido a que estas están en función de las variables fundamentales o independientes, podremos tener un análisis más riguroso de cuales variables intervienen en el fenómeno lo que conllevara a obtener ecuaciones o relaciones adimensionales que representen de manera efectiva al fenómeno.

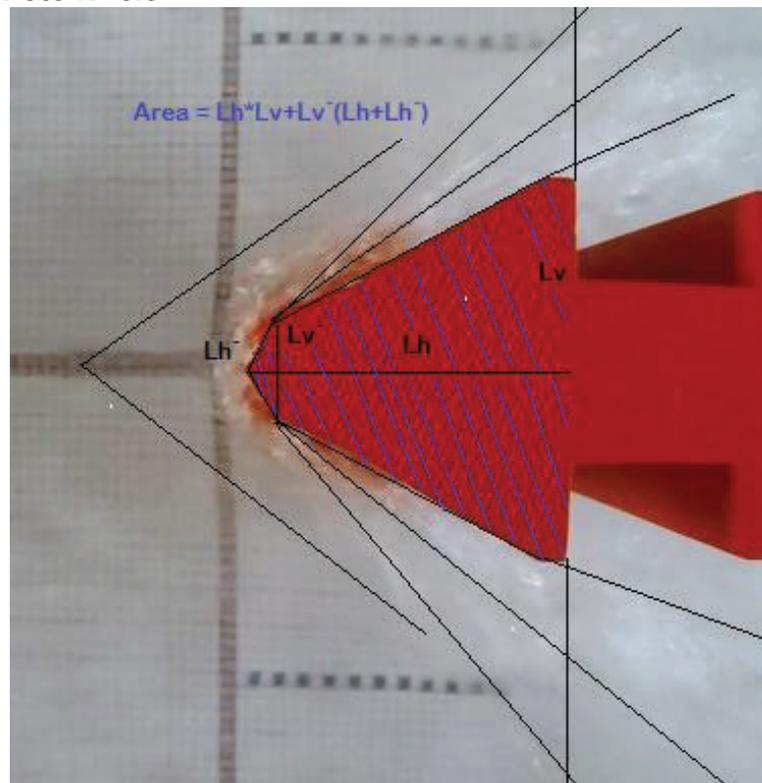
En este teorema se usa la letra π para simbolizar un parámetro adimensional que básicamente es una división de dos cantidades que tienen las mismas dimensiones fundamentales de donde se obtendrá un valor adimensional. De varias relaciones adimensionales en un mismo fenómeno se tiene una que es dependiente de las demás a esta se la conoce como π_j .

$$\pi_j = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{r-n})$$

Se debe realizar el siguiente algoritmo de acciones para el desarrollo del teorema:

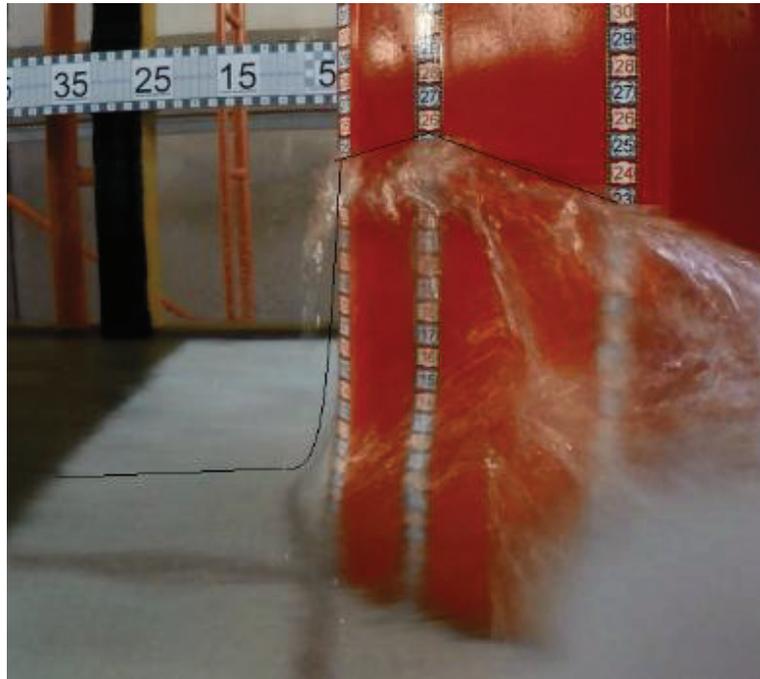
- 1) Se realiza una lista de los parámetros (variables dimensionales, variables adimensionales y constantes) se contabiliza y esta cantidad será igual a n. Hay que tener en cuenta que los parámetros que sean dependientes no deberán repetirse. (Por ejemplo, no se deberá poner el radio r y A debido a que no son independientes el uno del otro.)

Foto N° 3.3



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE.

Foto N° 3.4



ELABORADO POR: CARLOS ANDRADE.

CUADRO N° 3.1: MAGNITUDES INFLUYENTES EN EL ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL COMPORTAMIENTO DEL TABIQUE BIFURCADOR NO. 1.

Análisis Dimensional del Tabique Bifurcador No.1		
Magnitudes Geométricas	Denominación	Dimensional
Longitud principal abscisa	Lh	L

CUADRO N° 3.1 CONTINUACION

Longitud secundaria abscisa	Lh'	L
Longitud principal ordenada	Lv	L
Longitud secundaria ordenada	Lv'	L
Longitud primera en planta de la perturbación	$y1$	L
Longitud segunda en planta de la perturbación	$y2$	L
Longitud tercera en planta de la perturbación	$y3$	L
Longitud cuarta en planta de la perturbación	$y4$	L
Longitud abscisa de inicio de la perturbación	X	L
Longitud primera en elevación de la perturbación	$h1$	L
Longitud segunda en elevación de la perturbación	$h2$	L
Longitud tercera en elevación de la perturbación	$h3$	L
Calado de aproximación a la estructura	$Y3$	L
Ancho canal	b	L
Magnitudes del Flujo		
Velocidad de aproximación a la estructura	$V3$	LT^{-1}
Gravedad	g	LT^{-2}
Magnitudes del Fluido		
Densidad de fluido	ρ	ML^{-3}

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE ESCOBAR.

Numero de magnitudes (r):	17
Magnitudes fundamentales m):	3
Números $\pi(r-m)$:	14

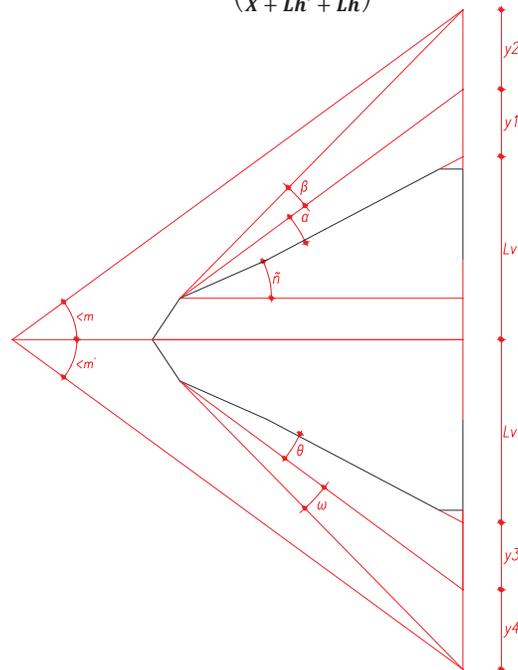
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE ESCOBAR.

$f(V3, Y3, \rho, g, Lh, Lh', Lv, Lv', b, y1, y2, y3, y4, h1, h2, h3, X)$

$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}, \pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{13}, \pi_{14})$

	L	M	T
V3	1	0	-1
Y3	1	0	0
ρ	-3	1	0
g	1	0	-2
Lh	1	0	0
Lh'	1	0	0
Lv	1	0	0
Lv'	1	0	0
b	1	0	0
y1	1	0	0
y2	1	0	0
y3	1	0	0
y4	1	0 <td 0	
h1	1	0	0
h2	1	0	0
h3	1	0	0
X	1	0	0

$$\begin{aligned} \angle \alpha &= \sin^{-1} \left(\frac{Lv - Lv' + y1}{\sqrt{Lh^2 + (Lv - Lv' + y1)^2}} \right) \sin^{-1} \left(\frac{Lv - Lv'}{\sqrt{Lh^2 + (Lv - Lv')^2}} \right) \\ \angle \beta &= \sin^{-1} \left(\frac{Lv - Lv' + y1 + y2}{\sqrt{Lh^2 + (Lv - Lv' + y1 + y2)^2}} \right) \sin^{-1} \left(\frac{Lv - Lv' + y1}{\sqrt{Lh^2 + (Lv - Lv' + y1)^2}} \right) \\ \angle \tilde{n} &= \sin^{-1} \left(\frac{Lv - Lv'}{\sqrt{Lh^2 + (Lv - Lv')^2}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{Lv - Lv'}{Lh} \right) \\ \angle m &= \tan^{-1} \left(\frac{Lv + y1 + y2}{X + Lh' + Lh} \right) \end{aligned}$$



π_1				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	g
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	-2

π_1	
RESULTADOS	
$\alpha =$	-2
$\beta =$	1
$\gamma =$	0

$$\pi_1 = \frac{Y_3}{V_3^2} * g = \frac{Y_3 * g}{V_3^2}$$

$$\pi_1 = \frac{\frac{m}{1}}{\frac{m^2}{s^2}} * \frac{m}{s^2} = \frac{m * s^2}{m^2} * \frac{m}{s^2}$$

$$\pi_1 = 1$$

Por Igualdad podemos realizar el siguiente artificio matemático:

$$1 = \frac{1^{-\frac{1}{2}}}{1^{-\frac{1}{2}}} = \frac{(Y_3 * g)^{-\frac{1}{2}}}{(V_3^2)^{-\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{V_3}{\sqrt{Y_3 * g}} = Fr$$

π_2				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	Lh
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_2	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_2 = \frac{1}{Y_3} * Lh$$

$$\pi_2 = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_2 = 1$$

π_3				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	Lh'
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_3	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_3 = \frac{1}{Y_3} * Lh'$$

$$\pi_3 = \frac{1}{m^2} * m^2$$

$$\pi_3 = 1$$

π_4				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	Lv
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_4	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_4 = \frac{1}{Y_3} * Lv$$

$$\pi_4 = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_4 = 1$$

π_5				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	Lv'
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_5	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_5 = \frac{1}{Y_3} * Lv'$$

$$\pi_5 = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_5 = 1$$

π_6				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	b
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_6	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_6 = \frac{1}{Y_3} * b$$

$$\pi_6 = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_6 = 1$$

π_7				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	y1
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_7	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_7 = \frac{1}{Y_3} * y1$$

$$\pi_7 = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_7 = 1$$

π_8				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	y2
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_8	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_8 = \frac{1}{Y_3} * y2$$

$$\pi_8 = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_8 = 1$$

π_9				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	y3
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_9	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_9 = \frac{1}{Y_3} * y_3$$

$$\pi_9 = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_9 = 1$$

π_{10}				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	y4
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_{10}	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_{10} = \frac{1}{Y_3} * y_4$$

$$\pi_{10} = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_{10} = 1$$

π_{11}				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	h1
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_{11}	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_{11} = \frac{1}{Y_3} * h1$$

$$\pi_{11} = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_{11} = 1$$

π_{12}				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	h2
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_{12}	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_{12} = \frac{1}{Y_3} * h2$$

$$\pi_{12} = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_{12} = 1$$

π_{13}				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	h_3
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_{13}	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_{13} = \frac{1}{Y_3} * h_3$$

$$\pi_{13} = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_{13} = 1$$

π_{14}				
Magnitud Fundamental	α	β	Y	X
L	1	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

π_{14}	
RESULTADOS	
$\alpha =$	0
$\beta =$	-1
$\gamma =$	0

$$\pi_{14} = \frac{1}{Y_3} * X$$

$$\pi_{14} = \frac{1}{m} * m$$

$$\pi_{14} = 1$$

Por lo tanto la función que relaciona los cuatro monomios adimensionales:

$$0 = f\left(\frac{V_3}{\sqrt{Y_3 * g}}, \frac{Lh}{Y_3}, \frac{Lh'}{Y_3}, \frac{Lv}{Y_3}, \frac{Lv'}{Y_3}, \frac{b}{Y_3}, \frac{y_1}{Y_3}, \frac{y_2}{Y_3}, \frac{y_3}{Y_3}, \frac{y_4}{Y_3}, \frac{h_1}{Y_3}, \frac{h_2}{Y_3}, \frac{h_3}{Y_3}, \frac{X}{Y_3}\right)$$

En este modelo las variaciones debidas a tensión superficial, así como por viscosidad son despreciables.

3.3 TEORÍA DE LA SEMEJANZA MECÁNICA.

Para el análisis de nuestro modelo se hace necesario estar en un sistema de flujo continuo de agua, dentro del campo físico de la hidráulica, esta teoría fue establecida por Kline: "Si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes, y si los valores de todos los parámetros y las condiciones se hacen idénticas, los sistemas deben exhibir comportamientos similares con tal de que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones." (Sotelo, 1985.)

3.3.1 Similitud geométrica

La similitud geométrica se logra cuando la relación entre las dimensiones longitudinales de la estructura prototipo están en una relación constante con la del sistema modelo, se tendrá una relación constante, en casos donde se deba realizar una distorsión de escalas se la realizará en un eje específico, es decir que siempre existirá una proporción estricta en cada eje, y una similitud estricta exige que esta proporción se cumpla en todos los ejes.

$$e_L = \frac{L_p}{L_m} = \frac{\text{Longitud en prototipo}}{\text{Longitud en modelo}}$$

3.3.2 Similitud cinemática

La similitud cinemática entre el sistema modelo y prototipo tiene relación directa con la semejanza geométrica entre las líneas de corriente de ambos flujos, sin distorsión en una similitud perfecta o con ella de ser necesaria o de presentarse.

La similitud cinemática tiene directa relación con el tiempo es decir que los fenómenos que se analicen en un sistema modelo semejante cinemáticamente a un sistema prototipo tendrán dependencia del tiempo es decir que siempre se manifestará el fenómeno en los mismos intervalos de tiempo e los dos sistemas.

Así se ha notado a la escala de tiempo por:

$$e_T = \frac{t_p}{t_m} = \frac{\text{intervalo tiempo en el sistema prototipo}}{\text{intervalo tiempo en el sistema modelo}}$$

Como conocemos ya las escalas de longitud y tiempo podemos inferir la escala tanto de la velocidad como de la aceleración.

$$e_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{\text{Velocidad en el sistema prototipo}}{\text{Velocidad en el sistema modelo}}$$

$$e_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{\text{Aceleración en el sistema prototipo}}{\text{Aceleración en el sistema modelo}}$$

3.3.3 Similitud dinámica

La similitud dinámica al igual que la similitud geométrica y la similitud cinemática, se general al tener una proporción constante entre el sistema modelo y el sistema prototipo, con las variables analizadas en el fenómeno, así en la similitud dinámica encontramos similitudes entre los dos sistemas generadas por los distintos términos de la ecuación de movimiento:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta s} + \frac{1}{\rho} \frac{\delta \tau}{\delta n} - g \frac{\delta z}{\delta s} = \frac{\delta}{\delta s} \left(\frac{V^2}{2} \right) + \frac{\delta v}{\delta t} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

“El primer término es debido al gradiente de presiones en la dirección de corriente, el segundo la fuerza de resistencia causada por la fricción interna y que induce a la disipación de energía; el tercero, la fuerza de peso (todas estas fuerzas son por unidad de masa), el cuarto termino (segundo miembro) es el cambio de energía cinética (aceleración convectiva) que experimenta la unidad de masa a lo largo de la línea de corriente; y el ultimo la aceleración local de la misma.” (Sotelo pág. 123)

Es decir que en esta similitud todas las fuerzas que afectan al estado inercial del flujo actúan de igual manera en el sistema modelo así como en el sistema prototipo.

Una vez que sabemos que la fuerza es función de la masa por la aceleración de la gravedad podemos obtener la escala de fuerzas (e_F) en función de los parámetros de la fuerza.

$$e_F = \frac{\text{fuerza inercial del sistema prototipo}}{\text{fuerza inercial del sistema modelo}} = \frac{mp \cdot ap}{mm \cdot am} = e_m \left(\frac{e_L}{e_T^2} \right)$$

mp es masa analizada en el sistema prototipo

ap es aceleración en el sistema prototipo

mm es masa analizada en el sistema modelo

am es aceleración en el sistema modelo

Es decir que para que se cumpla la similitud dinámica debe cumplirse implícitamente la similitud tanto geométrica como la similitud cinemática, esto se produce debido a la relación existente entre las fuerzas inherentes al sistema y el campo de flujo de la ecuación de movimiento.

3.3.4 SEMEJANZA HIDRÁULICA

No se puede nunca conseguir una semejanza de ningún tipo perfecta debido, a que ya por el hecho de un cambio de escala longitudinal se consigue una semejanza pero que no es perfecta, y para términos ingenieriles la perfección nunca se encuentra presente en el desarrollo de nuestra vida profesional pues realizamos o asumimos que se cumplen en muchos casos condiciones idóneas que no siempre suelen ser así, pero que para el fin de nuestros análisis funcionan muy bien. Es así que confinaremos la perfección de una semejanza para un campo netamente teórico poco funcional en la vida real.

“Del análisis dimensional del fenómeno hidráulico, se define las variables o magnitudes físicas que intervienen así como la relación funcional que las relaciona y que permite explicitar matemáticamente al fenómeno por:

$V = \Phi \left(\frac{d}{a}, \frac{d}{b}, \frac{d}{c}, Fr, Re, We, Ma \right) * \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$ (Hidalgo, M. "Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas". Quito. Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional.)

En donde:

V es la velocidad del flujo

Φ es un parámetro adimensional

a,b,c son magnitudes genéricas de la geometría de cualquier estructura hidráulica

Fr es el número de Froude

Re es el número de Reynolds

We es el número de Weber

Ma es el número de Mach

Δp es la diferencia de presión entre dos puntos

P es la densidad del fluido

Estas variables descritas deben tener el mismo comportamiento tanto en el sistema modelo como en el sistema prototipo pues se debe cumplir con la semejanza mecánica y así obtenemos relaciones tanto entre las relaciones físicas así como también entre las escalas.

Partiendo del análisis de la ecuación $V = \Phi \left(\frac{d}{a}, \frac{d}{b}, \frac{d}{c}, Fr, Re, We, Ma \right) * \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$ se puede deducir una expresión que está en función de las escalas de fuerza, de longitud, de tiempo y de masa.

$$e_F = \frac{\Phi_m^2}{\Phi_p^2} * e_M * \frac{e_L}{e_T^2}$$

Donde claramente se puede inferir que la absoluta semejanza mecánica solo se podrá alcanzar si $\frac{\Phi_m^2}{\Phi_p^2} = 1$, además de la igualdad en los números de Fr, Re, W, Ma, por lo tanto como se habló anteriormente tan solo el prototipo es semejante así mismo estrictamente hablando pues es el único que infinitesimalmente cumple con las condiciones de semejanza mecánica. Por lo que la adopción de escalas próximas o que tiendan a 1 por la izquierda o derecha serán necesarias y se las entenderá como un valor absoluto de escala 1, pero esta simplificación introduce al modelo desviaciones que se las conoce como "Efectos de escala".

3.4 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA

Para cumplir con la similitud dinámica el modelo deberá cumplir con la similitud según el criterio de Euler siendo esta condición en orden la primera a tomar en cuenta.

Dentro de la caracterización del modelo lo más práctico, viable, y posible, es encontrar la fuerza más importante que predomina en el fenómeno hidráulico en el prototipo y reproducirlo en el modelo a través de la concepción en el modelo con objetividad en un solo parámetro ya sea Fr , Re , W , Ma es decir que este parámetro sea el mismo en el prototipo así como en el modelo.

Como no existe la similitud hidráulica perfecta, se trata de alcanzar una restringida o particular, dependiendo del fenómeno en estudio que estamos estudiando, se tiene a groso modo las siguientes:

TABLA N° 3.2

FUERZA PREDOMINANTE	IDENTIDAD	SIMILITUD PARTICULAR	TIPO DE MODELO
Fg gravitacional	$Fr = Fr_m$	Froude	Froudiano
F_μ viscosa	$Re = Re_m$	Reynolds	Viscoso
F_δ tensión superficial	$W = W_m$	Weber	-
F_E elástica	$Ma = Ma_m$	Mach	Elástico
F_g, F_μ	$Fr = Fr_m$; y, $Re = Re_m$ (simultáneo)	Froude - Reynolds	Grávico - Viscoso

**FUENTE: SOTELO
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE**

3.4.1 SIMILITUD DE FROUDE

Una vez que en el análisis del fenómeno determinamos que la fuerza gravitacional es la fuerza preponderante, y de esta manera las otras fuerzas y su incidencia en el comportamiento del fenómeno físico hidráulico es imperceptible, se debe cumplir con la similitud froudiana es decir que el número de Froude deberá ser el mismo tanto en el sistema modelo como en el sistema prototipo.

Deberemos verificar que se cumpla que $\frac{Fr_p}{Fr_m} = 1$ ó $\frac{Fr_p^2}{Fr_m^2} = 1$ y desarrollando Fr tanto del modelo como del prototipo en función de L, Y, ρ tendremos:

Esta expresión en función de escalas será:

$$e_T = \frac{e_L^{1/2}}{e_{\left(\frac{Y}{\rho}\right)}^{1/2}} = \frac{\sqrt{e_L}}{\sqrt{\frac{\gamma_p}{\gamma_m} \frac{\rho_p}{\rho_m}}}$$

Pero como el fluido es el mismo tanto en el sistema prototipo como en el sistema modelo tenemos que:

$$\gamma_p = \gamma_m; \rho_p = \rho_m$$

$$g_p = g_m$$

Reemplazando se tendrá:

$$e_T = e_L^{1/2}$$

Para un modelo de similitud froudiano que utiliza un fluido agua, tenemos las siguientes escalas de magnitudes:

TABLA N° 3.3

MAGNITUD	SÍMBOLO	EQUIVALENCIA
Longitud	e_L	e_L
Tiempo	e_T	$e_L^{1/2}$
Velocidad	e_V	$e_L^{1/2}$
Aceleración	e_A	1
Caudal	e_Q	$e_L^{5/2}$
Presión	e_P	e_L
Energía	e_E	e_L^4
Fuerza	e_F	e_L^3

ELABORADO POR: CARLO MICHEL ANDRADE

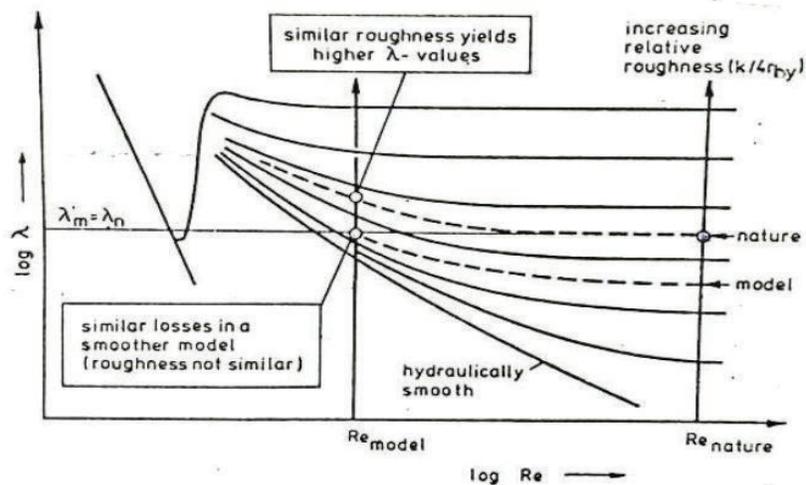
3.4.2 EFECTOS DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL Y VISCOSIDAD

Debido a la similitud restringida de Froude se debe tener el mismo número de Froude tanto en el sistema prototipo así como también en el sistema modelo entendiendo que el número de Froude tiene relación directa con la velocidad y las fuerzas gravitatorias, para llegar a una similitud mecánica de igual manera se debe tener una relación de semejanza en el número de Reynolds tanto en el sistema prototipo así como también en el sistema modelo, de ahí que el número de Reynolds en el sistema modelo será siempre menor que el número de Reynolds en el sistema prototipo, se tendrá:

$$e_R = e_L^{3/2}$$

No se tendrá consecuencia alguna en los resultados de la modelación si el flujo está en la región hidráulicamente rugosa en los dos sistemas tanto en el modelo como en el prototipo, el coeficiente de pérdidas por fricción se puede observar en la siguiente figura:

GRAFICO N° 3.1: SIMILITUD EN MODELO PARA PERDIDAS DE ENERGÍA EN MODELOS FROUDIANOS CON EFECTOS DE VISCOSIDAD Y RUGOSIDAD.



Fuente: Kobus H. (1978). "Hydraulic Modeling". DVWW. Mitteilungsheft N° 4. Germany

Las superficies del modelo son más lisas que las del prototipo.

En el sistema modelo por tener geometrías más pequeñas que el modelo donde se hace mucho más evidente el efecto de la tensión superficial y la viscosidad, el efecto viscoso se compensa al elegir la rugosidad del modelo la cual se determina de tal manera de que se obtenga el mismo coeficiente de pérdidas por fricción λ en el sistema modelo así como en el sistema prototipo.

$$\lambda = \frac{h_V}{L} * \frac{8gh_y}{V^2} = \left(\frac{h_V}{L}\right) * \frac{8}{Fr^2} \quad \text{Ecuación N° 3.2}$$

Los modelos por tener una escala longitudinal menor que la del prototipo deben garantizar que se cumplan ciertas condiciones de similitud entre esas se debe tener un número de Reynolds tal que permita una longitud de turbulencia totalmente desarrollada considerando que se tiene una similitud restringida de Froude se debe garantizar que la viscosidad y sus fuerzas no generen errores sustanciales o que interfieran con los fenómenos analizados en el sistema llamado modelo, por lo que debemos garantizar que el flujo en el sistema modelo sea turbulento y esté totalmente desarrollado.

Esto se consigue con números de Reynolds en el modelo mayor a 2×10^4 .

En el sistema prototipo la tensión superficial no es preponderante para los fines de estudio en el cual nos enfocamos, debido a esto en la mayoría de casos no es necesario un análisis del efecto de la tensión superficial, pero en el sistema modelo es necesario tener cuidado debido a que el efecto de la fuerza generada por la tensión superficial es de gran importancia en función de la escala geométrica siendo más evidente la presencia de esta fuerza mientras más pequeño es el modelo debido a la escala longitudinal utilizada.

Como debemos tomar muy en cuenta la presencia de estas fuerzas debemos tomar en cuenta varios criterios y recomendaciones en la construcción del sistema llamado modelo como son:

- a) Mientras más pequeño es el sistema modelo en función de la escala longitudinal se incrementará el efecto de las fuerzas generadas por la tensión superficial, esta relación deberá ser menor a 100 de ser posible.

$$e_L < 100$$

Con esto se busca reducir al máximo los efectos de la tensión superficial.

- b) El efecto de la tensión superficial en los bordes de orificios, vertederos, paredes etc., se intensifica mientras menor sea la escala longitudinal pero podemos minimizar este efecto si colocamos una capa de una solución jabonosa que lo que hace es debilitar la membrana superficial del agua que se genera por las fuerzas de atracción intermolecular o tensión superficial, esta solución puede venir en una presentación en base gel, en barra, o aerosol, y tendrá efecto en las proximidades de la región de la estructura en la que se le aplique.

- c) Para limitar los efectos generados por la tensión superficial en el sistema modelo, experimentalmente se ha comprobado que el calado de manera general no deberá ser menor a 2 o 3 centímetros lo que ayudara a perder los efectos de las fuerzas antes mencionadas.

Para validar que no sean importantes los efectos de la tensión superficial en el sistema modelo deberemos comprobar la siguiente expresión que se muestra en la literatura (Ranga, Raju K.G. (1997). "Flow Through Open Channels". Tata Mc Graw Hill.)

$$Re^{0.2} * We^{0.6} > 900 ; e = \frac{V}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho * \delta}}} ; Re = \frac{V * 4 * R_h}{\nu} \quad \text{Ecuación N° 3.3}$$

En donde:

V es la velocidad (m/s)

ρ es la densidad del agua (1000 kg/m³)

δ es la tensión superficial del agua (7.39 * 10⁻³ kg/m)

d es la longitud característica, se toma como longitud característica al R_h (m)

R_h es el radio hidráulico (m)

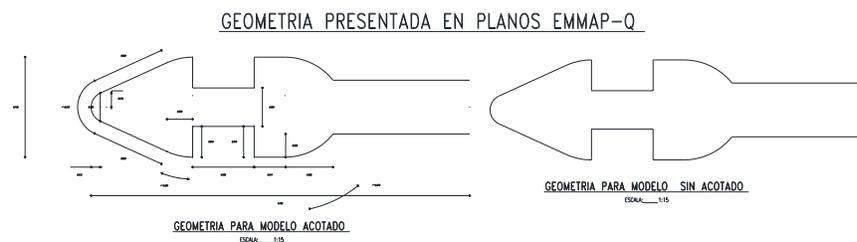
ν es la viscosidad cinemática del agua (1*10⁻⁶ m²/s)

3.5 SELECCIÓN DE LA ESCALA

3.5.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA ESCALA

Habiendo analizado el espacio físico, las dimensiones del canal hidrodinámico, las capacidades de apertura de la compuerta para generar un flujo supercrítico, la capacidad de las bombas de impulsión del laboratorio a utilizar, y que se pueda cumplir los criterios de la ley de similitud, que ya fue tratado en numerales anteriores se ha podido escoger tres geometrías de tabiques bifurcadores las cuales son:

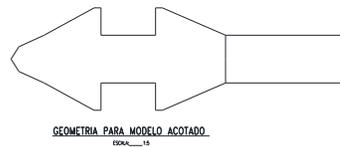
FIGURA N° 3.6: GEOMETRÍA DEL TABIQUE BIFURCADOR NO. 1



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FIGURA N° 3.7: GEOMETRÍA DEL TABIQUE BIFURCADOR NO. 2

GEOMETRIA REAL DE LA ESTRUCTURA



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FIGURA N° 3.8: GEOMETRÍA DEL TABIQUE BIFURCADOR NO. 3

GEOMETRIA PROPUESTA



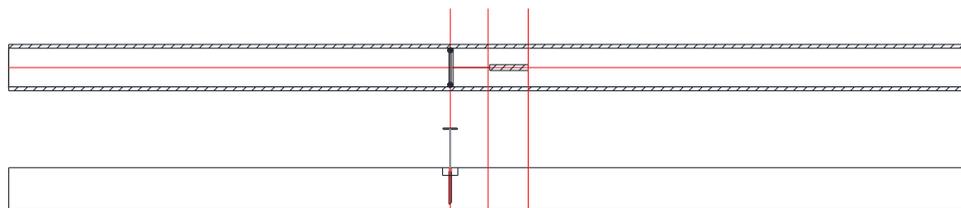
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Con estas geometrías debemos hacer un análisis de las capacidades inherentes al laboratorio a utilizarse en nuestro caso es el laboratorio de modelación física del CIERHI (Centro de Investigación y Estudios de Recursos Hídricos) el análisis a realizarse será en función de:

- Espacio Físico
- Capacidad de las bombas
- Disponibilidad de materiales a utilizarse en el modelo físico
- Instrumentación para calibraciones
- Costo de construcción y operación

En función de los parámetros anteriores se ha tomado la mejor decisión debido a que se usará el canal hidrodinámico el cual se detalla a continuación:

FIGURA N° 3.9 CANAL HIDRODINÁMICO VISTA SUPERIOR Y CORTE LONGITUDINAL



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Además entendiendo que mientras más grande sea el sistema modelo mayor será la proximidad con la realidad de los distintos parámetros a utilizarse.

3.5.2 SELECCIÓN DE ESCALA GEOMÉTRICA EN EL SISTEMA MODELO

Se realizó un análisis en función de los diversos parámetros debido a que la escala geométrica deberá ser la idónea para que no se generen perturbaciones, así se presenta el cuadro No. de análisis a continuación:

CUADRO N° 3.2: SELECCIÓN DE LA ESCALA PARA EL SISTEMA MODELO:

Escala	Canal						Tabique Bifurcador													
	Longitud Proyecto		Ancho Proyecto		Altura Proyecto		Longitud Proyecto		Ancho Proyecto		Altura Proyecto		Caudal Min Proyecto		Caudal Max Proyecto		Vel. Min Proy.		Vel. Max Proy.	
	Lp	Bp	Hp	Lp	Bp	Hp	Lp	Bp	Hp	Lp	Bp	Hp	Qp	Qp	Qp	Qp	Vp	Vp	Vp	Vp
	60 (m)	11,25 (m)	5,3 (m)	12 (m)	0,35 (m)	5,3 (m)	30 (m ³ /s)	115 (m ³ /s)	0,43 (m/s)	1,667 (m/s)										
Longitud Modelo	Ancho Modelo	Altura Modelo	Longitud Modelo	Ancho Modelo	Altura Modelo	Caudal Modelo (l/s)	Caudal Modelo	Vel. Modelo (m/s)	Vel. Modelo											
$Lm = \frac{Lp}{e^1}$	$Bm = \frac{Bp}{e^1}$	$Hm = \frac{Hp}{e^1}$	$Lm = \frac{Lp}{e^1}$	$Bm = \frac{Bp}{e^1}$	$Hm = \frac{Hp}{e^1}$	$Qm = \frac{Qp}{e^{3/2}}$	$Qm = \frac{Qp}{e^{3/2}}$	$Vm = \frac{Vp}{e^{1/2}}$	$Vm = \frac{Vp}{e^{1/2}}$											
1 : 1	60,000	11,250	5,30	12,00	0,350	5,30	30000,00	115000,00	0,43	1,67										
1 : 2	30,000	5,625	2,65	6,00	0,175	2,65	5303,30	20329,32	0,31	1,18										
1 : 3	20,000	3,750	1,77	4,00	0,117	1,77	1924,50	7377,25	0,25	0,96										
1 : 4	15,000	2,813	1,33	3,00	0,088	1,33	937,50	3593,75	0,22	0,83										
1 : 5	12,000	2,250	1,06	2,40	0,070	1,06	536,66	2057,18	0,19	0,75										
1 : 6	10,000	1,875	0,88	2,00	0,058	0,88	340,21	1304,13	0,18	0,68										
1 : 7	8,571	1,607	0,76	1,71	0,050	0,76	231,41	887,06	0,16	0,63										
1 : 8	7,500	1,406	0,66	1,50	0,044	0,66	165,73	635,29	0,15	0,59										
1 : 9	6,667	1,250	0,59	1,33	0,039	0,59	123,46	473,25	0,14	0,56										
1 : 10	6,000	1,125	0,53	1,20	0,035	0,53	94,87	363,66	0,14	0,53										
1 : 11	5,455	1,023	0,48	1,09	0,032	0,48	74,75	286,56	0,13	0,50										
1 : 12	5,000	0,938	0,44	1,00	0,029	0,44	60,14	230,54	0,13	0,48										
1 : 13	4,615	0,865	0,41	0,92	0,027	0,41	49,23	188,73	0,12	0,46										
1 : 14	4,286	0,804	0,38	0,86	0,025	0,38	40,91	156,81	0,12	0,45										
1 : 15	4,000	0,750	0,35	0,80	0,023	0,35	34,43	131,97	0,11	0,43										
1 : 16	3,750	0,703	0,33	0,75	0,022	0,33	29,30	112,30	0,11	0,42										
1 : 17	3,529	0,662	0,31	0,71	0,021	0,31	25,18	96,51	0,11	0,40										
1 : 18	3,333	0,625	0,29	0,67	0,019	0,29	21,82	83,66	0,10	0,39										
1 : 19	3,158	0,592	0,28	0,63	0,018	0,28	19,07	73,08	0,10	0,38										
1 : 20	3,000	0,563	0,27	0,60	0,018	0,27	16,77	64,29	0,10	0,37										

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Una vez analizados los distintos criterio de similitud se escoge la escala longitudinal 1:5, a esta escala se puede observar de manera idónea el fenómeno, además por las dimensiones del canal hidrodinámico imposibilita la utilización de una geometría con dimensiones mayores.

No se presenta un problema ni de viscosidad aún menos de tensión superficial debido a que el régimen del flujo es supercrítico. La similitud se da en función del número de Froude como lo habíamos analizado con anterioridad.

Esta escala será utilizada en las tres geometrías.

3.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3

Después de realizar el análisis dimensional se concluyó que es un modelo que tiene una similitud de Froude, en el que la tensión superficial y la viscosidad del agua no se toman en cuenta por ser un factor despreciable en el desarrollo de los ensayos.

La escala utilizada genera una facilidad en la observación del fenómeno hidráulico, lo que permite evidenciar el comportamiento del flujo en el desarrollo del estudio.

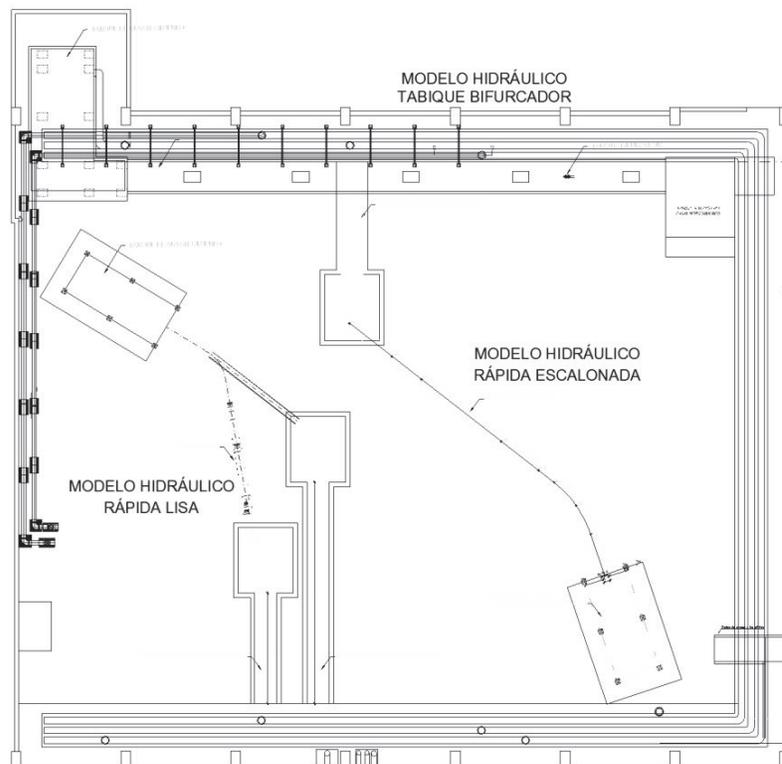
CAPITULO 4

CONSTRUCCIÓN INSTRUMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO

El desarrollo de la investigación concerniente a los modelos de los tres tabiques bifurcadores se desarrolló en las instalaciones del laboratorio del Centro de Investigación y Estudios en Recursos Hídricos – C.I.E.R.H.I – EPN, nuestro modelo se encuentra precisamente en el canal hidrodinámico de las instalaciones antes mencionadas como se muestra a continuación:

FIGURA N° 4.10: IMPLANTACIÓN MODELO FÍSICO LABORATORIO CIERHI



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

El laboratorio cuenta con cuatro bombas de impulsión cuando trabajan al mismo tiempo tienen una capacidad máxima de 800 l/s, caudal que circula por cuatro tuberías que se encuentran en un canal bajo el suelo, por estas tuberías se derivan los caudales requeridos a través de distintas tomas que abastecen a los modelos físicos, una de estas derivaciones abastece al canal hidrodinámico donde se realiza la modelación del tabique bifurcador.

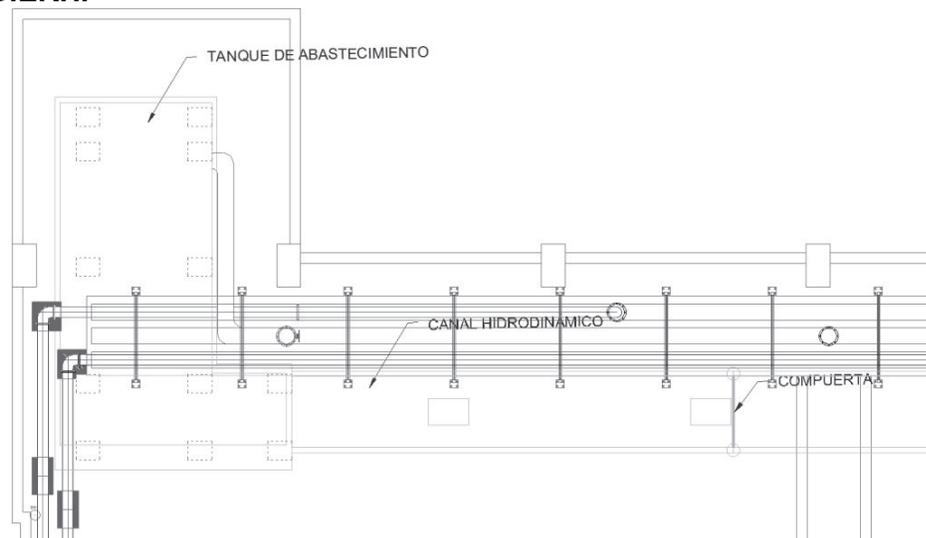
4.1.1 ZONA DE INGRESO AL MODELO

Hemos asignado tres zonas para el análisis de nuestro modelo: (1) Tanque de ingreso, uniformización, aforo, canal hidrodinámico, compuerta, (2) Modelo del tabique bifurcador de flujo de aproximación en flujo supercrítico, (3) Canales y vertederos de reingreso de caudales al canal de recirculación del laboratorio del CIERHI – EPN.

4.1.1.1 *Tanque de ingreso, uniformización, aforo, canal hidrodinámico, compuerta.*

Estas estructuras son parte integral del canal hidrodinámico como se muestra en la figura.

FIGURA N° 4.11 IMPLANTACIÓN DEL TANQUE DE ABASTECIMIENTO EN EL LAB. CIERHI



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Se realiza el aforo del caudal de ingreso al canal hidrodinámico por un vertedero triangular de 90° . Aguas abajo se ha colocado una compuerta para la generación de flujo en régimen supercrítico.

FOTO N° 4.5



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.6



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.7



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.8



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.9



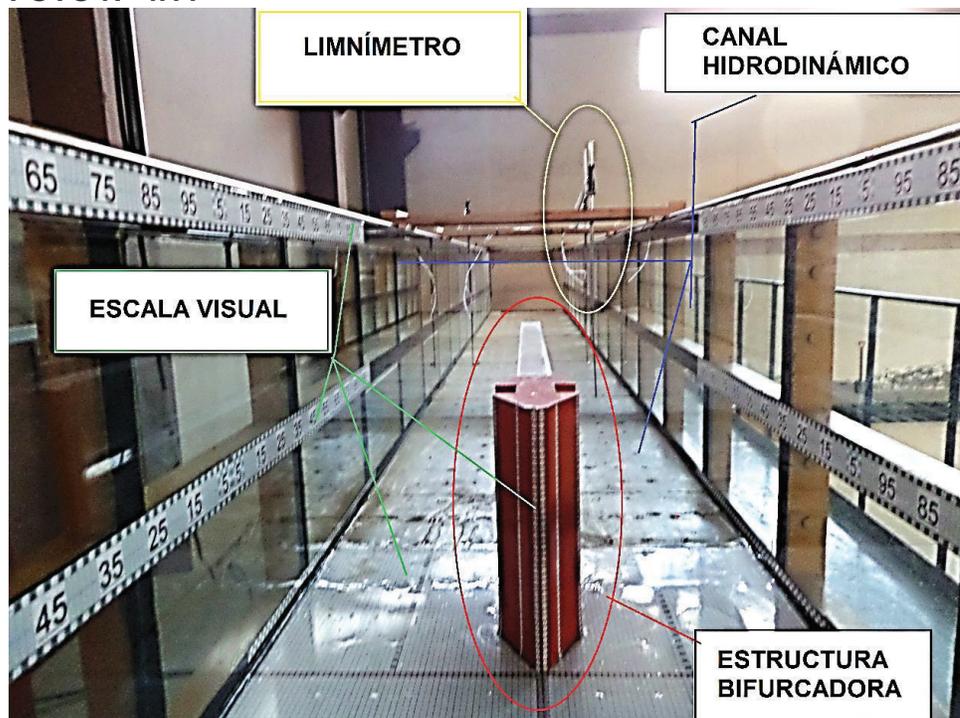
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.10



ELABORADO POR: CARLOS ANDRADE

FOTO N° 4.11



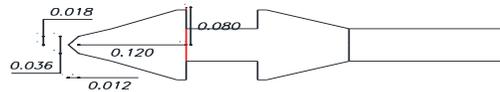
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.1.2 MODELOS FÍSICOS PROPIAMENTE DICHOS

4.1.2.1 Modelo Estructura tipo No.1

Nuestro modelo cumple con una similitud restringida de Froude y como se realizó el análisis de escalas en el capítulo anterior, la escogida para nuestra geometría es 1:5, la cual nos permite visualizar de buena manera el fenómeno, el modelo cuenta con el canal hidrodinámico y la estructura bifurcadora, en el siguiente esquema se muestra el modelo de la Estructura No 1 en planta y corte y sus principales dimensiones.

FIGURA N° 4.12 ESTRUCTURA NO 1 VISTA EN PLANTA



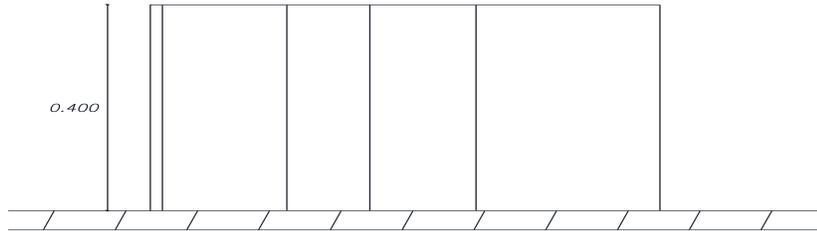
ESTRUCTURA No 1

PLANTA

ESCALA: _____ 1:5



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FIGURA N° 4.13 ESTRUCTURA NO.1 LATERAL

ESTRUCTURA No 1

ELEVACIÓN

ESCALA: _____ 1:5

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En la siguiente fotografía se visualiza el modelo

FOTO N° 4.12

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.13

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Para realizar la estructura (tabique bifurcador con flujo de aproximación con régimen supercrítico) No. 1 se utilizó madera colorado de la costa ecuatoriana pre-secada como se muestra a continuación:

FOTO N° 4.14

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.15



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.16



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.17



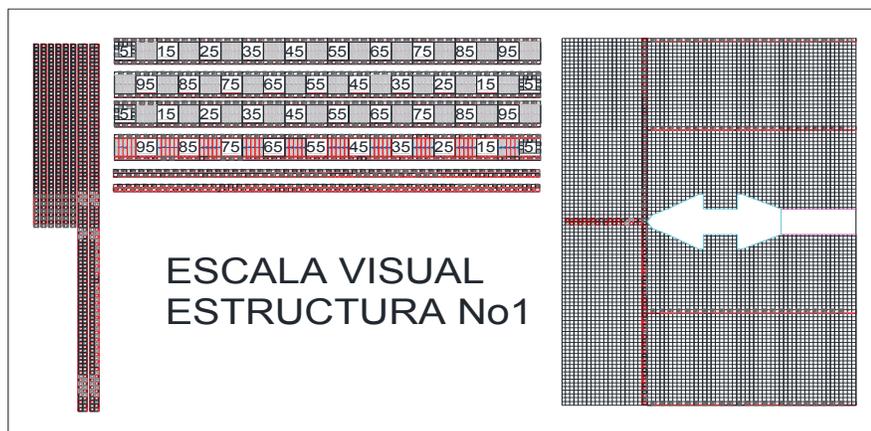
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.1.2.1.1 *Diseño Fabricación e Instalación de la Escala Visual para la Estructura No 1.*

Para la cuantificación del fenómeno se vio la necesidad de generar una escala visual que permita observar las longitudes con las cuales podamos obtener los ángulos que se generan en la línea de flujo en el paso del fluido por el tabique, en este caso se desarrolló las escalas a nivel grafico computacional para luego imprimirlas en papel acrílico adhesivo .

A continuación se muestran las escalas visuales generadas para la Estructura N

FIGURA N° 4.14 ESCALA VISUAL ESTRUCTURA NO. 1



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En las siguientes imágenes se muestra el proceso de instalación de las escalas visuales.

FOTO N° 4.18

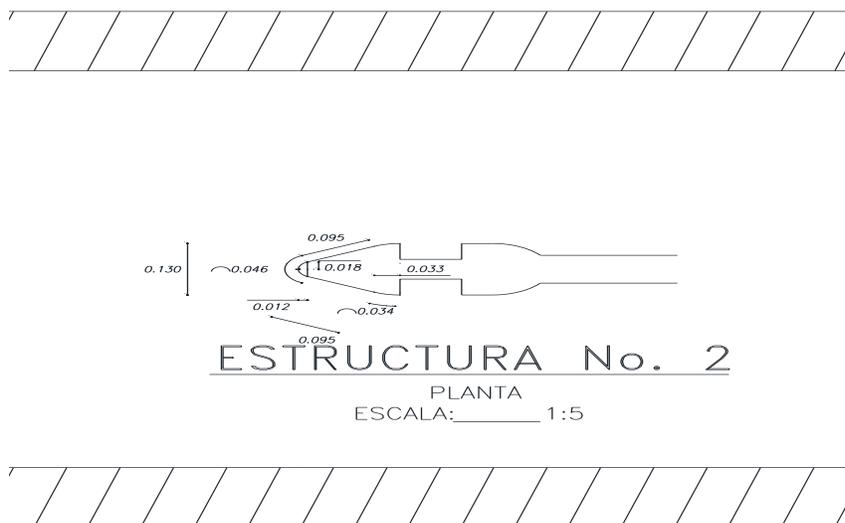


ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

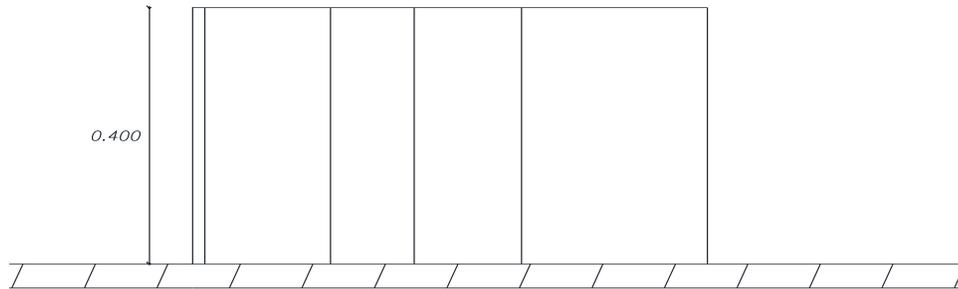
4.1.2.2 Modelo Estructura tipo No.2

Nuestro modelo cumple con una similitud restringida de Froude y como se realizó el análisis de escalas en el capítulo anterior, la escogida para nuestra geometría es 1:5, la cual nos permite visualizar de buena manera el fenómeno, el modelo cuenta con el canal hidrodinámico y la estructura bifurcadora, en el siguiente esquema se muestra el modelo de la Estructura No 2 en planta y corte y sus principales dimensiones.

FIGURA N° 4.15 ESTRUCTURA NO 2 VISTA EN PLANTA



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FIGURA N° 4.16 ESTRUCTURA NO 2 VISTA LATERAL

ESTRUCTURA No 2

ELEVACIÓN

ESCALA: _____ 1:5

REALIZADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Para realizar la estructura (tabique bifurcador con flujo de aproximación con régimen supercrítico) No. 2 se utilizó madera colorado de la costa ecuatoriana pre-secada se siguió los pasos mostrados para la elaboración de la Estructura No1 y el resultado es el siguiente:

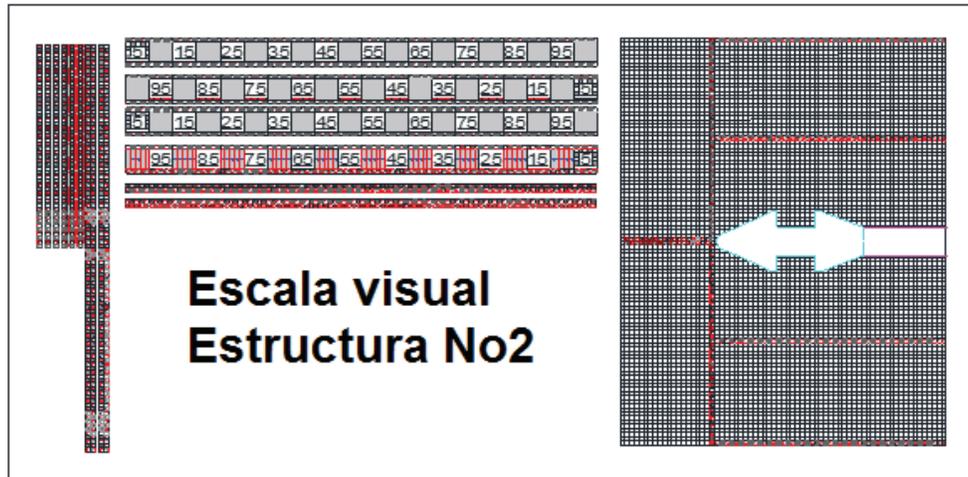
FOTO N° 4.19

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.1.2.2.1 Diseño Fabricación e Instalación de la Escala Visual para la Estructura No 2.

Para la cuantificación del fenómeno se vio la necesidad de generar una escala visual que permita observar las longitudes con las cuales podamos obtener los ángulos que se generan en la línea de flujo en el paso del fluido por el tabique, en este caso se desarrolló las escalas a nivel grafico computacional para luego imprimirlas en papel acrílico adhesivo .

IMAGEN N° 4.1 ESCALA VISUAL ESTRUCTURA NO. 2



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En las siguientes imágenes se muestra el proceso de instalación de las escalas visuales.

FOTO N° 4.20

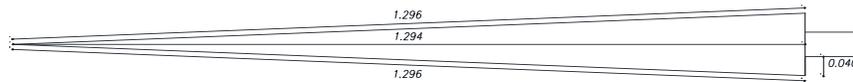


ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.1.2.3 Modelo Estructura tipo No.3

Nuestro modelo cumple con una similitud restringida de Froude y como se realizó el análisis de escalas en el capítulo anterior, la escogida para nuestra geometría es 1:5, la cual nos permite visualizar de buena manera el fenómeno, el modelo cuenta con el canal hidrodinámico y la estructura bifurcadora, en el siguiente esquema se muestra el modelo de la Estructura No 3 en planta y corte y sus principales dimensiones.

FIGURA N° 4.17 VISTA EN PLANTA ESTRUCTURA NO.3



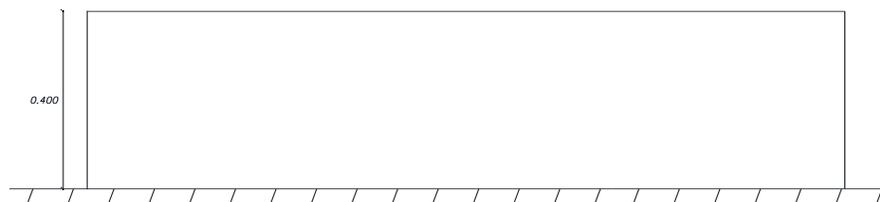
ESTRUCTURA No. 3

PLANTA
ESCALA: _____ 1:5



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FIGURA N° 4.18 VISTA LATERAL ESTRUCTURA NO.3



ESTRUCTURA No 3

ELEVACIÓN
ESCALA: _____ 1:5

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Para realizar la estructura (tabique bifurcador con flujo de aproximación con régimen supercrítico) No. 3 se utilizó acrílico de 4 mm de espesor, se siguió los pasos mostrados para la elaboración de la Estructura No3 y el resultado es el siguiente:

FOTO N° 4.21



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.22



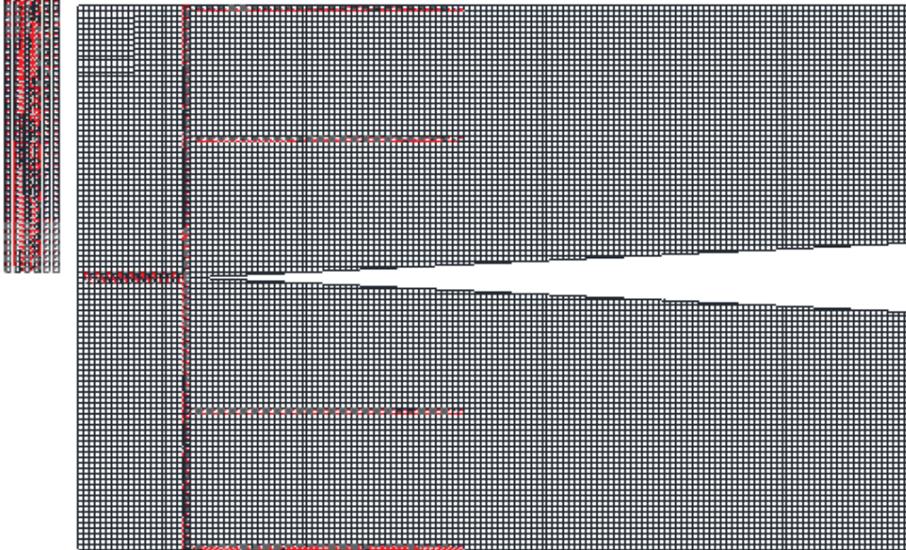
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.1.2.3.1 Diseño Fabricación e Instalación de la Escala Visual para la Estructura No 3.

Para la cuantificación del fenómeno se vio la necesidad de generar una escala visual que permita observar las longitudes con las cuales podamos obtener los ángulos que se generan

en la línea de flujo en el paso del fluido por el tabique, en este caso se desarrolló las escalas a nivel grafico computacional para luego imprimirlas en papel acrílico adhesivo .

GRÁFICO N° 4.2 ESCALA VISUAL ESTRUCTURA NO. 3



Escala visual Estructura No. 3

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En las siguientes imágenes se muestra el proceso de instalación de las escalas visuales.

FOTO N° 4.23



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.24



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.1.2.4 ZONA DE SALIDA CANALES DE DESCARGA

Los caudales descargados por los modelo de la estructura No.1, No.2, No.3, son restituidos al sistema de recirculación a través de los tanques de descarga que pertenecen al canal hidrodinámico.

FOTO N° 4.25



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.2 INSTRUMENTACIÓN DE LOS MODELOS

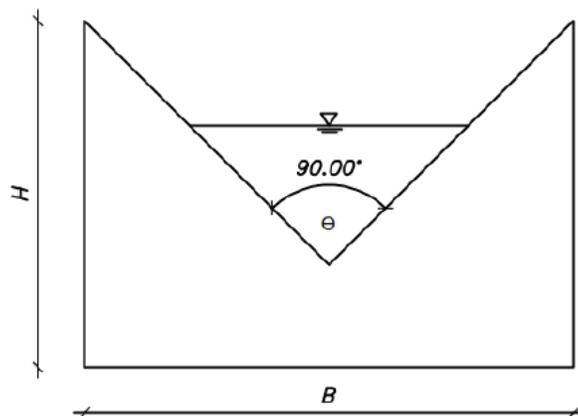
4.2.1 VERTEDERO TRIANGULAR DE PARED DELGADA $\theta=90^\circ$

La alimentación por parte del tanque de carga hacia el canal hidrodinámico está dado por un vertedero de pared delgada con un ángulo de escotadura de $\theta=90^\circ$, el cual permite la medición o aforo de los caudales de paso desde el tanque de carga hacia el canal hidrodinámico.

El vertedero está fabricado a partir de una lámina de acero de 9mm de espesor, con guías laterales de ángulo 50 x 50 x 50.

(Véase la figura en el numeral 3.1.1.1)

FIGURA N° 4.18



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

La ecuación para determinar el caudal por medio de las vertederos triangulares rectangulares es (Sotelo, G. (1997). "Hidráulica General". México. Editorial Limusa):

$$Q = C * h^{5/2} \text{ (Ecuación N° 4.3)}$$

En donde:

Q es el caudal (m^3/s)

C es $\frac{8}{15}\sqrt{2g\mu}$, coeficiente que depende θ , μ y la gravedad

μ es el coeficiente que considera la contracción de la lámina vertiente sobre el vertedero

h es la altura de agua sobre la cresta del vertedero (m).

Una vez realizado los distintos aforos y con un análisis de datos exhaustivo se generó una curva de descarga experimental debido a que ninguna de las ecuaciones presentadas en la literatura técnica reflejó el comportamiento del vertedero así tenemos que la ecuación para nuestro vertedero es:

$$Q_{exp} = 0.0188h^{2.4392} \text{ (Ecuación N° 4.4)}$$

4.2.2 LIMNÍMETRO

Se han instalado tres milímetros para medir la carga en el tanque, así como un limnómetro aguas arriba de la compuerta uno en la aproximación al modelo y uno aguas abajo del modelo, los Limnómetros nos permiten medir la altura o calado, él tiene un rango de entre 0 a 600 mm con una precisión de 0.1 mm.

FOTO N° 4.26



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.2.3 PROBETA

Este instrumento es un recipiente graduado que permite medir volúmenes de manera precisa cuando realizamos el aforo del vertedero, tiene un litro de capacidad y su precisión es de 1ml.

4.3 CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS FÍSICOS

Se realizará un análisis para validar la calibración del modelo, mediante la similitud froudiana, lo que nos dará la posibilidad de realizar una comparación entre el sistema modelo y el sistema prototipo.

4.3.1 CALIBRACIÓN DEL VERTEDERO DE ALIMENTACIÓN AL CANAL HIDRODINÁMICO.

Se deberá realizar una calibración del vertedero de alimentación por medio de un aforo físico para los caudales que sean posibles, este tipo de aforo si bien es cierto presenta una dificultad física para el aforo por el caudal a ser aforado es necesario, se obtiene una curva experimental, lo cual nos permitirá obtener datos de los caudales que ingresan al sistema modelo con respecto a la carga sobre el vertedero.

FOTO N° 4.27



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.28



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.29



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 4.30



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.3.1.1 CURVA EXPERIMENTAL DE DESCARGA PARA VERTEDERO TRIANGULAR DE PARED DELGADA CON ANGULO $\theta = 90^\circ$

Se realizó un aforo físico el cual contabiliza los caudales aforados que nos permitirán tener una relación directa con la carga sobre el vertedero a continuación observamos los datos obtenidos.

CUADRO N° 4.3

Experimental											
					$h_0 1$ (cm)	$h_0 2$ (cm)	$h_0 3$ (cm)				
					36,29	34,3	35,7				
No Prueba	Numero de Ensayos	Volumen Aforado (lit)	Tiempo (s)	Caudal (lit/s)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	Δh_1 (cm)	Δh_2 (cm)	Δh_3 (cm)	Δh_{prom} (cm)
1	1	29,062	2,7	10,76	49,42	47,55	48,9	13,13	13,25	13,20	13,193
	2	31,75	2,9	10,95	49,42	47,55	48,9	13,13	13,25	13,20	13,193
	3	29,585	2,78	10,64	49,42	47,55	48,9	13,13	13,25	13,20	13,193
	4	27,54	2,785	9,89	49,42	47,55	48,9	13,13	13,25	13,20	13,193
	5	31,87	3,09	10,31	49,42	47,55	48,9	13,13	13,25	13,20	13,193
Promedio		29,96	2,85	10,51							13,193
2	1	36	1,93	18,65	53,36	51,35	52,75	17,07	17,05	17,05	17,057
	2	31,64	1,62	19,53	53,36	51,35	52,75	17,07	17,05	17,05	17,057
	3	29,85	1,68	17,77	53,36	51,35	52,75	17,07	17,05	17,05	17,057
	4	33,13	1,78	18,61	53,36	51,35	52,75	17,07	17,05	17,05	17,057
	Promedio		32,655	1,7525	18,63						
3	1	18,81	3,4	5,53	46,44	44,5	45,87	10,15	10,20	10,17	10,173
	2	17,13	2,93	5,85	46,44	44,5	45,87	10,15	10,20	10,17	10,173
	3	22	4,05	5,43	46,44	44,5	45,87	10,15	10,20	10,17	10,173
	4	19,8	3,62	5,47	46,44	44,5	45,87	10,15	10,20	10,17	10,173
	5	22,53	4,15	5,43	46,44	44,5	45,87	10,15	10,20	10,17	10,173
Promedio		20,05	3,63	5,54							10,173
4	1	34,34	3,91	8,78	48,495	46,575	47,96	12,21	12,28	12,26	12,247
	2	24,71	2,71	9,12	48,495	46,575	47,96	12,21	12,28	12,26	12,247
	3	25,51	3,16	8,07	48,495	46,575	47,96	12,21	12,28	12,26	12,247
	4	27,55	3,27	8,43	48,495	46,575	47,96	12,21	12,28	12,26	12,247
	5	22,01	2,55	8,63	48,495	46,575	47,96	12,21	12,28	12,26	12,247
Promedio		26,82	3,12	8,61							12,247
5	1	28	2,32	12,07	52,9	48,355	49,72	16,61	14,06	14,02	14,895
	2	36,65	2,98	12,30	52,9	48,355	49,72	16,61	14,06	14,02	14,895
	3	25,12	2,01	12,50	52,9	48,355	49,72	16,61	14,06	14,02	14,895
	4	28,21	2,35	12,00	52,9	48,355	49,72	16,61	14,06	14,02	14,895
	5	34,7	2,8	12,39	52,9	48,355	49,72	16,61	14,06	14,02	14,895
Promedio		30,54	2,49	12,25							14,895
6	1	52,45	2,4	21,85	54,965	53	54,405	18,68	18,70	18,71	18,693
	2	55,49	2,5	22,20	54,965	53	54,405	18,68	18,70	18,71	18,693
	3	45,2	1,9	23,79	54,965	53	54,405	18,68	18,70	18,71	18,693
	4	50	2,27	22,03	54,965	53	54,405	18,68	18,70	18,71	18,693
	5	53,33	2,44	21,86	54,965	53	54,405	18,68	18,70	18,71	18,693
Promedio		51,29	2,30	22,34							18,693
7	1	216	6,46	33,44	56,95	54,995	56,865	20,66	20,70	21,17	20,840
	2	216	6,43	33,59	56,95	54,995	56,865	20,66	20,70	21,17	20,840
	3	216	6,82	31,67	56,95	54,995	56,865	20,66	20,70	21,17	20,840
	4	216	6,55	32,98	56,95	54,995	56,865	20,66	20,70	21,17	20,840
	5	216	6,61	32,68	56,95	54,995	56,865	20,66	20,70	21,17	20,840
Promedio		216,00	6,57	32,87							20,840
8	1	216	7,78	27,76	55,46	53,465	54,85	19,17	19,17	19,15	19,162
	2	216	8,29	26,06	55,46	53,465	54,85	19,17	19,17	19,15	19,162
	3	216	8,12	26,60	55,46	53,465	54,85	19,17	19,17	19,15	19,162
	4	216	8,01	26,97	55,46	53,465	54,85	19,17	19,17	19,15	19,162
	5	216	8,12	26,60	55,46	53,465	54,85	19,17	19,17	19,15	19,162
Promedio		216,00	8,06	26,79							19,162

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

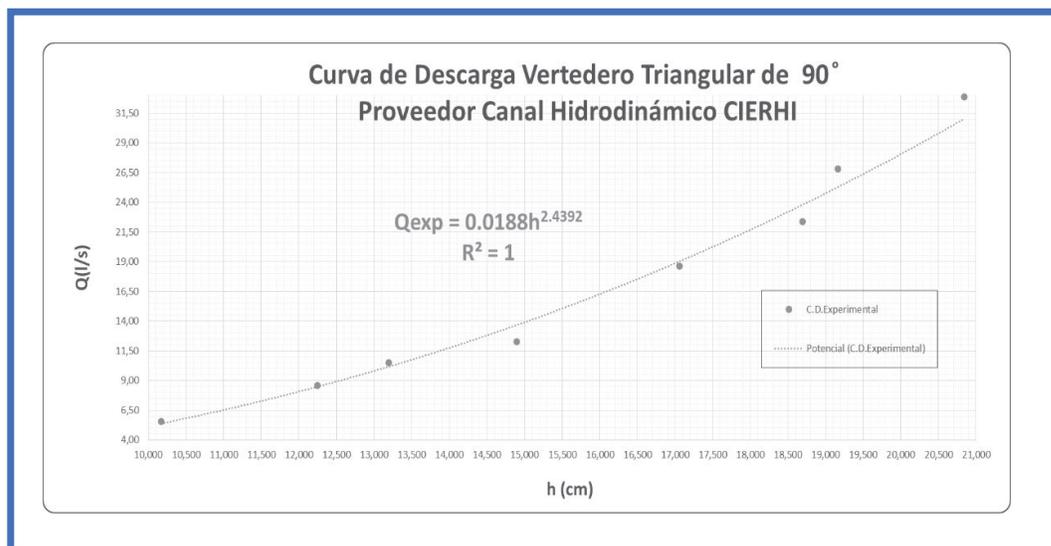
CUADRO N° 4.4

No Prueba	Qexp. (lit/s)	Carga (cm)	h	Observaciones
1	10.51	13.19		Con cargas mayores físicamente es imposible aforar por lo que el caudal se lo obtiene a través de ecuaciones de tendencia.
2	18.63	17.05		
3	5.54	10.17		
4	8.61	12.24		
5	12.25	14.89		
6	22.34	18.69		
7	32.87	20.84		
8	26.79	19.16		

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Con estos datos obtenidos se obtiene una ecuación de ajuste que tiene la siguiente expresión: $Q_{exp} = 0.0188h^{2.4392}$, esta expresión tiene un valor de coeficiente de ajuste $R^2 = 1$

GRAFICO N° 4.3



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.3.1.2 VERIFICACIÓN DE CONTINUIDAD DEL MODELO

Para la verificación de la continuidad en el modelo se evaluará el caudal de alimentación correspondiente al vertedero triangular y una comparación con el caudal aforado aguas abajo de la estructura tipo No. 1, No. 2, No. 3.

Se utilizan los datos obtenidos en las pruebas presentadas en el numeral 2.7.

CUADRO N° 4.5

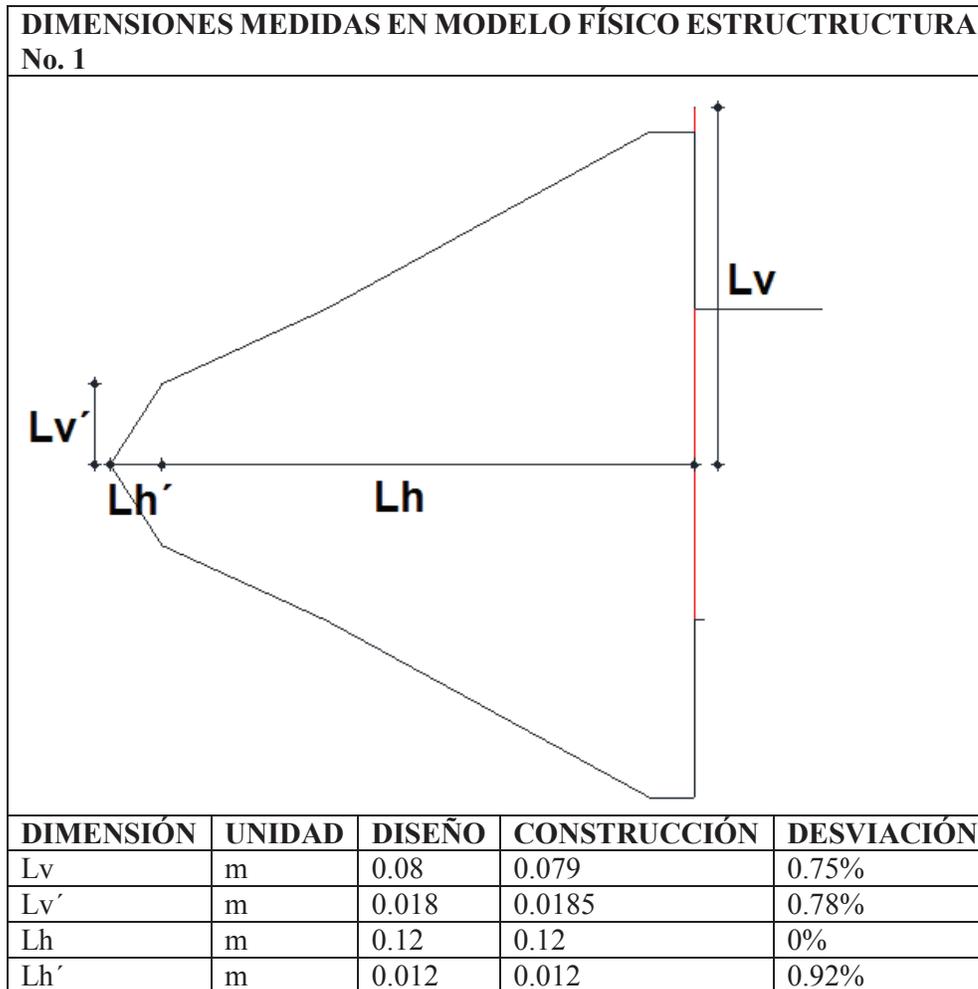
MODELO FÍSICO ESTRUCTURA No 1, No 2, No 3.			
PRUEBA	Q ingreso medido (l/s)	Q salida medido (l/s)	Desviación %
G1,2,3 –P1	22.18	22.17	0.99%
G1,2,3 –P2	62.5	62.5	0.99%
G1,2,3 –P3	55.99	55.99	0.99%
G1,2,3 –P4	101.55	101.55	0.99%
G1,2,3 –P5	118.10	118.10	0.99%

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.3.2 VERIFICACIÓN DE LA SIMILITUD GEOMÉTRICA

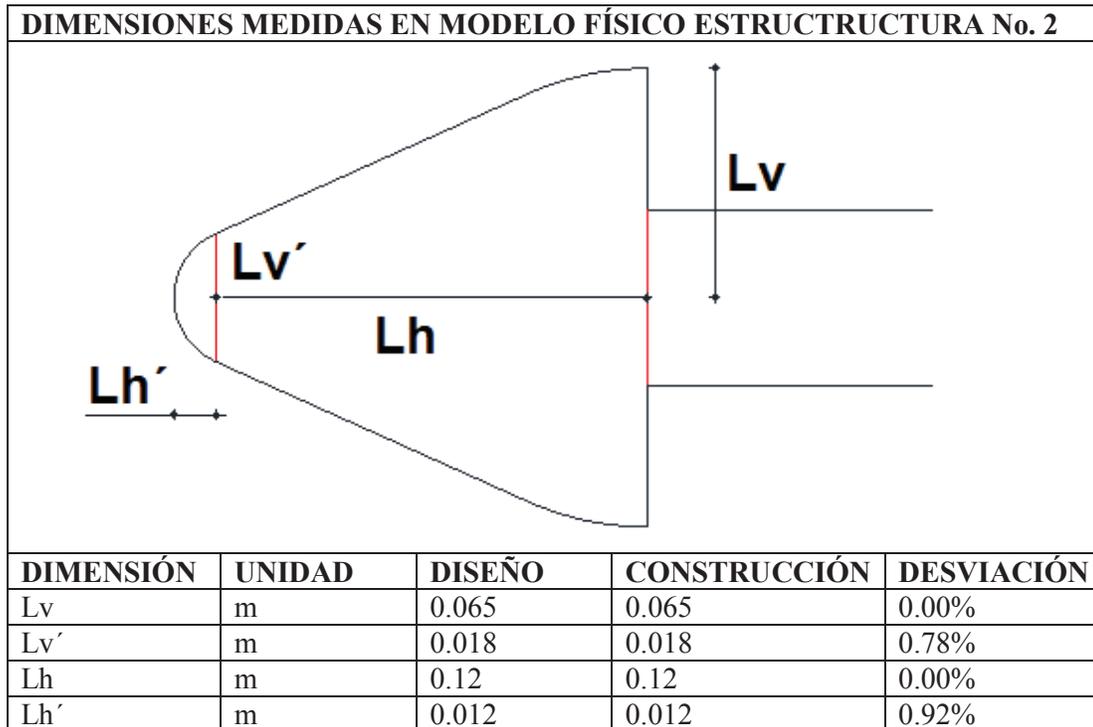
Se realiza una verificación con reglas graduadas y un calibrador, con una tolerancia de 1 mm. En los siguientes cuadros se muestran la comparación de dimensiones en planta las cuales se obtienen de los modelos construidos en base a la obtención de los planos de diseño. En los siguientes cuadros se muestran las dimensiones de diseño y de construcción.

GRÁFICO N° 4.4 DIMENSIONES MEDIDAS EN MODELO FÍSICO ESTRUCTURA NO. 1



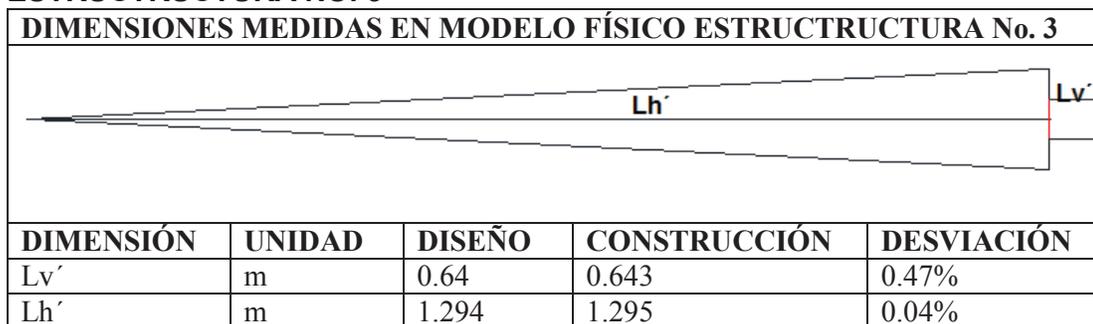
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

GRAFICO N° 4.5 DIMENSIONES MEDIDAS EN MODELO FÍSICO ESTRUCTRUCTURA NO. 2



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

GRÁFICO N° 4.6 DIMENSIONES MEDIDAS EN MODELO FÍSICO ESTRUCTRUCTURA NO. 3



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Al realizar el análisis se observa que las desviaciones en el análisis de las dimensiones son menores a $\pm 1.5\%$, lo que está dentro de los criterios de modelación

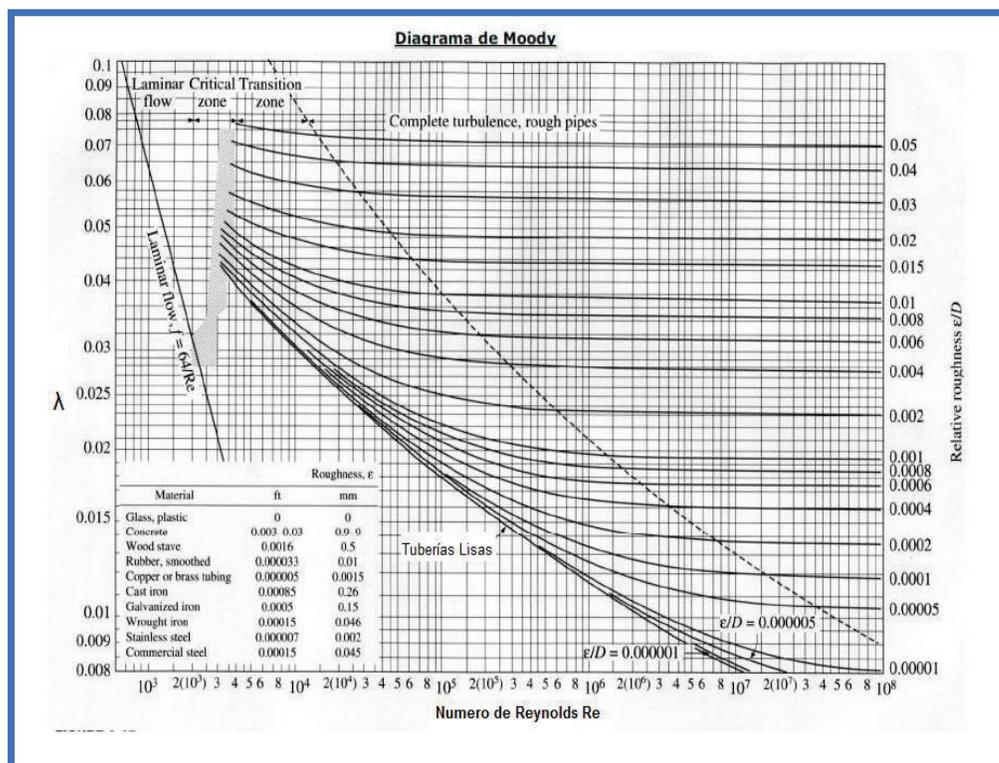
4.3.3 VERIFICACIÓN DE LA SIMILITUD DE FROUDE

Como ya se indicó en el numeral 2.4.1 nuestros sistemas modelo para la estructura No. 1, No.2, No.3, tienen una restricción froudiana, aun así es necesario verificar que se cumpla esta restricción froudiana teniendo una influencia nula en la simultaneidad de acción de la viscosidad y de la tensión superficial.

Dicho esto se debe garantizar que los números adimensionales de Reynolds sean mayores a 2×10^4 es decir obtendremos un flujo turbulento totalmente desarrollado así como también deberemos garantizar calados de aproximación al tabique bifurcador mayores a 2cm.

En el capítulo 2.4.2 se definió ya la relación que define el número de Reynolds, en el siguiente cuadro se presenta los valores de Reynolds para el flujo de aproximación para las tres estructuras.

GRÁFICO N° 4.7



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

CUADRO N° 4.6

PRUEBA	v (cm ² /s) 20 °C	Q(l/s)	Y3 (cm)	A (cm ²)	V(cm/s)	P(cm)	Rh(cm)
G1,2,3-P1	0,01	22,18	2,9	290,00	98,58	580	2,74
G1,2,3-P2	0,01	63,00	3,00	300,09	196,89	600,19	2,83
G1,2,3-P3	0,01	56,02	5,00	500,12	145,52	1000,24	4,54
G1,2,3-P4	0,01	101,97	7,00	700,25	196,11	1400,50	6,14
G1,2,3-P5	0,01	118,18	9,00	900,61	189,09	1801,23	7,63
	Re	(ε/4Rh)	λ				
	1,08E+05	1,3681E-05	0,017				
	2,23E+05	1,3246E-05	0,0173				
	2,65E+05	8,2482E-06	0,0149				
	4,82E+05	6,1052E-06	0,0132				
	5,77E+05	4,9138E-06	0,01275				

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Se realiza un análisis con la condición de que los números de Reynolds no deben sobrepasar en valor de 2×10^4 lo cual si se cumple. Además se verifica que se cumple la condición para la tensión superficial y viscosidad con la relación recomendada para flujo sobre vertederos dada por Ranga Raju (1997):

$$Re^{0.2} * We^{0.6} > 900$$

Donde

Re es el número de Reynolds

We es el número de Weber

(Ranga, Raju K.G (1997). "Flow Through Open Channels". Tata Mc Graw Hill.)

CUADRO N° 4.7

σ	3,39E-03	
ρ	1,00E+03	
Re	We	Re ^{0.2} * We ^{0.6}
1,08E+05	8,86E+01	149,7419036
2,23E+05	1,80E+02	264,6774445
2,65E+05	1,69E+02	263,3547455
4,82E+05	2,64E+02	388,6059076
5,77E+05	2,84E+02	420,7174321

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Se determina que si bien no cumple con la condición $Re^{0.2} * We^{0.6} > 900$, la cual es una recomendación experimental que es para vertederos, nos acogemos a la recomendación del calado no menor a 2 cm. Con lo que se limita el efecto de la tensión superficial.

Otro número adimensional que garantizará la validación de nuestro modelo será el número de Vedernikov V , con este número si es menor que la unidad cualquier onda en el canal se abatirá y el flujo puede ser estable. Cuando es mayor que la unidad pasa lo contrario es decir las ondas se amplificaran de esta manera no será posible tener un flujo estable, se generará en la gran mayoría un flujo no permanente donde se propagarán ondas.

Es así que, el flujo es estable si $V < 1$ e inestable para $V > 1$. En $V = 1$, el flujo es neutralmente estable y ocurre cuando las celeridades son iguales.

CUADRO N° 4.8

Numero de Vedernikov			
V	Factor de Forma	Usando formula de Chézy	$X = 2$ para flujo laminar
	$Y = 1$, para canales anchos		$X = 0,5$ para flujo turbulento
$V = \frac{2}{3} * \left(\frac{b}{P}\right) * Fr$	$Y = 0$, para canales angostos	Usando formula de Manning	$X = 2/3$ flujo turbulento
	$y = 1 - Rh(\text{perimetro moj.} / A)$		
0,904	0,000	$V = X * Y * Fr$ fórmula Vente Chow cap. 8 no es aplicable debido a que las dimensiones del canal son muy pequeñas para el uso de la fórmula.	
2,435	0,000		
0,970	0,000		
1,028	0,000		
0,789	0,000		

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.4 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

En el análisis de la investigación se presentan tres fases la primera es validar la similitud dinámica la cual deberá seguir el criterio de Euler, como es un modelo con similitud de Froude deberá cumplir con esta.

En una segunda fase se analizará el comportamiento hidráulico de las geometrías de cada bifurcador, y se recopilaran los distintos datos que permitan realizar un estudio de las estructuras bifurcadoras.

La tercera y última fase se propondrá la geometría optimizada, y se observará su comportamiento mediante un cronograma de ensayos.

Los Objetivos de la Fase 1 serán:

- Comprobar que en base al criterio de similitud geométrica de Euler se cumpla la relación entre el sistema modelo y el sistema prototipo.
- Validar la similitud de Froude entre el sistema prototipo y el sistema modelo, tomando en cuenta que existe la restricción según Froude.

Los Objetivos de la Fase 2 (Análisis del diseño original) serán:

- Analizar comparativamente los comportamientos de las ondas de choque con diferentes calados y velocidades de aproximación en cada una de las tres geometrías.
- Observar el comportamiento del flujo en cada una de las tres geometrías analizadas identificando las características de la onda de choque elevación, amplitud separación del flujo de la estructura.
- Realizar un análisis cuantitativo que permita vislumbrar el comportamiento de la geometría a través de la obtención de curvas experimentales adimensionales.

Los Objetivos de la Fase 3 (Modificación y optimización del diseño original) serán:

- Definir la variación geométrica del tabique bifurcador que garantice un funcionamiento con la menor cantidad de perturbaciones en flujo con régimen de aproximación supercrítico.
- Validar que el comportamiento esperado teóricamente cumpla con estas condiciones a nivel experimental.
- Definir curvas adimensionales de diseño, que brinden relaciones para generalizar el uso de una geometría óptima.

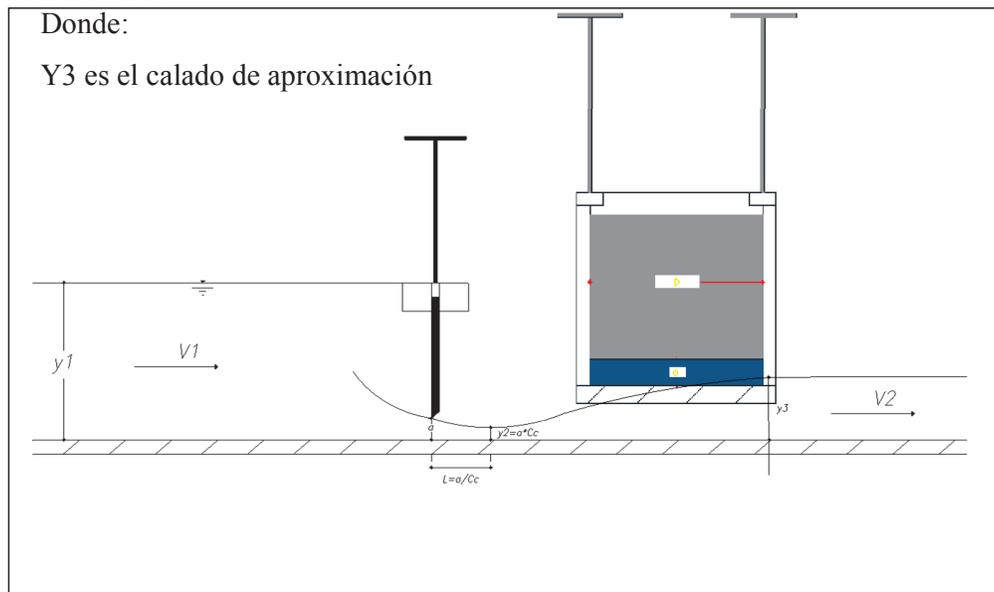
4.5 PLAN DE PRUEBAS

Las fases 1 y 2 donde se realiza la calibración del modelo y el análisis del funcionamiento hidráulico del sistema modelo en función del sistema prototipo sigue un proceso de depuración hasta llegar a obtener cinco conjuntos de parámetros que se utilizarán en cada geometría para desarrollar el respectivo análisis.

Datos para ensayar:

ESQUEMA VISUAL DE LA COMPUERTA

FIGURA N° 4.19



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

CUADRO N° 4.9

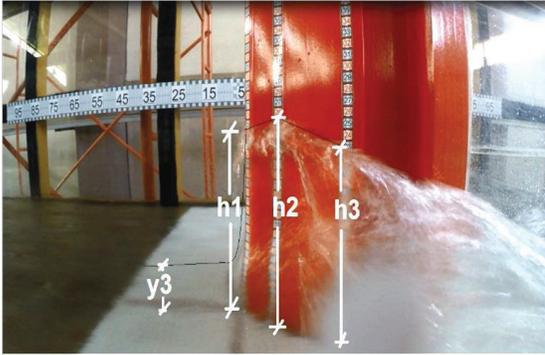
PLAN DE PRUEBAS				
Numero Prueba	$Q_{Exp} = 0,0188 * \Delta h_{prom}^{2,4392}$ (l/seg)	Apertura de Compuerta (a)	$F = \frac{V3}{\sqrt{g * Y3}}$	Y3 - lmn 3 (m)
1	22,1808	0,0300	1,4340	0,0225
2	63,0071	0,0300	3,5142	0,0320
3	56,0274	0,0500	1,6000	0,0385
4	101,9751	0,0700	1,7580	0,0520
5	118,1801	0,0900	1,3975	0,0625

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Datos de Registro:

CUADRO N° 4.10

GEOMETRÍA No 1						
ANÁLISIS EXPERIMENTAL						
El escogimiento de estos datos en específico se los realizo ya una vez analizado nuestro rango de estudio de interes en función del numero de froude el cual probe de el estudio de la modelación de la rápida escalonada.						
No	$Q_{Exp} = 0,0188 * \Delta h_{prom}^{2,4392}$ (l/seg)	Apertura de Compuerta lmn 2 a (m)	$F = \frac{V^3}{\sqrt{g * Y^3}}$	Y3 - lmn 3 (m)	V3=(Qexp)/(Calado aproximación)	
1,00	22,18	0,03	1,43	0,03	0,99	
2,00	63,01	0,03	3,87	0,03	1,97	
3,00	56,03	0,05	1,60	0,05	1,46	
4,00	101,98	0,07	1,76	0,07	1,96	
5,00	118,18	0,09	1,40	0,09	1,89	

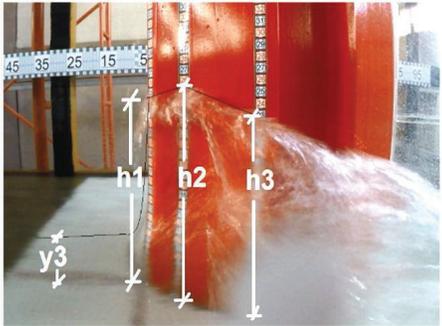
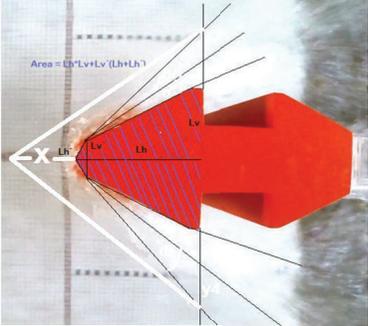
			
---	--	--	--

MODELO FÍSICO ESTRUCTURA No. 1							
No	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)
P1-G1	0,09	0,08	0,06	0,03	0,02	0,03	0,02
P2-G1	0,20	0,21	0,20	0,14	0,04	0,15	0,05
P3-G1	0,15	0,15	0,13	0,15	0,05	0,15	0,06
P4-G1	0,23	0,25	0,24	0,18	0,14	0,15	0,13
P5-G1	0,24	0,26	0,24	0,21	0,07	0,22	0,07
No	Lv (m)	Lh (m)	Lv' (m)	Lh' (m)	α (grados)	β	ϕ
P1-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	10,15	5,55	10,15
P2-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	31,96	4,34	32,57
P3-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	33,16	4,90	33,16
P4-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	35,82	8,98	33,16
P5-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	39,10	4,13	39,62
No	ω						
P1-G1	5,03						
P2-G1	4,64						
P3-G1	5,71						
P4-G1	9,91						
P5-G1	3,97						

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

CUADRO N° 4.11

GEOMETRÍA No 2					
ANÁLISIS EXPERIMENTAL					
El escogimiento de estos datos en específico se los realizo ya una vez analizado nuestro rango de estudio de interes en función del numero de froude el cual probiene del estudio de la modelación de la rápida escalonada.					
No	$Q_{EXP} = 0,0188 * \Delta h_{prom}^{2,4392}$ (l/seg)	Apertura de Compuerta lmn 2 a (m)	$F = \frac{V3}{\sqrt{g * Y3}}$	Y3 - lmn 3 (m)	V3=(Qexp)/(Calado aproximación)
1	22,18	0,03	1,43	0,03	0,76
2	63,01	0,03	3,51	0,03	1,97
3	56,03	0,05	1,60	0,05	1,12
4	101,98	0,07	1,76	0,07	1,46
5	118,18	0,09	1,40	0,09	1,31

MODELO FÍSICO ESTRUCTURA No. 2							
No	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)
P1-G2	0,09	0,08	0,08	0,03	0,01	0,02	0,00
P2-G2	0,21	0,20	0,17	0,12	0,03	0,13	0,03
P3-G2	0,16	0,15	0,12	0,16	0,03	0,16	0,02
P4-G2	0,24	0,23	0,22	0,16	0,04	0,17	0,03
P5-G2	0,25	0,24	0,23	0,06	0,02	0,06	0,02
No	Lv (m)	Lh (m)	Lv' (m)	Lh' (m)	α (grados)	β	ϕ
P1-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	9,58	1,72	8,51
P2-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	32,91	4,35	33,71
P3-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	37,90	2,85	38,51
P4-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	38,51	3,73	39,67
P5-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	20,33	4,90	20,33
No	ωP						
P1-G2	1,06						
P2-G2	4,19						
P3-G2	2,24						
P4-G2	3,03						
P5-G2	4,90						

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

CUADRO N° 4.12

GEOMETRÍA No 3						
ANÁLISIS EXPERIMENTAL						
El escogitamiento de estos datos en específico se los realizo ya una vez analizado nuestro rango de estudio de interes en función del numero de froude el cual probiene del estudio de la modelación de la rápida escalonada.						
No	$Q_{Exp} = 0,0188 * \Delta h_{prom}^{2,4392}$ (l/seg)	Apertura de Compuerta lmn 2 a (m)	$F = \frac{V3}{\sqrt{g * Y3}}$	Y3 - lmn 3 (m)	V3=(Qexp)/(Calado aproximación)	
1	22,18	0,03	1,51	0,03	0,79	
2	63,01	0,03	3,87	0,03	2,10	
3	56,03	0,05	1,65	0,05	1,14	
4	101,98	0,07	2,06	0,06	1,62	
5	118,18	0,09	1,58	0,08	1,42	

El flujo no presenta separación de la estructura es decir que vista en planta no existe parametros cuantificables

MODELO FÍSICO ESTRUCTURA No. 3							
No	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)
P1-G3	0,05	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
P2-G3	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
P3-G3	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
P4-G3	0,07	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
P5-G3	0,07	0,07	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
No	Lv (m)	Lh (m)	Lv' (m)	Lh' (m)	α (grados)	β	β
P1-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
P2-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
P3-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
P4-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
P5-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
No	ω^P						
P1-G3	0,00						
P2-G3	0,00						
P3-G3	0,00						
P4-G3	0,00						
P5-G3	0,00						

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

4.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4

La curva de descarga experimental del vertedero alimentador triangular, de aforo de ingreso al sistema modelo de las Estructuras bifurcadoras tipo No, 1 , No. 2, No. 3, valida la continuidad hidráulica, lo que garantiza la medición de caudales tanto al ingreso así como también en los caudales aforados a la salida del sistema.

Una vez analizados los valores de Reynolds para el sistema modelo en las tres estructuras se muestra que es mayor a 2×10^4 para todo el rango de caudales analizado en la operación del modelo.

CAPITULO 5

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL DISEÑO ORIGINAL

5.1 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DE LOS TABIQUE BIFURCADORES CON FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRITICO EN CANALES ABIERTOS.

Las estructuras en el modelo están construidas con una escala 1:5 lo que permite visualizar de manera idónea el fenómeno. Para el análisis y estudio experimental del comportamiento hidráulico se han tomado un rango de caudales en función de los números de Froude que permitan tener un espectro amplio de datos.

- i. Operación con números de Froude bajos, que corresponde a velocidades de operación bajas.
- ii. Operación con varios números de Froude, generación de un espectro de datos de análisis.
- iii. Operación con números de Froude altos, que corresponde a velocidades de operación altas.

5.2 PLAN DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DE LOS TABIQUE BIFURCADORES CON FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRITICO EN CANALES ABIERTOS.

Se realiza un plan de pruebas en función de las condiciones mencionadas, lo que genera un espectro de análisis en función de números de Froude que permitan el análisis del fenómeno. En los siguientes Cuadros esta expresado el plan de pruebas para cada estructura:

CUADRO N° 5.13

ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR No 1						
Nomenclatura de la Prueba	Número de Froude	Caudal de Aproximación (l/s)	Calado de Aproximación (m)	Observaciones	Magnitudes Físicas	Fotografías
P1-G1	1.43	22.18	0,029	Calado de aproximación al tabique, generación de onda de choque.	Características geométricas onda de choque	Cuadro No. 12
P2-G1	3.87	63.00	0.030			Cuadro No. 13
P3-G1	1.60	56.02	0.050			Cuadro No. 14
P4-G1	1.75	101.97	0.07			Cuadro No. 15
P5-G1	1.39	118.18	0.09			Cuadro No. 16
ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR No 2						
Nomenclatura de la Prueba	Número de Froude	Caudal de Aproximación (l/s)	Calado de Aproximación (m)	Observaciones	Magnitudes Físicas	Fotografías
P1-G2	1.43	22.18	0,029	Calado de aproximación al tabique, generación de onda de choque.	Características geométricas onda de choque	Cuadro No. 17
P2-G2	3.51	63.00	0.030			Cuadro No. 18
P3-G2	1.599	56.02	0.050			Cuadro No. 19
P4-G2	1.75	101.97	0.07			Cuadro No. 20
P5-G2	1.39	118.18	0.09			Cuadro No. 21
ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR No 3						
Nomenclatura de la Prueba	Número de Froude	Caudal de Aproximación (l/s)	Calado de Aproximación (m)	Observaciones	Magnitudes Físicas	Fotografías
P1-G2	1.51	22.18	0,029	Calado de aproximación al tabique, generación de onda de choque.	Características geométricas onda de choque	Cuadro No. 22
P2-G2	3.87	63.00	0.030			Cuadro No. 23
P3-G2	1.64	56.02	0.050			Cuadro No. 24
P4-G2	2.05	101.97	0.07			Cuadro No. 25
P5-G2	1.57	118.18	0.09			Cuadro No. 26

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

5.3 RESULTADOS OBTENIDOS.

5.3.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL FLUJO EN LAS ESTRUCTURAS DEL TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO DE APROXIMACIÓN EN RÉGIMEN SUPERCRÍTICO.

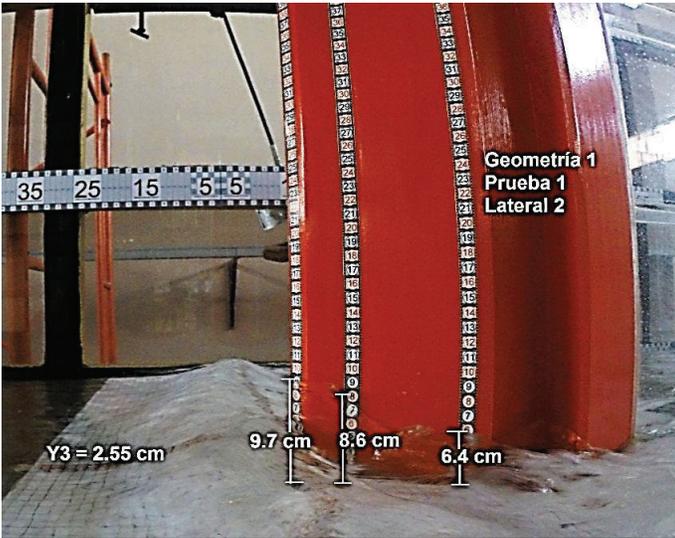
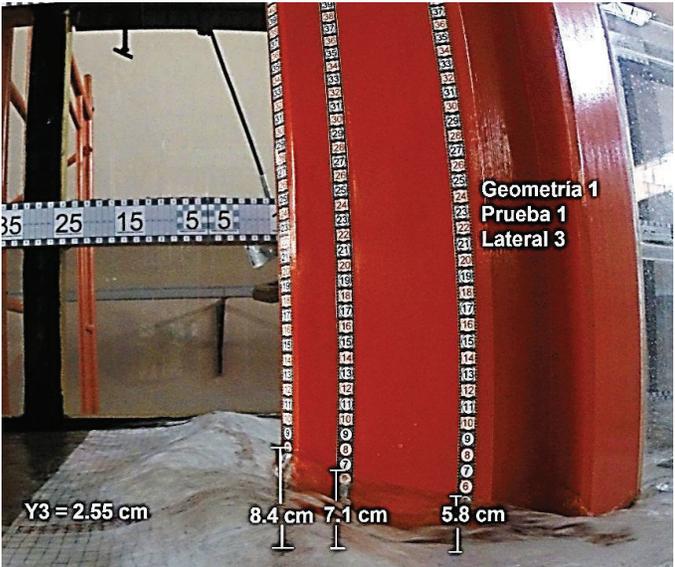
5.3.1.1 Estructura del Tabique Bifurcador No. 1 con flujo de aproximación con régimen supercrítico.

En las siguientes fotografías se analiza las características preponderantes en el análisis del paso del flujo por la estructura.

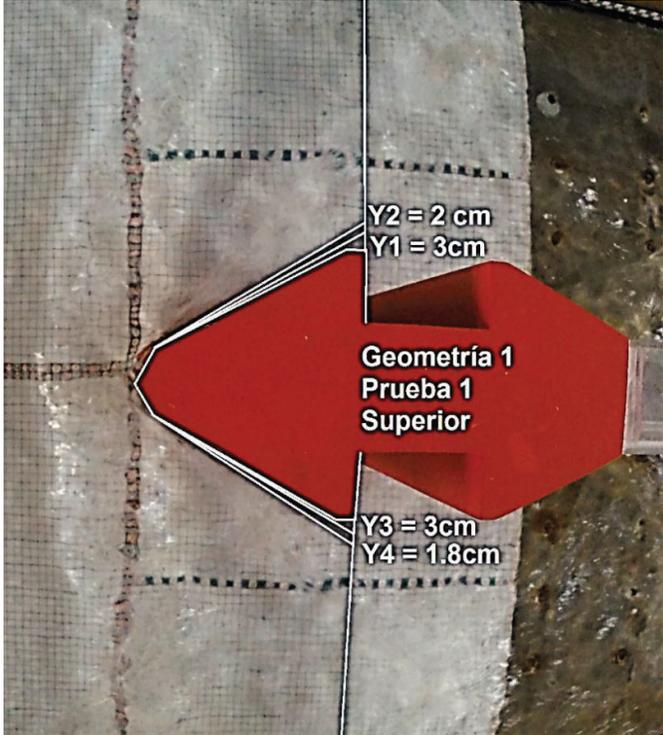
CUADRO Nº 5.14

Prueba 1 (P1-G1)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 1	
	<p>Estructura 1 Foto Lateral 1 Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

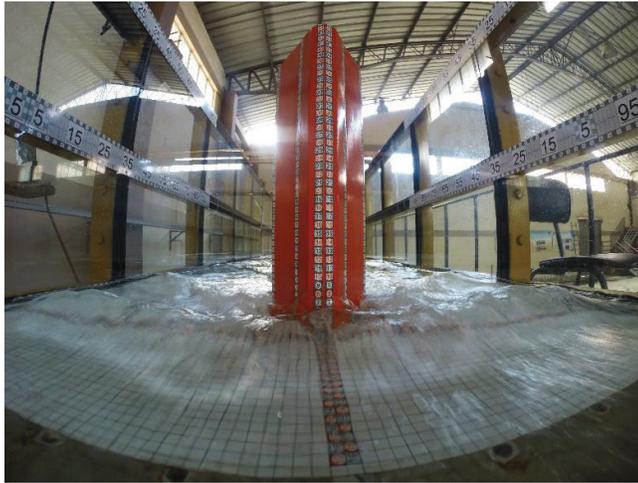
CUADRO 5.14 CONTINUACION

 <p>Geometría 1 Prueba 1 Lateral 2</p> <p>Y3 = 2.55 cm</p> <p>9.7 cm</p> <p>8.6 cm</p> <p>6.4 cm</p>	<p>Estructura 1 Foto Lateral 2 Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
 <p>Geometría 1 Prueba 1 Lateral 3</p> <p>Y3 = 2.55 cm</p> <p>8.4 cm</p> <p>7.1 cm</p> <p>5.8 cm</p>	<p>Estructura 1 Foto Lateral 3 Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.14 CONTINUACION

SUPERIOR - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 1	
	<p>Estructura 1 Foto Superior Panorámica Prueba 1: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>
	<p>Estructura 1 Foto Superior Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.14 CONTINUACION

FRONTAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 1

Estructura 1 Foto Frontal Panorámica
 Prueba 1: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.

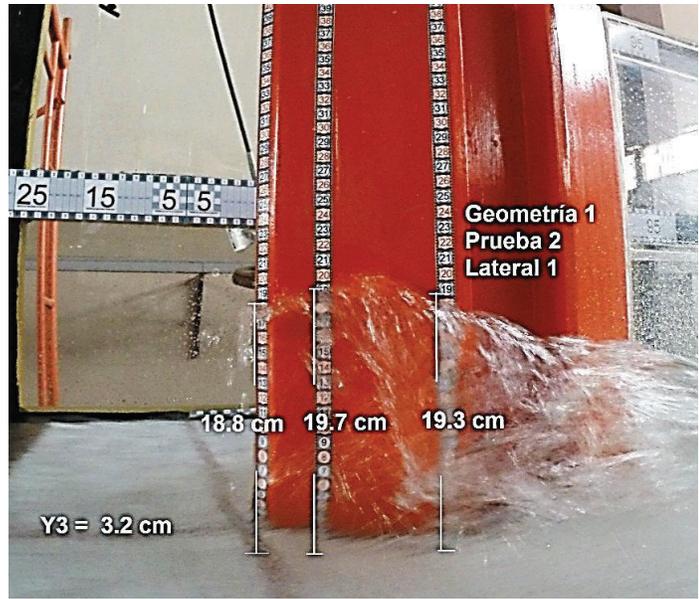
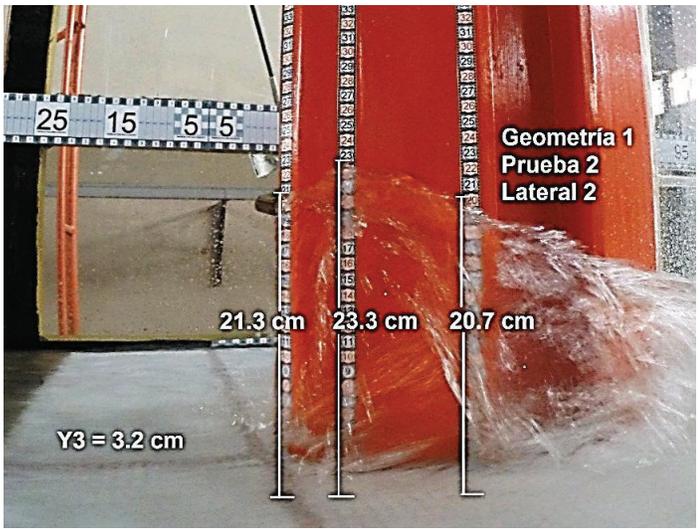
h1	h2	h3	
0,089	0,078	0,063	
Y1	Y2	Y3	Y4
0,03	0,02	0,03	0,018
y3 (calado de aproximación)			
0,0255			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

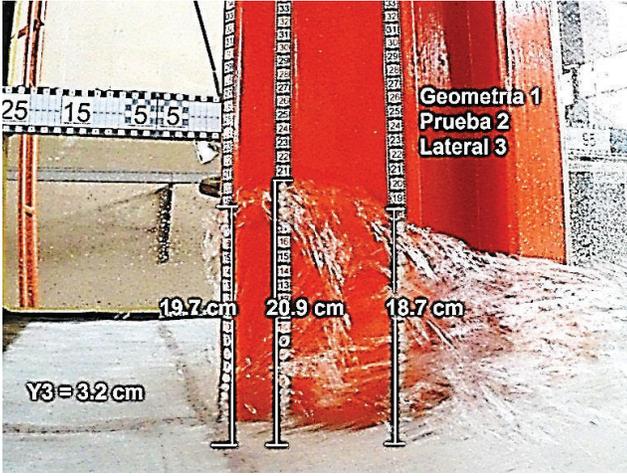
Principales Observaciones

- i. El flujo no evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- ii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- iii. Para este calado de aproximación no se genera una elevación representativa de la onda de choque.

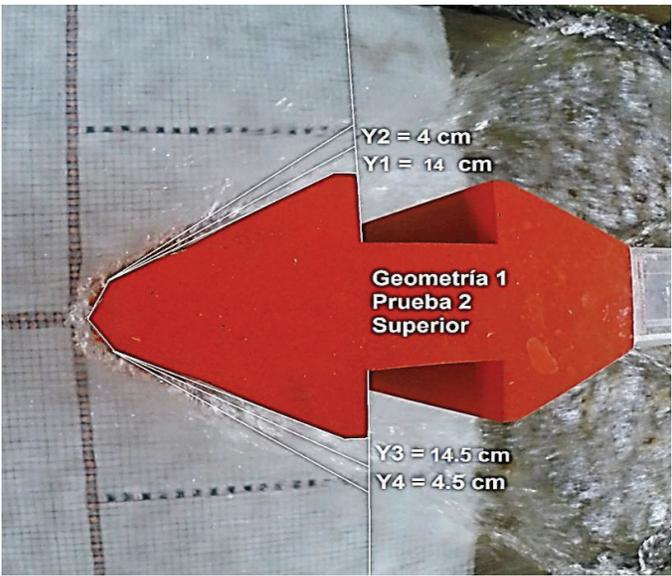
CUADRO N° 5.15

Prueba 2 (P2-G1)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 2	
	<p>Estructura 1 Foto Lateral 1 Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 1 Foto Lateral 2 Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.15 CONTINUACION

	<p>Estructura 1 Foto Lateral 3 Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>SUPERIOR - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 2</p>	
	<p>Estructura 1 Foto Superior Panorámica Prueba 2: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

CUADRO 5.15 CONTINUACION

	<p>Estructura 1 Foto Superior Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
FRONTAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 2	
	<p>Estructura 1 Foto Frontal Panorámica Prueba 2: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

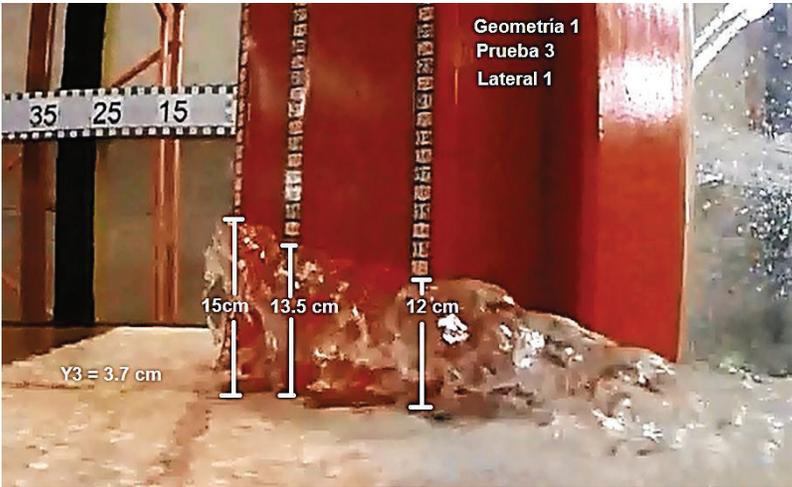
h1	h2	h3	
0,199	0,213	0,196	
Y1	Y2	Y3	Y4
0,14	0,04	0,145	0,045
y3 (calado de aproximación)			
0,032			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

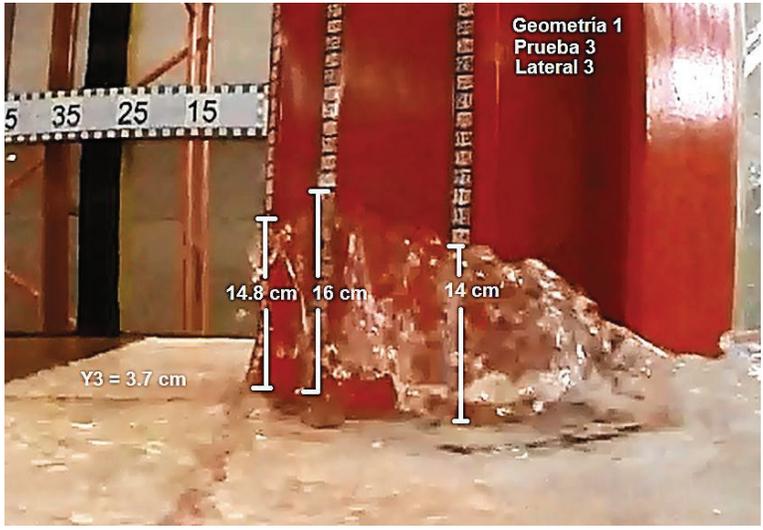
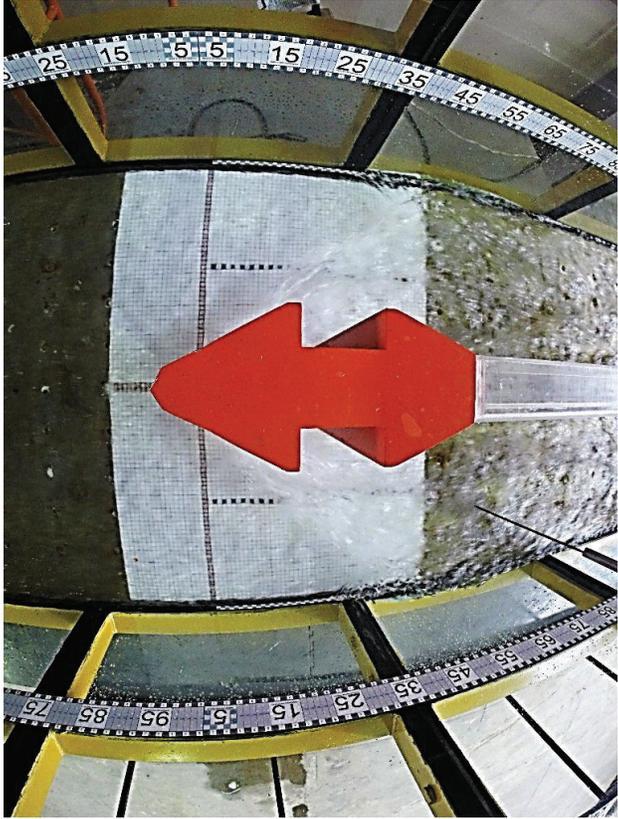
Principales Observaciones

- i. El flujo evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- ii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- iii. Para este calado de aproximación si se genera una elevación representativa de la onda de choque.

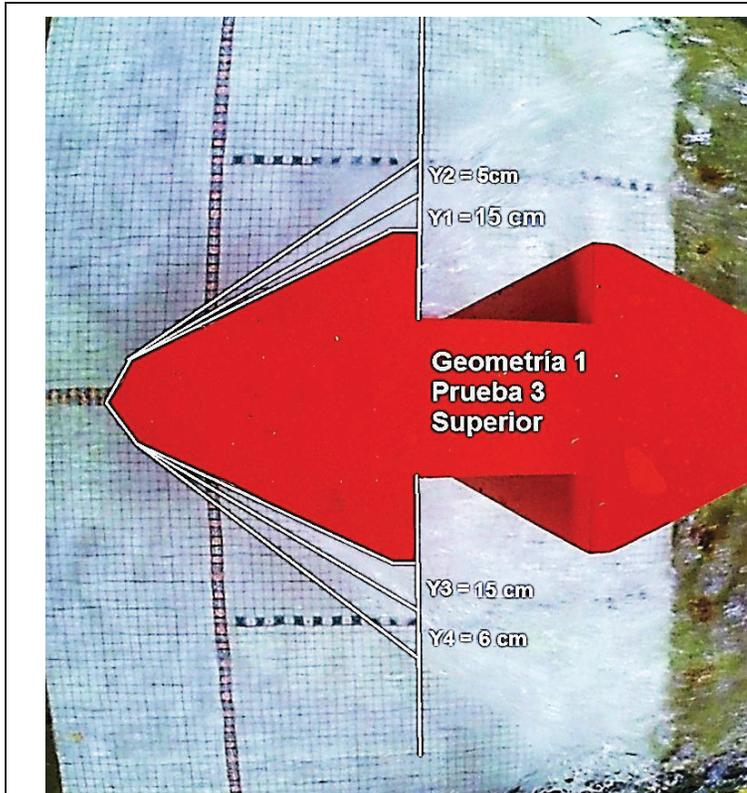
CUADRO N° 5.16

Prueba 3 (P3-G1)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 3	
	<p>Estructura 1 Foto Lateral 1 Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 1 Foto Lateral 2 Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.16 CONTINUACION

 <p>Geometría 1 Prueba 3 Lateral 3</p> <p>14.8 cm 16 cm 14 cm</p> <p>Y3 = 3.7 cm</p>	<p>Estructura 1 Foto Lateral 3 Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>SUPERIOR - GEOMETRÍA 1 - PRUEBA 3</p> 	<p>Estructura 1 Foto Superior Panorámica Prueba 3: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

CUADRO 5.16 CONTINUACION



Estructura 1 Foto Superior Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.

FRONTAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 3



Estructura 1 Foto Frontal Panorámica Prueba 3: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.

h1	h2	h3	
0,153	0,150	0,133	
Y1	Y2	Y3	Y4
0,15	0,05	0,15	0,06
y3 (calado de aproximación)			
0,037			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

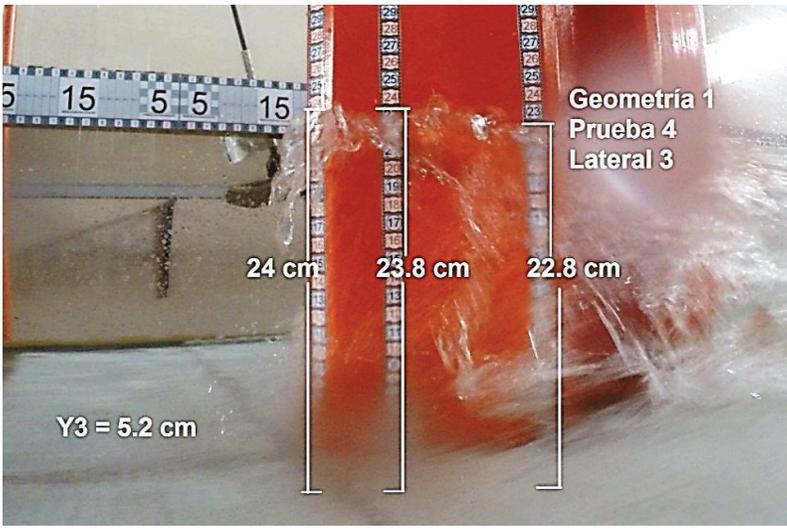
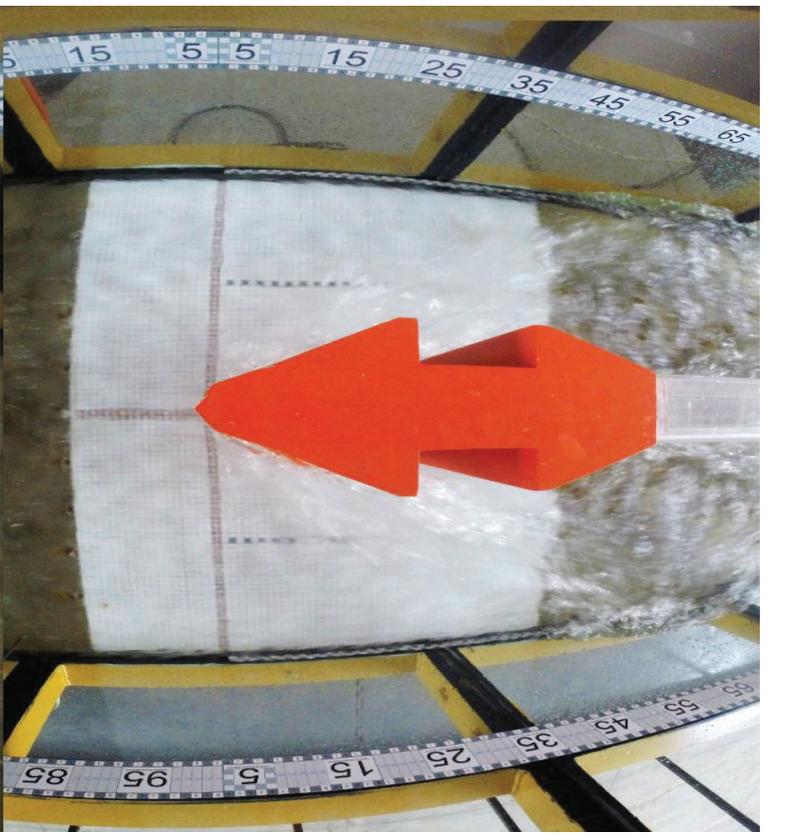
Principales Observaciones

- i. El flujo evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- ii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- iii. Para este calado de aproximación si se genera una elevación representativa de la onda de choque.

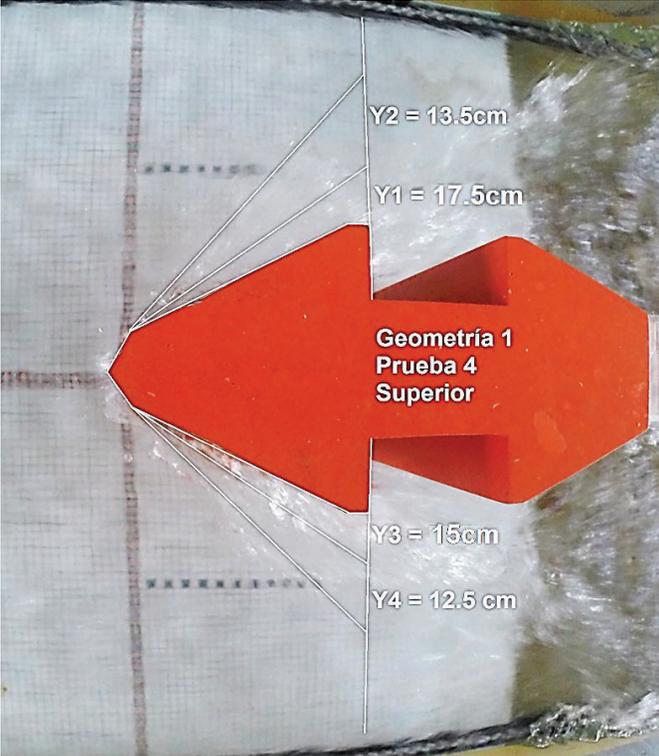
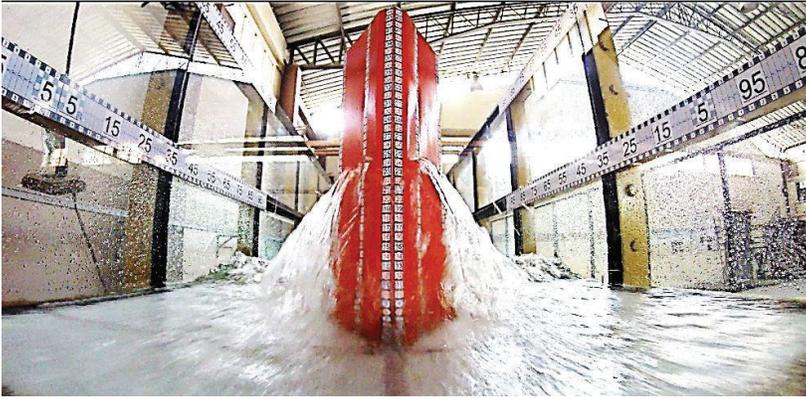
CUADRO N° 5.17

Prueba 4 (P4-G1)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 4	
	<p>Estructura 1 Foto Lateral 1 Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 1 Foto Lateral 2 Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.17 CONTINUACION

 <p>24 cm 23.8 cm 22.8 cm</p> <p>Y3 = 5.2 cm</p> <p>Geometría 1 Prueba 4 Lateral 3</p>	<p>Estructura 1 Foto Lateral 3 Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>SUPERIOR - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 4</p>	
	<p>Estructura 1 Foto Superior Panorámica Prueba 4: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

CUADRO 5.17 CONTINUACION

	<p>Estructura 1 Foto Superior Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>FRONTAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 4</p>	
	<p>Estructura 1 Foto Frontal Panorámica Prueba 4: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

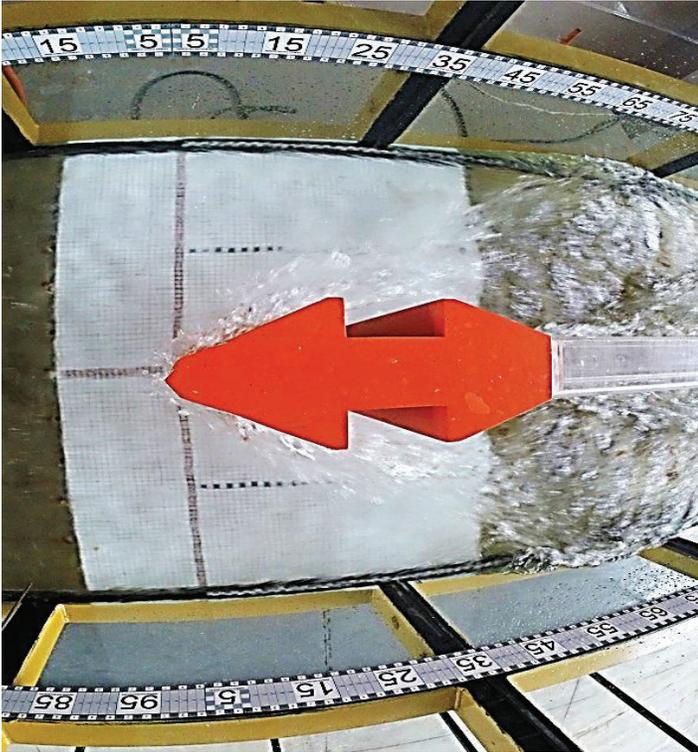
Principales Observaciones

- i. El flujo evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- ii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- iii. Para este calado de aproximación si se genera una elevación representativa de la onda de choque.

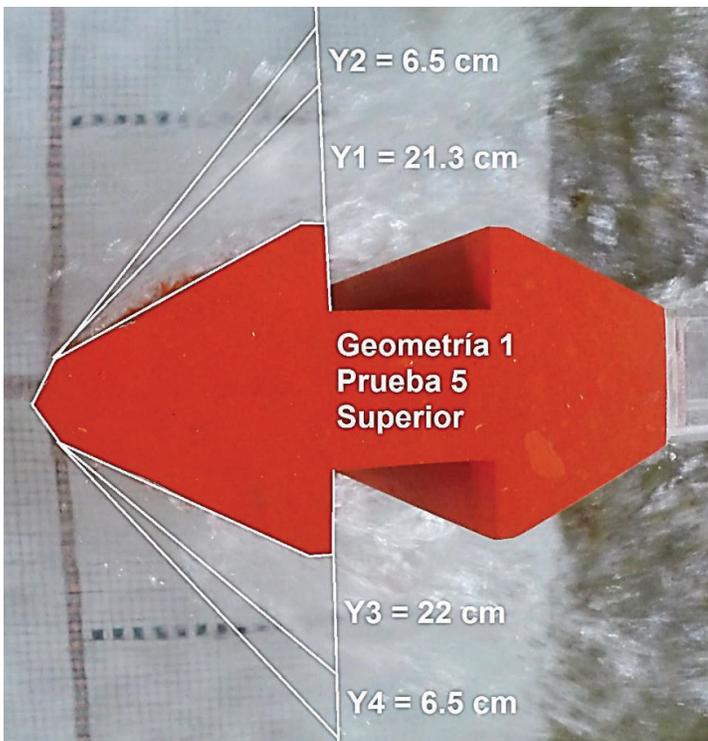
CUADRO N° 5.18

Prueba 5 (P5-G1)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 5	
<p>Geometría 1 Prueba 5 Lateral 1</p> <p>24.5 cm 25.8 cm 23.9 cm</p> <p>Y3 = 6.25 cm</p>	<p>Estructura 1 Foto Lateral 1 Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>Geometría 1 Prueba 5 Lateral 2</p> <p>24.6 cm 26.5 cm 24.7 cm</p> <p>Y3 = 6.25 cm</p>	<p>Estructura 1 Foto Lateral 2 Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>Geometría 1 Prueba 5 Lateral 3</p> <p>23.8 cm 24.8 cm 23.8 cm</p> <p>Y3 = 6.25 cm</p>	<p>Estructura 1 Foto Lateral 3 Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.18 CONTINUACION

SUPERIOR - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 5

Estructura 1 Foto Superior Panorámica Prueba 5: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.



Estructura 1 Foto Superior Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.

CUADRO 5.18 CONTINUACION

FRONTAL - GEOMETRÍA 1 – PRUEBA 5	
	<p>Estructura 1 Foto Frontal Panorámica Prueba 5: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

h1	h2	h3	
0,243	0,257	0,241	
Y1	Y2	Y3	Y4
0,213	0,065	0,22	0,065
y3 (calado de aproximación)			
0,0625			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Principales Observaciones

- i. El flujo evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- ii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- iii. Para este calado de aproximación si se genera una elevación representativa de la onda de choque.

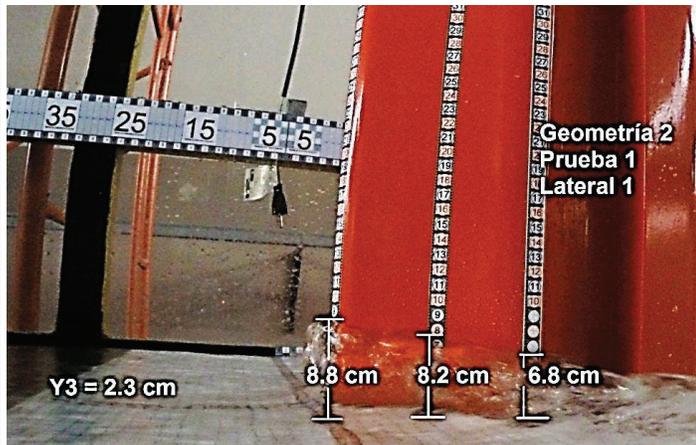
5.3.1.2 Estructura del Tabique Bifurcador No. 2 con flujo de aproximación con régimen supercrítico.

En las siguientes fotografías se analiza las características preponderantes en el análisis del paso del flujo por la estructura.

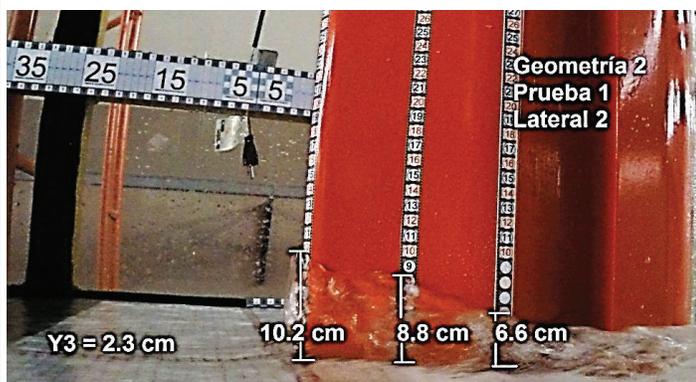
CUADRO N° 5.19

Prueba 1 (P1-G2)

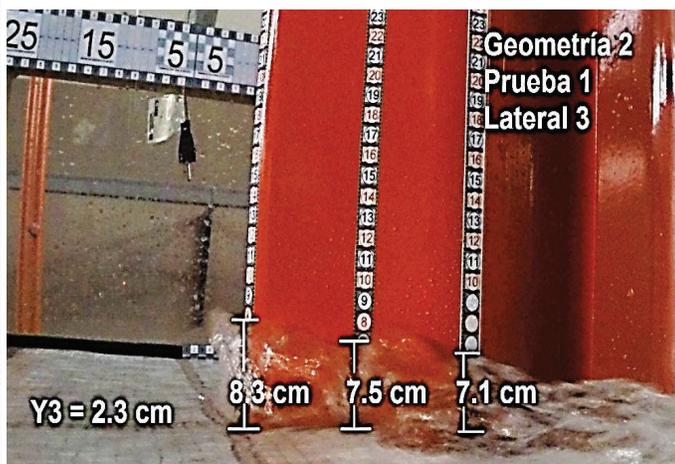
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 1



Estructura 2 Foto Lateral 1 Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.

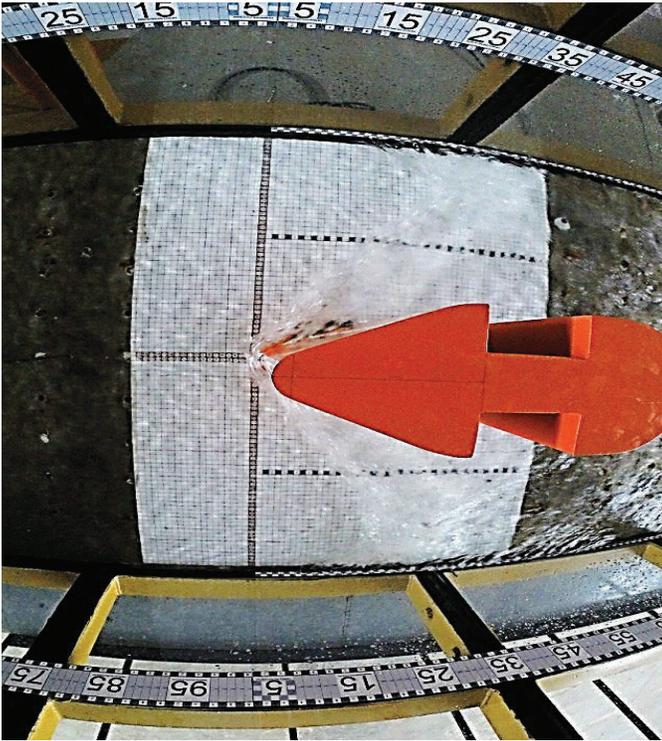
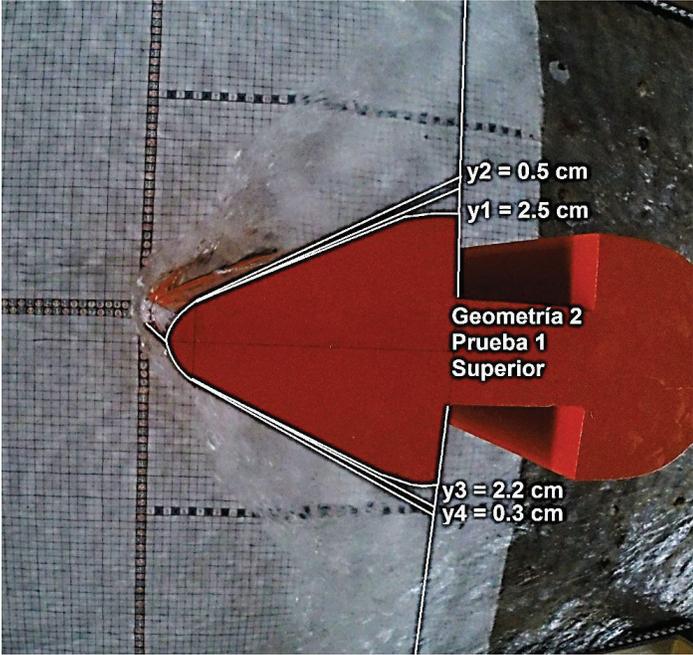


Estructura 2 Foto Lateral 2 Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.



Estructura 2 Foto Lateral 3 Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.

CUADRO 5.19 CONTINUACION

SUPERIOR - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 1	
	<p>Estructura 2 Foto Superior Panorámica Prueba 1: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>
	<p>Estructura 2 Foto Superior Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.19 CONTINUACION

FRONTAL - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 1	
	<p>Estructura 2 Foto Frontal Panorámica Prueba 1: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

h1	h2	h3	
0,091	0,082	0,076	
y1	y2	y3	y4
0,025	0,005	0,022	0,003
Y3 (calado de aproximación)			
0,023			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

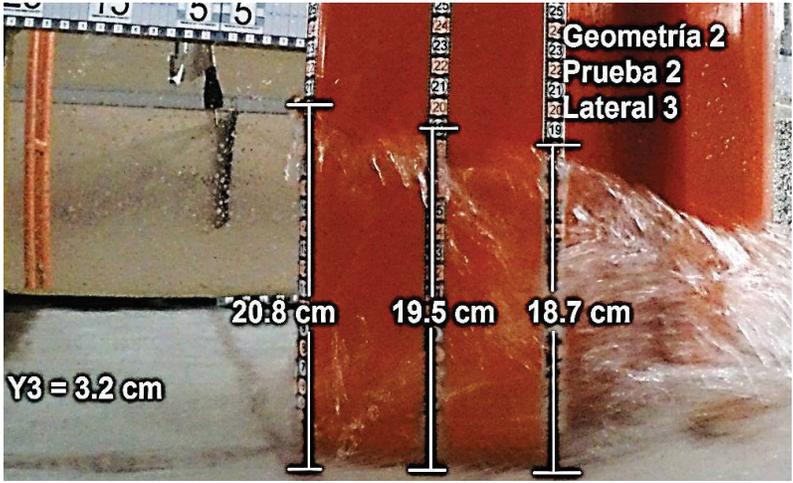
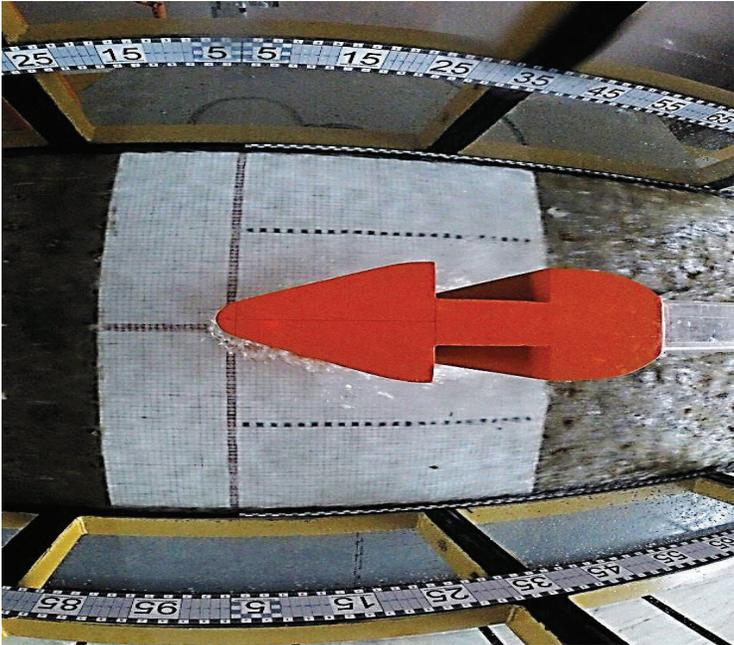
Principales Observaciones

- iv. El flujo no evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- v. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- vi. Para este calado de aproximación no se genera una elevación representativa de la onda de choque.

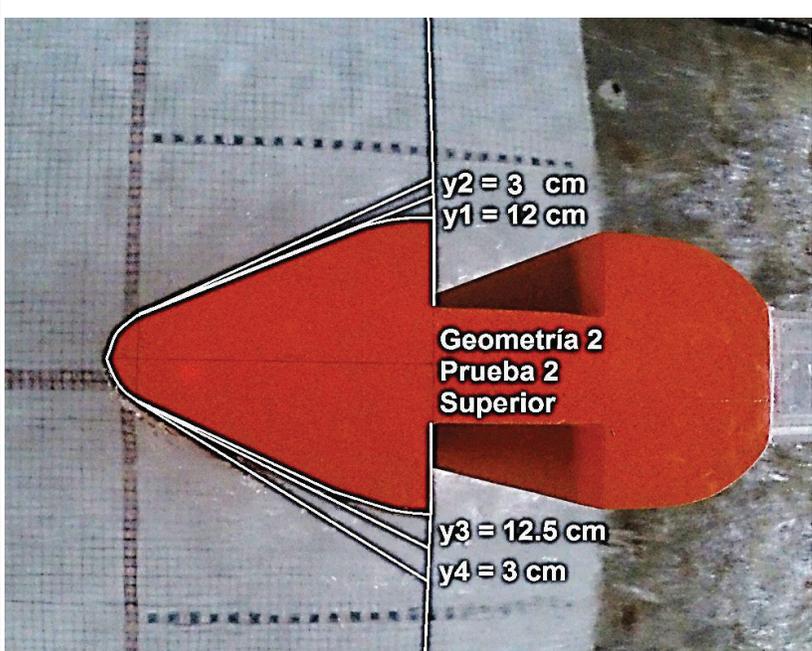
CUADRO N° 5.20

Prueba 2 (P2-G2)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 2 - PRUEBA 2	
	<p>Estructura 2 Foto Lateral 1 Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 2 Foto Lateral 2 Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.20 CONTINUACION

 <p>Geometría 2 Prueba 2 Lateral 3</p> <p>20.8 cm 19.5 cm 18.7 cm</p> <p>Y3 = 3.2 cm</p>	<p>Estructura 2 Foto Lateral 3 Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
SUPERIOR - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 2	
	<p>Estructura 2 Foto Superior Panorámica Prueba 2: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

CUADRO 5.20 CONTINUACION



**Geometría 2
Prueba 2
Superior**

$y_2 = 3 \text{ cm}$
 $y_1 = 12 \text{ cm}$

$y_3 = 12.5 \text{ cm}$
 $y_4 = 3 \text{ cm}$

Estructura 2
Foto Superior
Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.

FRONTAL - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 2



Estructura 2
Foto Frontal
Panorámica
Prueba 2: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.

h1	h2		h3	
0,206	0,196		0,174	
Y1	Y2	Y3		Y4
0,12	0,03	0,125		0,03
y3 (calado de aproximación)				
0,032				

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

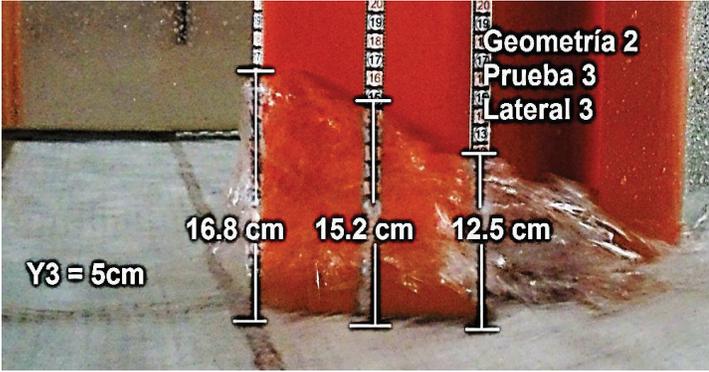
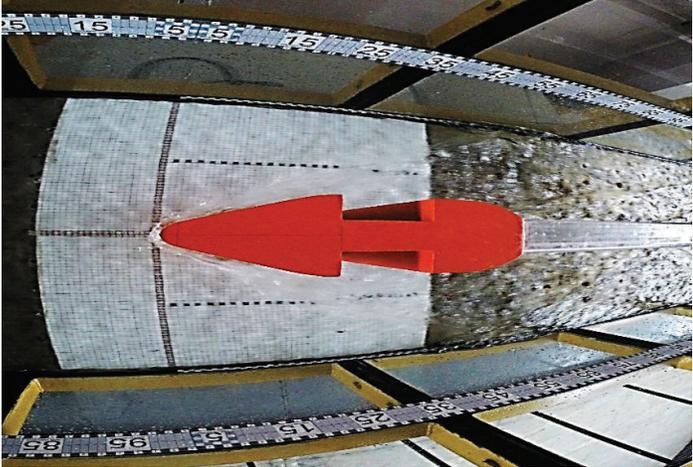
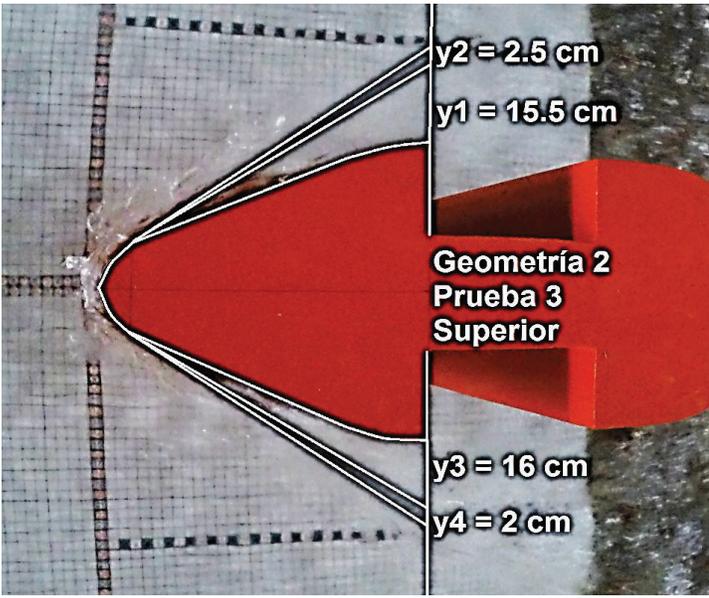
Principales Observaciones

- iv. El flujo evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- v. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- vi. Para este calado de aproximación si se genera una elevación representativa de la onda de choque.

CUADRO N° 5.21

Prueba 3 (P3-G2)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 3	
<p>Geometría 2 Prueba 3 Lateral 1</p> <p>15.8 cm 14.8 cm 12.5 cm</p> <p>Y3 = 5 cm</p>	<p>Estructura 2 Foto Lateral 1 Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>Geometría 2 Prueba 3 Lateral 2</p> <p>14.5 cm 13.7 cm 11.5 cm</p> <p>Y3 = 5 cm</p>	<p>Estructura 2 Foto Lateral 2 Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.21 CONTINUACION

	<p>Estructura 2 Foto Lateral 3 Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>SUPERIOR - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 3</p>	
	<p>Estructura 2 Foto Superior Panorámica Prueba 3: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>
	<p>Estructura 2 Foto Superior Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.21 CONTINUACION

FRONTAL - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 3	
	<p>Estructura 2 Foto Frontal Panorámica Prueba 3: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

h1	h2	h3	
0,157	0,146	0,122	
y1	y2	y3	y4
0,155	0,025	0,16	0,02
Y3 (calado de aproximación)			
0,05			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

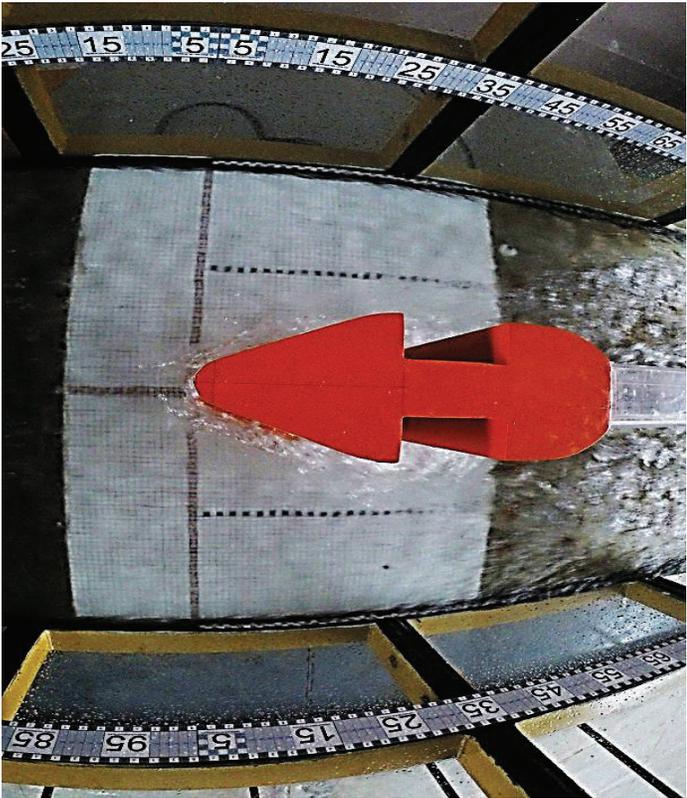
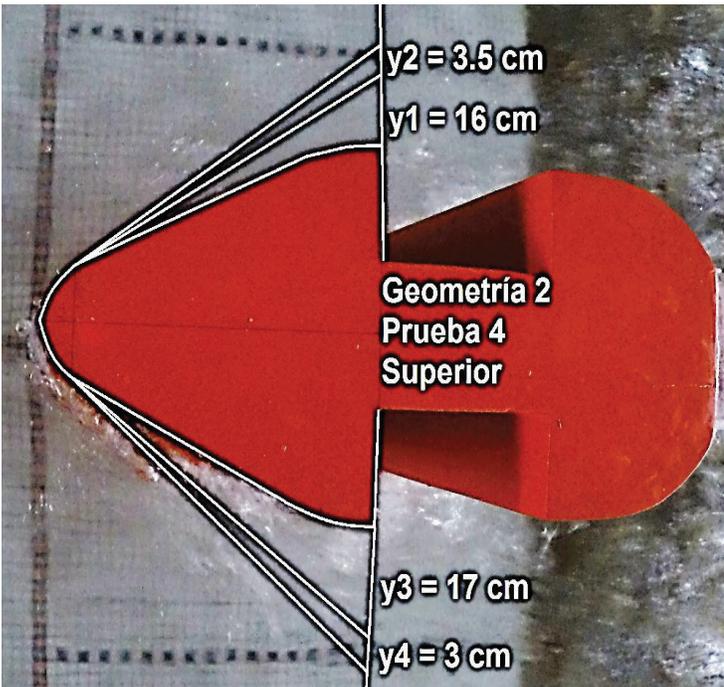
Principales Observaciones

- iv. El flujo evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- v. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- vi. Para este calado de aproximación si se genera una elevación representativa de la onda de choque.

CUADRO N° 5.22

Prueba 4 (P4-G2)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 4	
	<p>Estructura 2 Foto Lateral 1 Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 2 Foto Lateral 2 Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 2 Foto Lateral 3 Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.22 CONTINUACION

SUPERIOR - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 4	
	<p>Estructura 2 Foto Superior Panorámica Prueba 4: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>
 <p> $y_2 = 3.5 \text{ cm}$ $y_1 = 16 \text{ cm}$ Geometría 2 Prueba 4 Superior $y_3 = 17 \text{ cm}$ $y_4 = 3 \text{ cm}$ </p>	<p>Estructura 2 Foto Superior Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.22 CONTINUACION

FRONTAL - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 4	
	<p>Estructura 2 Foto Frontal Panorámica Prueba 4: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

h1	h2	h3	
0,236	0,228	0,216	
Y1	Y2	Y3	Y4
0,16	0,035	0,17	0,03
y3 (calado de aproximación)			
0,07			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

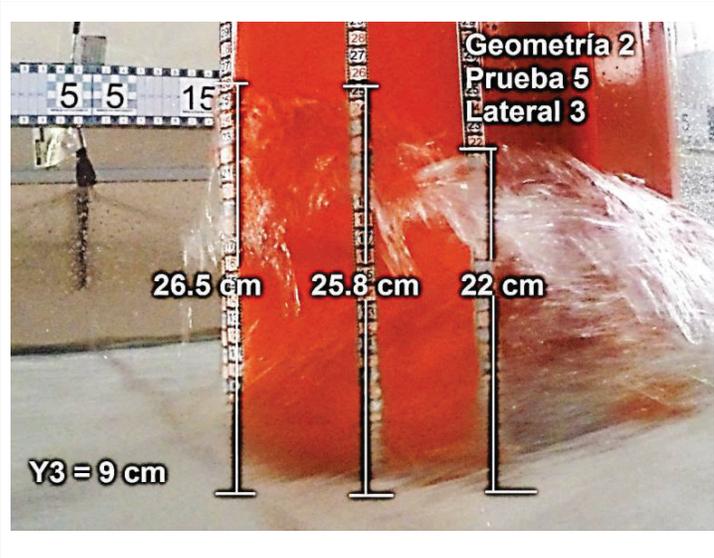
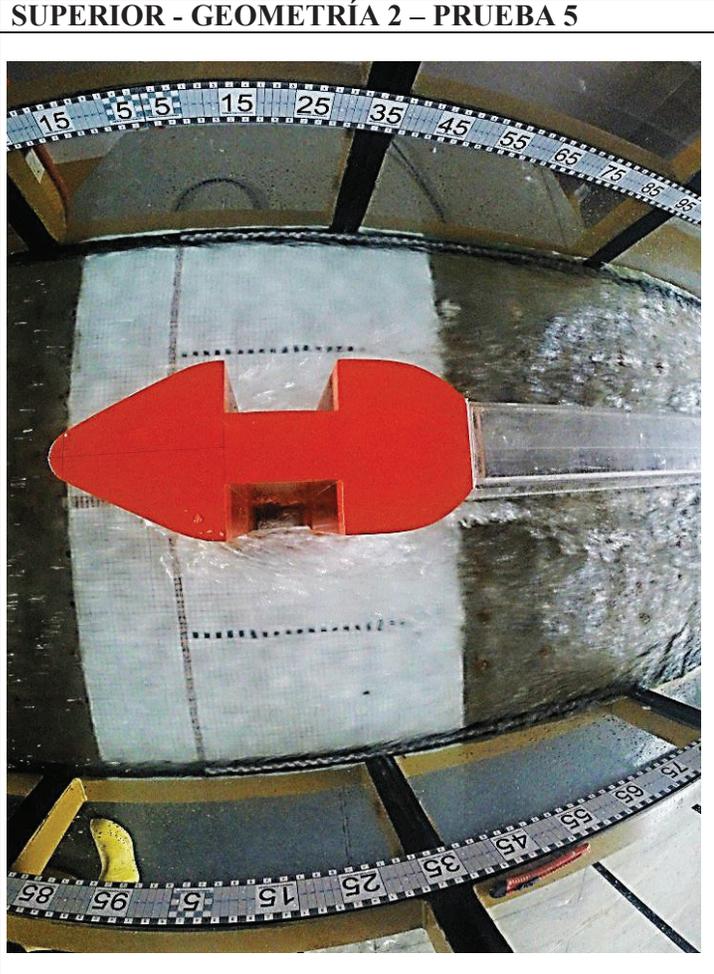
Principales Observaciones

- iv. El flujo evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- v. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- vi. Para este calado de aproximación si se genera una elevación representativa de la onda de choque.

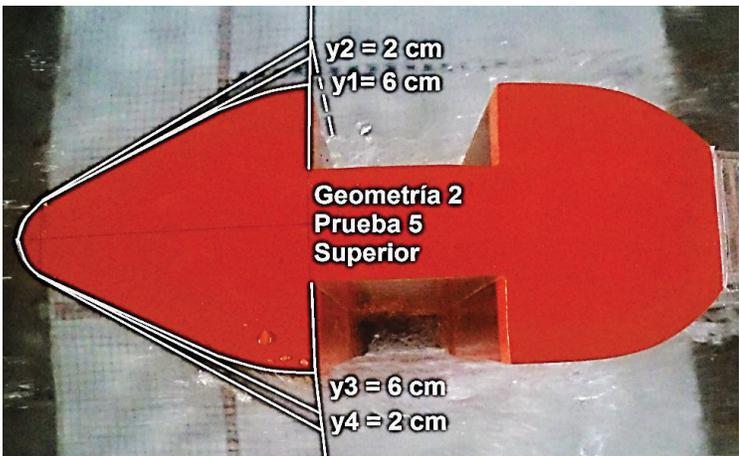
CUADRO N° 5.23

Prueba 5 (P5-G2)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 5	
<p>Geometría 2 Prueba 5 Lateral 1</p> <p>23 cm 22 cm 21.8 cm</p> <p>Y3 = 9 cm</p>	<p>Estructura 2 Foto Lateral 1 Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>Geometría 2 Prueba 5 Lateral 2</p> <p>26.5 cm 25.6 cm 24.8 cm</p> <p>Y3 = 9 cm</p>	<p>Estructura 2 Foto Lateral 2 Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.23 CONTINUACION

	<p>Estructura 2 Foto Lateral 3 Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p style="text-align: center;">SUPERIOR - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 5</p> 	<p>Estructura 2 Foto Superior Panorámica Prueba 5: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

CUADRO 5.23 CONTINUACION

 <p>Geometría 2 Prueba 5 Superior</p> <p>$y_2 = 2 \text{ cm}$ $y_1 = 6 \text{ cm}$ $y_3 = 6 \text{ cm}$ $y_4 = 2 \text{ cm}$</p>	<p>Estructura 2 Foto Superior Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
VISTA FRONTAL - GEOMETRÍA 2 – PRUEBA 4	
	<p>Estructura 2 Foto Frontal Panorámica Prueba 5: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

h1	h2	h3	
0,253	0,245	0,229	
y1	y2	y3	y4
0,06	0,02	0,06	0,02
y3 (calado de aproximación)			
0,09			

ELABORADO POR: CARLO MICHEL ANDRADE

Principales Observaciones

- iv. El flujo evidencia una onda de choque con amplitud representativa en la estructura
- v. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 no son muy altos el flujo no se separa de la estructura bifurcadora.
- vi. Para este calado de aproximación si se genera una elevación representativa de la onda de choque.

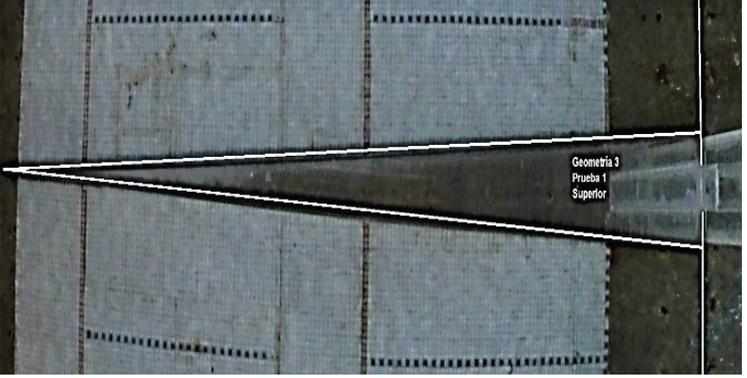
5.3.1.3 Estructura del Tabique Bifurcador No. 3 con flujo de aproximación con régimen supercrítico.

En las siguientes fotografías se analiza las características preponderantes en el análisis del paso del flujo por la estructura.

CUADRO N° 5.24

Prueba 1 (P1-G3)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 1	
	<p>Estructura 3 Foto Lateral Panorámica Prueba 1: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>
	<p>Estructura 3 Foto Lateral 1 Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 3 Foto Lateral 2 Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.24 CONTINUACION

	<p>Estructura 3 Foto Lateral 3 Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>VISTA SUPERIOR - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 1</p>	
	<p>Estructura 3 Foto Superior Prueba 1: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
<p>VISTA FRONTAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 1</p>	
	<p>Estructura 3 Foto Frontal Panorámica Prueba 1: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

h1	h2	h3	
0,050	0,043	0,048	
Y1	Y2	Y3	Y4
0	0	0	0
y3 (calado de aproximación)			
0,028			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

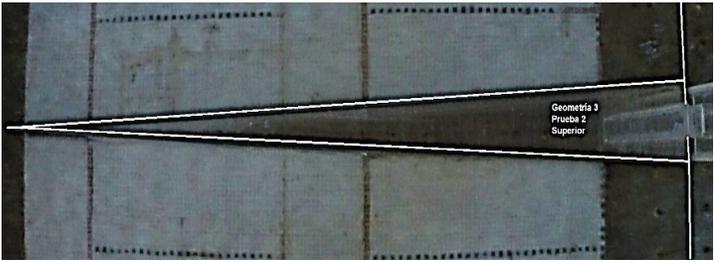
Principales Observaciones

- vii. El flujo no evidencia una onda de choque despreciable en la estructura
- viii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 son inexistentes.
- ix. No se genera una elevación representativa de la onda de choque.

CUADRO N° 5.25

Prueba 2 (P2-G3)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 2	
	<p>Estructura 3 Foto Lateral Panorámica Prueba 2: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>
 <p>Geometría 3 Prueba 2 Lateral 1 Y3= 3 cm 6.1 cm</p>	<p>Estructura 3 Foto Lateral 1 Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 3 Foto Lateral 2 Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
 <p>Geometría 3 Prueba 2 Lateral 3 Y3= 3 cm 5.3 cm</p>	<p>Estructura 3 Foto Lateral 3 Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.25 CONTINUACION

VISTA SUPERIOR - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 1	
	<p>Estructura 3 Foto Superior Prueba 2: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
VISTA FRONTAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA	
	<p>Estructura 3 Foto Frontal Panorámica Prueba 2: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

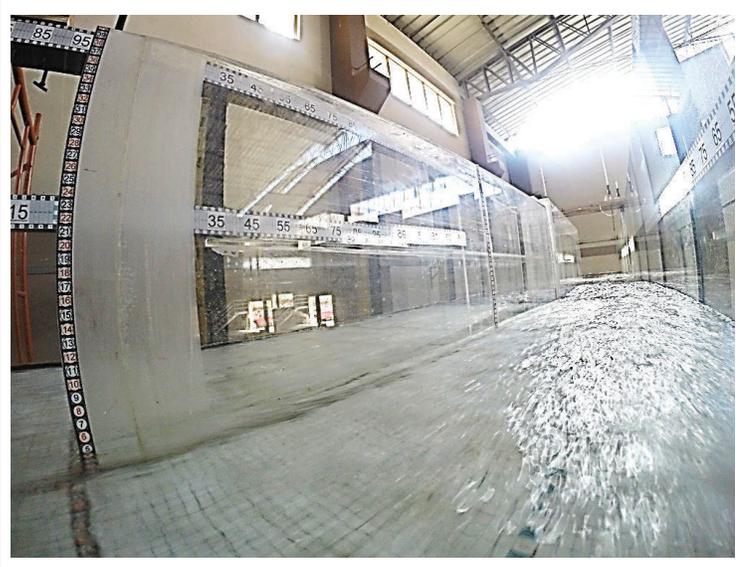
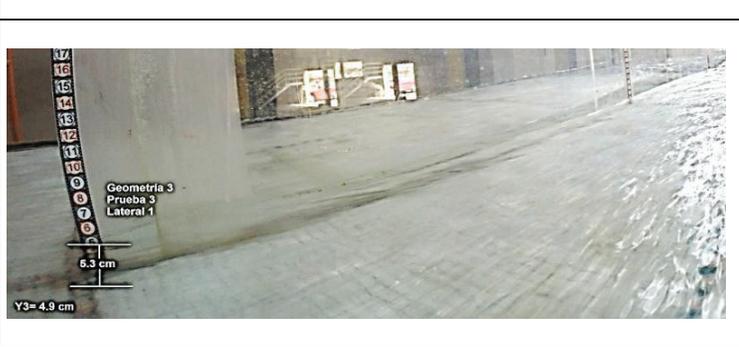
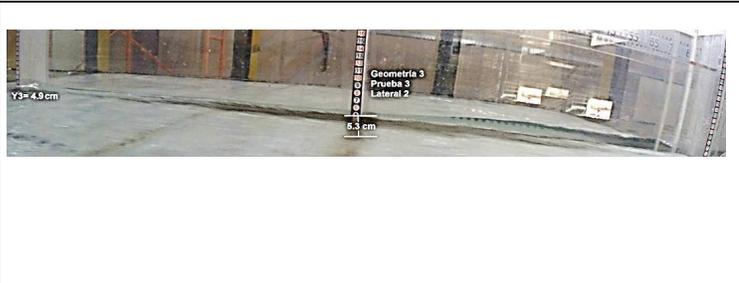
h1	h2	h3	
0,051	0,052	0,053	
y1	y2	y3	y4
0	0	0	0
y3 (calado de aproximación)			
0,03			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

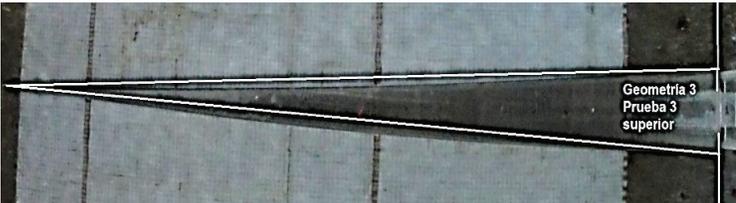
Principales Observaciones

- vii. El flujo no evidencia una onda de choque despreciable en la estructura
- viii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 son inexistentes.
- ix. No se genera una elevación representativa de la onda de choque.

CUADRO N° 5.26

Prueba 3 (P3-G3) VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 3	
	<p>Estructura 3 Foto Lateral Panorámica Prueba 3: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>
	<p>Estructura 3 Foto Lateral 1 Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 3 Foto Lateral 2 Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 3 Foto Lateral 3 Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.26 CONTINUACION

VISTA SUPERIOR - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 3	
	<p>Estructura 3 Foto Superior Prueba 3: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
VISTA FRONTAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 3	
	<p>Estructura 3 Foto Frontal Panorámica Prueba 3: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

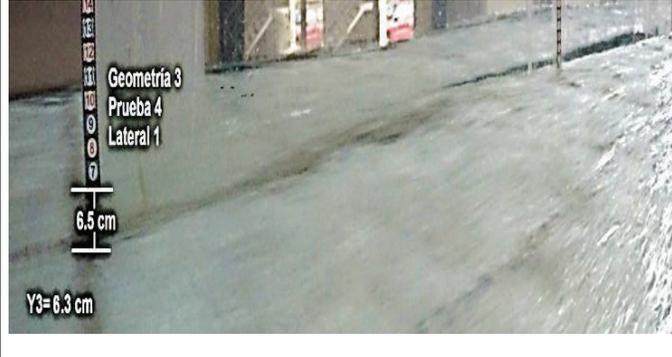
h1	h2		h3	
0,053	0,053		0,054	
y1	y2	y3		y4
0	0	0		0
Y3 (calado de aproximación)				
0,049				

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Principales Observaciones

- i. El flujo no evidencia una onda de choque despreciable en la estructura
- ii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 son inexistentes.
- iii. No se genera una elevación representativa de la onda de choque.

CUADRO N° 5.27

<p>Prueba 4 (P4-G2)</p> <p>VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 4</p>	
	<p>Estructura 3 Foto Lateral Panorámica Prueba 4: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>
	<p>Estructura 3 Foto Lateral 1 Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 3 Foto Lateral 2 Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
	<p>Estructura 3 Foto Lateral 3 Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.27 CONTINUACION

VISTA SUPERIOR - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 4	
	<p>Estructura 3 Foto Superior Prueba 4: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
VISTA FRONTAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 4	
	<p>Estructura 3 Foto Frontal Panorámica Prueba 4: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

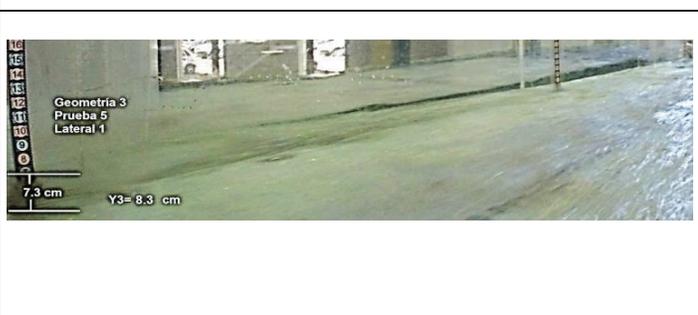
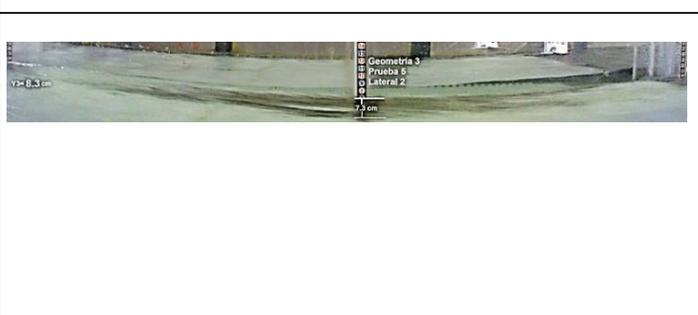
h1	h2	h3	
0,065	0,068	0,074	
y1	y2	y3	y4
0	0	0	0
Y3 (calado de aproximación)			
0,063			

REALIZADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

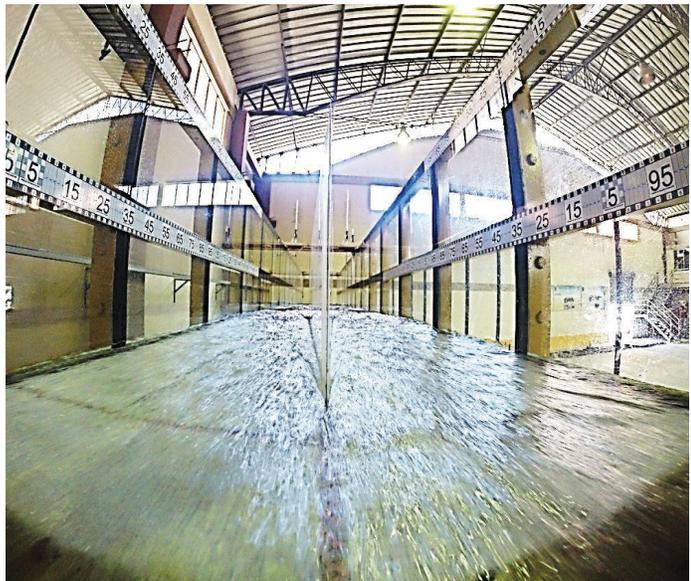
Principales Observaciones

- i. El flujo no evidencia una onda de choque despreciable en la estructura
- ii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 son inexistentes.
- iii. No se genera una elevación representativa de la onda de choque.

CUADRO N° 5.28

Prueba 5 (P5-G3)	
VISTA LATERAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 5	
	<p>Estructura 3 Foto Lateral Panorámica Prueba 5: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>
 <p>Geometría 3 Prueba 5 Lateral 1</p> <p>7.3 cm Y3= 8.3 cm</p>	<p>Estructura 3 Foto Lateral 1 Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
 <p>Y3= 8.3 cm</p> <p>Geometría 3 Prueba 5 Lateral 2</p> <p>7.7 cm</p>	<p>Estructura 3 Foto Lateral 2 Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
 <p>Y3= 8.3 cm</p> <p>Geometría 3 Prueba 5 Lateral 3</p> <p>8.7 cm</p>	<p>Estructura 3 Foto Lateral 3 Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque en la cara lateral de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>

CUADRO 5.28 CONTINUACION

VISTA SUPERIOR - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 5	
	<p>Estructura 3 Foto Superior Prueba 5: Se realiza una medición digital de las características de la onda de choque desde la vista superior lo que genera una visualización de la separación de la onda de choque de la estructura que se encuentra en el canal hidrodinámico.</p>
VISTA FRONTAL - GEOMETRÍA 3 – PRUEBA 4	
	<p>Estructura 3 Foto Frontal Panorámica Prueba 5: Se realiza una observación panorámica de la estructura y de las perturbaciones generadas.</p>

h1	h2	h3	
0,073	0,073	0,087	
y1	y2	y3	y4
0	0	0	0
Y3 (calado de aproximación)			
0,083			

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Principales Observaciones

- i. El flujo no evidencia una onda de choque despreciable en la estructura
- ii. Los valores geométricos de Y1, Y2, Y3, Y4 son inexistentes.
- iii. No se genera una elevación representativa de la onda de choque.

5.3.2 ONDAS DE CHOQUE POR EL PASO DEL FLUJO ATRAVES DEL TABIQUE BIFURCADOR CON FLUJO DE APROXIMACIÓN EN REGIMEN SUPERCRITICO.

En el siguiente cuadro se presenta los valores geométricos medidas de la onda de choque en la Estructura No. 1.

TABLA N° 5.4

MODELO FÍSICO ESTRUCTURA No. 1							
No	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)
P1-G1	0,09	0,08	0,06	0,03	0,02	0,03	0,02
P2-G1	0,20	0,21	0,20	0,14	0,04	0,15	0,05
P3-G1	0,15	0,15	0,13	0,15	0,05	0,15	0,06
P4-G1	0,23	0,25	0,24	0,18	0,14	0,15	0,13
P5-G1	0,24	0,26	0,24	0,21	0,07	0,22	0,07
No	Lv (m)	Lh (m)	Lv' (m)	Lh' (m)	α (grados)	β	Φ
P1-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	10,15	5,55	10,15
P2-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	31,96	4,34	32,57
P3-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	33,16	4,90	33,16
P4-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	35,82	8,98	33,16
P5-G1	0,08	0,12	0,02	0,01	39,10	4,13	39,62
No	$\omega\Phi$						
P1-G1	5,03						
P2-G1	4,64						
P3-G1	5,71						
P4-G1	9,91						
P5-G1	3,97						

MODELO FÍSICO ESTRUCTURA No. 2							
No	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)
P1-G2	0,09	0,08	0,08	0,03	0,01	0,02	0,00
P2-G2	0,21	0,20	0,17	0,12	0,03	0,13	0,03
P3-G2	0,16	0,15	0,12	0,16	0,03	0,16	0,02
P4-G2	0,24	0,23	0,22	0,16	0,04	0,17	0,03
P5-G2	0,25	0,24	0,23	0,06	0,02	0,06	0,02
No	Lv (m)	Lh (m)	Lv' (m)	Lh' (m)	α (grados)	β	Φ
P1-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	9,58	1,72	8,51
P2-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	32,91	4,35	33,71
P3-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	37,90	2,85	38,51
P4-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	38,51	3,73	39,67
P5-G2	0,07	0,12	0,02	0,01	20,33	4,90	20,33
No	$\omega\Phi$						
P1-G2	1,06						
P2-G2	4,19						
P3-G2	2,24						
P4-G2	3,03						
P5-G2	4,90						

MODELO FÍSICO ESTRUCTURA No. 3							
No	h1 (m)	h2 (m)	h3 (m)	Y1 (m)	Y2 (m)	Y3 (m)	Y4 (m)
P1-G3	0,05	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
P2-G3	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
P3-G3	0,05	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
P4-G3	0,07	0,07	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
P5-G3	0,07	0,07	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
No	Lv (m)	Lh (m)	Lv' (m)	Lh' (m)	α (grados)	β	Φ
P1-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
P2-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
P3-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
P4-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
P5-G3	0,00	0,00	0,64	1,29	0,00	0,00	0,00
No	$\omega\Phi$						
P1-G3	0,00						
P2-G3	0,00						
P3-G3	0,00						
P4-G3	0,00						
P5-G3	0,00						

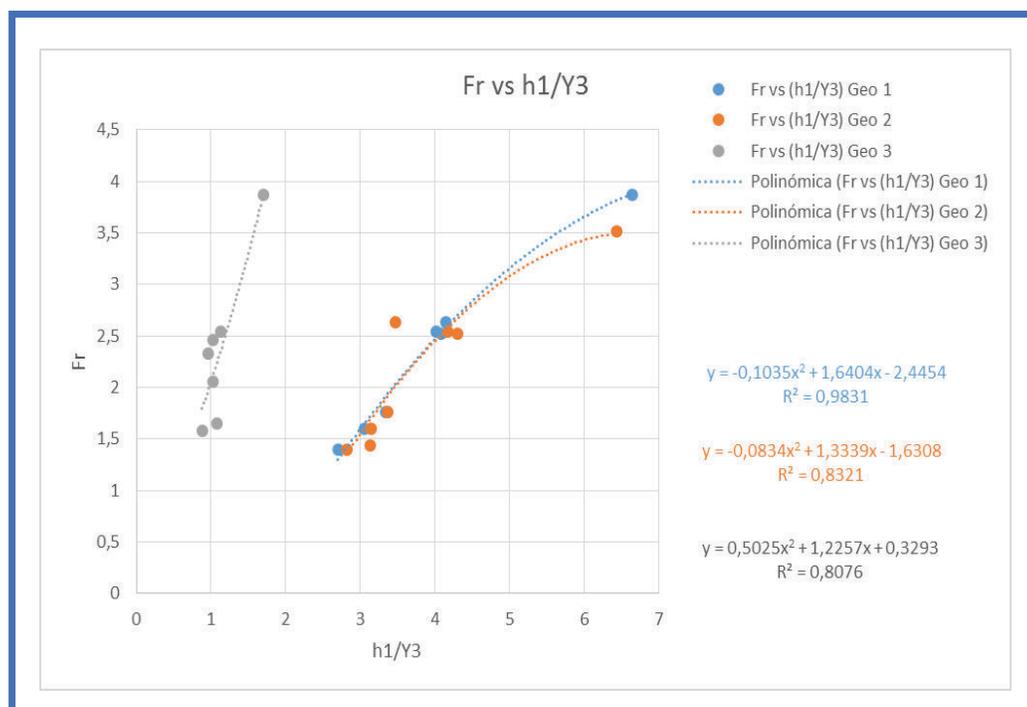
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Después de una evaluación se decide utilizar los siguientes parámetros adimensionales:

$$0 = f\left(\frac{V_3}{\sqrt{Y_3 \cdot g}}, \frac{y_1}{Y_3}, \frac{y_3}{Y_3}, \frac{h_1}{Y_3}, \frac{h_2}{Y_3}, \alpha, \beta, \theta, \omega\right)$$

En este modelo las variaciones debidas a tensión superficial, así como por viscosidad son despreciables.

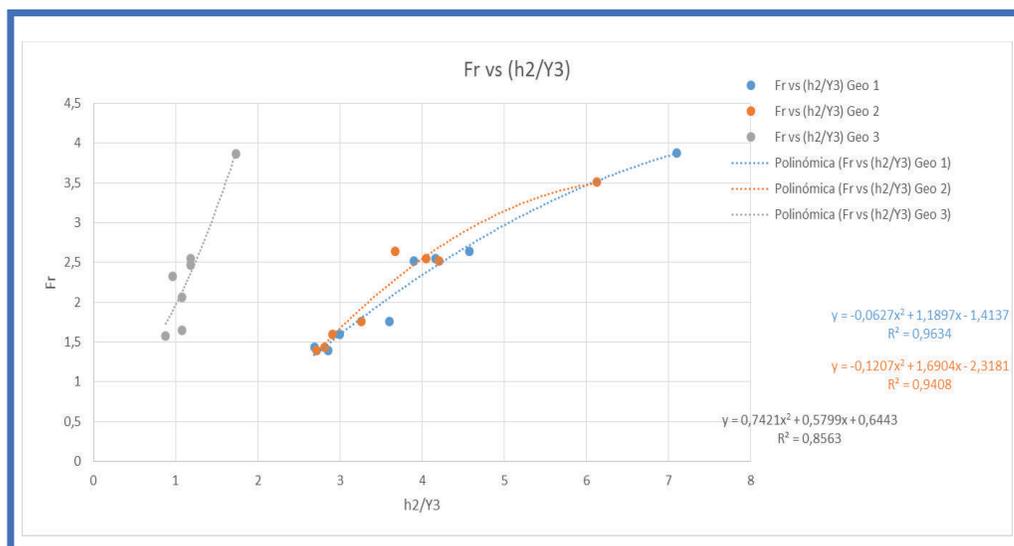
GRÁFICO N° 5.8



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Como $Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Y_3}}$ además h_1 es la primera elevación de la onda de choque de las geometrías de los tabiques, en el paso del flujo podemos observar que tanto en el eje de las abscisas como en el eje de las ordenadas de la gráfica presentada los valores están afectados por la división de un mismo valor Y_3 que es el calado de aproximación, esto no da una relación directa entre la velocidad de aproximación al tabique bifurcador y la elevación de la onda de choque por lo que podemos determinar una proporcionalidad directa es decir mientras mayor sea la velocidad mayor será la separación vista en planta de la onda de choque.

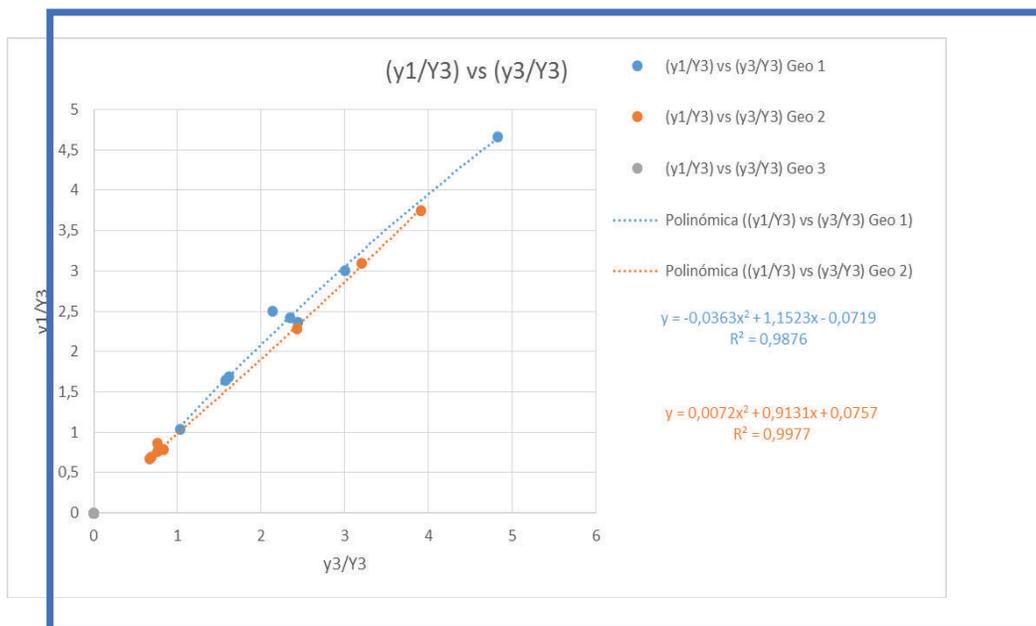
GRÁFICO N° 5.9



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Como $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot Y_3}}$ además h_2 es la segunda elevación de la onda de choque de las geometrías de los tabiques, en el paso del flujo podemos observar que tanto en el eje de las abscisas como en el eje de las ordenadas de la gráfica presentada los valores están afectados por la división de un mismo valor Y_3 que es el calado de aproximación, esto no da una relación directa entre la velocidad de aproximación al tabique bifurcador y la elevación de la onda de choque por lo que podemos determinar una proporcionalidad directa es decir mientras mayor sea la velocidad mayor será la separación vista en planta de la onda de choque.

GRAFICO N° 5.10



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Como y_1 , y_3 son la separación de la onda de choque vista en planta y Y_3 es el calado de aproximación a la estructura se ve que en la geometría de la Estructura No. 3 no existe ningún tipo de cuantificación a diferencia de las Estructuras No.1 y No.2 donde se encuentra una tendencia directamente proporcional.

5.4 CONCLUSIONES DEL CAPITULO 5

Las características de la onda de choque en la Estructura No.1 son evidentes de proporciones mayores por lo que podemos analizar que esta geometría tiene un funcionamiento no apropiado en la operación con flujos de aproximación supercríticos.

Como se muestra en el registro tiene una elevación mucho mayor la onda provocada con la Estructura No.1 que la onda de choque que se genera con la Estructura No.3.

El análisis experimental permite visualizar que el flujo supercrítico con la Estructura No.1 y con la Estructura No. 2 generan ondas de choque mucho mayores que con la Estructura No. 3, donde se visualiza una perturbación casi imperceptible la que la geometría de esta estructura genera muy pocas perturbaciones siendo casi imperceptible una onda de choque en elevación o en planta lo que genera un comportamiento idóneo para a separación de flujos supercríticos.

El análisis se generó en condiciones de laboratorio con una similitud froudiana por lo que se evidencia en el análisis experimental que en flujos supercríticos las geometrías esbeltas funcionan mucho mejor, se evidencia de igual manera que las geometrías alargadas en tabiques bifurcadores para el caso de flujos supercríticos tienen un comportamiento idóneo en comparación con geometrías cortas.

Se evidencia que en flujos supercríticos es necesario el uso de geometrías más eficientes hidráulicamente hablando pues las perturbaciones que se generan en el flujo debido a la separación son realmente fuertes si no se ocupa una geometría adecuada para el tipo de flujo.

En la Estructura No.1 se observa que la elevación es mayor que en la Estructura No. 2 y en la Estructura No. 3., de igual manera sucede con la separación de la onda vista en planta.

5.5 RECOMENDACIONES DEL CAPÍTULO 5

En el caso de caudales de operación con flujo supercrítico donde exista la necesidad de separar caudales, se recomienda que la geometría de la estructura del tabique bifurcador debe ser alargada u esbelta, como se evidencia en las pruebas las geometrías no esbeltas en flujos supercríticos no tienen un comportamiento que permita una eficiencia hidráulica en la conducción debido a la generación de perturbaciones pronunciadas.

CAPITULO 6

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL TABIQUE ÓPTIMO

6.1 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DEL TABIQUE ÓPTIMO CON FLUJO DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO.

Basado en las características del flujo y el comportamiento de la Estructura No. 1, Estructura No.2, y la Estructura No.3, en la operación con flujo supercrítico se procede a recomendar una geometría como la Estructura No.3, para la separación de flujos supercríticos en canales abiertos. Con el objetivo de minimizar al máximo las perturbaciones del flujo aguas debajo de la estructura del tabique bifurcador, así como también equalizar la separación de caudales en cada cámara.

En el análisis experimental del funcionamiento hidráulico con las recomendaciones planteadas se seleccionan los mismos 8 ensayos utilizados con las Estructuras No. 1 y No. 2.

En el análisis experimental con la geometría óptima se utilizaron los 8 ensayos analizados en los capítulos anteriores

- i. Operación con números de Froude bajos, que corresponde a velocidades de operación bajas.
- ii. Operación con varios números de Froude, generación de un espectro de datos de análisis.
- iii. Operación con números de Froude altos, que corresponde a velocidades de operación altas.

6.2 DESCRIPCIÓN DEL TABIQUE ÓPTIMO CON FLUJO SUPERCRÍTICO.

En el siguiente cuadro se presenta las modificaciones realizada a la geometría óptima en función de las otras dos geometrías lo que nos permite tener menor perturbación aguas debajo de la separación de flujos supercríticos.

TABLA N° 6.25

MODIFICACIONES GEOMETRICAS				
ESTRUCTURA DEL TABIQUE BIFURCADOR No. 3				
No	Modificación	Observaciones	Fotografías	Gráficos
1	variación de la geometría extensión del parámetro geométrico longitudinal Lh'	Se busca generar una geometría más larga que permita la separación de flujos supercríticos de manera más suave.	Del Cuadro No. 22 al Cuadro No. 26	Gráfico No. 8 Gráfico No.9 Gráfico No.10
2	variación de la geometría contracción del parámetro geométrico de esbeltez Lv'	Se busca generar una geometría más esbelta que genere una menor área de choque que permita la separación de flujos supercríticos de manera más suave.	Del Cuadro No. 22 al Cuadro No. 26	Gráfico No. 8 Gráfico No.9 Gráfico No.10
3	eliminación de los parámetros Lh , Lv,	Se busca conseguir una geometría más apropiada para separar flujos supercríticos la cual genere una menor perturbación aguas debajo de la separación.	Del Cuadro No. 22 al Cuadro No. 26	Gráfico No. 8 Gráfico No.9 Gráfico No.10

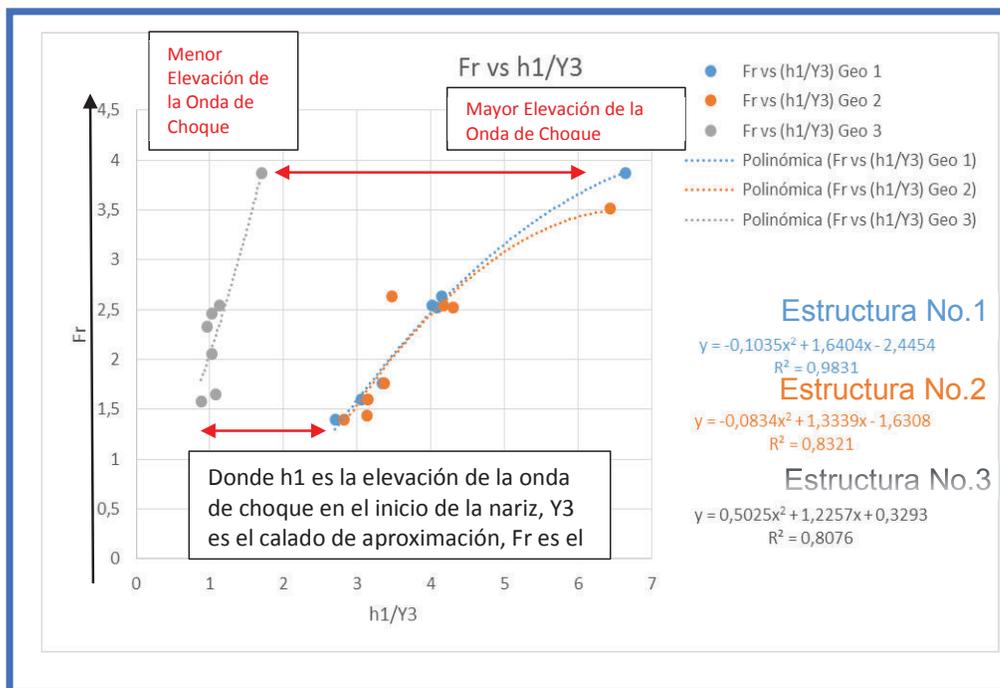
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

6.3 COMPARACION DE LOS PARAMETROS DEL TABIQUE ÓPTIMO CON LOS OTROS DOS TABIQUES.

Se realiza el análisis en las gráficas pertinentes adimensionales que mostramos a continuación:

Numero de Froude vs (elevación inicial de la onda de choque) / (calado de aproximación)

GRAFICO N° 6.11



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Para números de Froude muy similares en las tres estructuras se denota un comportamiento muy similar entre la primera y la segunda estructura, en la tercera estructura se puede evidenciar que el comportamiento hidráulico es el idóneo pues casi no existe una onda de choque en esta estructura. Esto se refleja con los ensayos experimentales a continuación se muestra fotografías comparativas.

FOTO N° 6.31

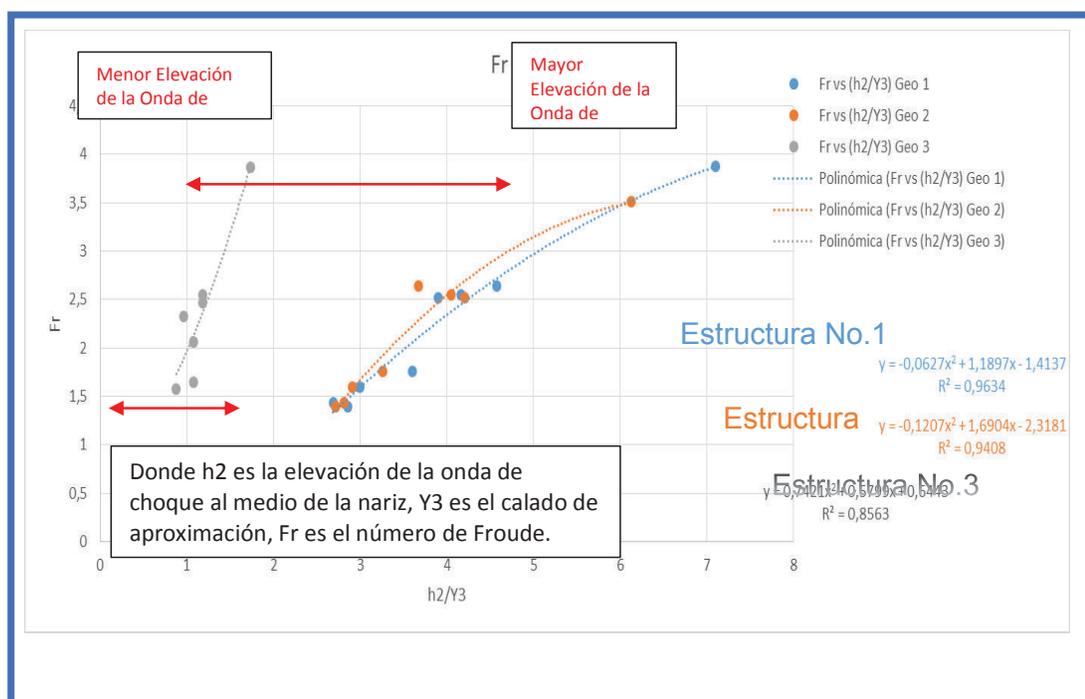


ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Fr vs (h1/Y3)	
ESTRUCTURA No. 1	
$Fr = -0,1035 * \frac{h1^2}{Y3^2} + 1,6404 * \frac{h1}{Y3} - 2,4454$	ECUACION 6.4
ESTRUCTURA No. 2	
$Fr = -0,0834 * \frac{h1^2}{Y3^2} + 1,3339 * \frac{h1}{Y3} - 1,6308$	ECUACION 6.5
ESTRUCTURA No. 3	
$Fr = -0,5025 * \frac{h1^2}{Y3^2} + 1,2257 * \frac{h1}{Y3} + 0,3293$	ECUACION 6.6

Numero de Froude vs (elevación media de la onda de choque) / (calado de aproximación)

GRAFICO N° 6.12

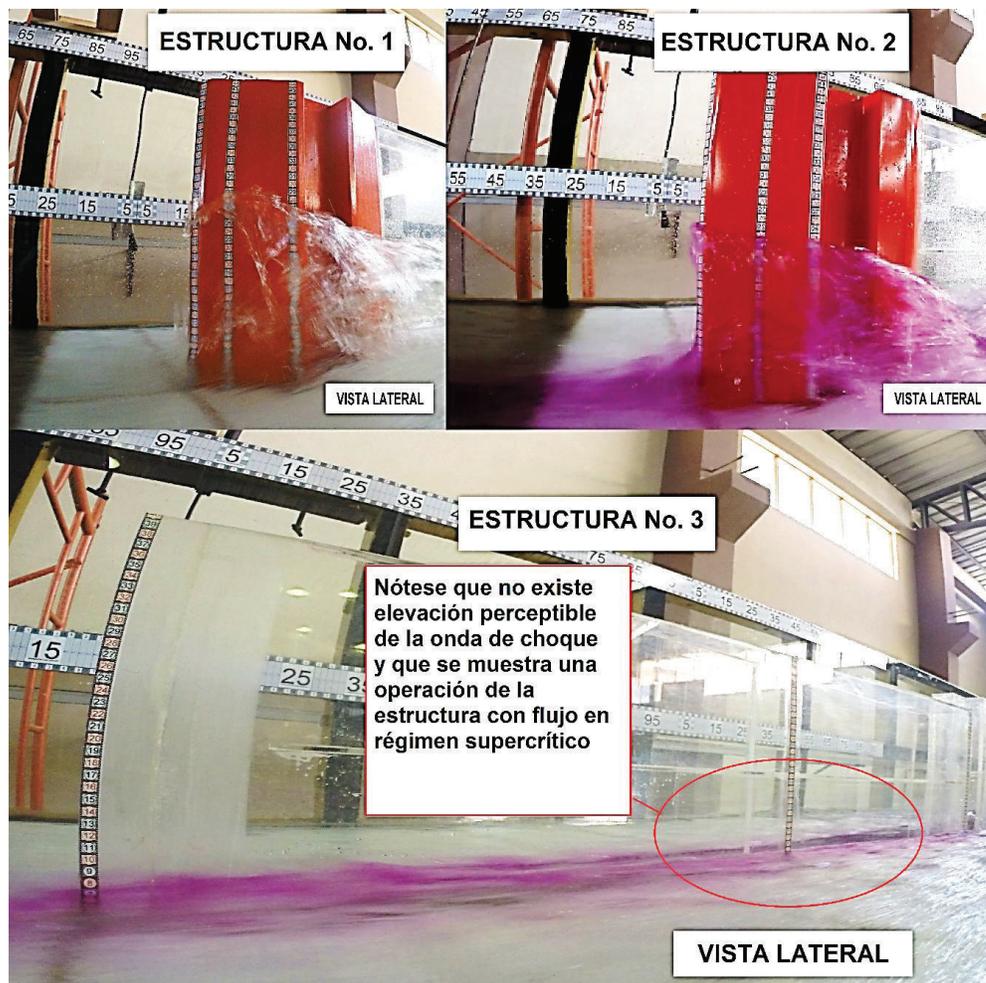


ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Para números de Froude muy similares en las tres estructuras se denota un comportamiento muy similar entre la primera y la segunda estructura, en la tercera estructura se puede evidenciar que el comportamiento hidráulico es el idóneo pues casi no existe una

onda de choque en esta estructura. Esto se refleja con los ensayos experimentales a continuación se muestra fotografías comparativas.

FOTO N° 6.32



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Fr vs (h ₂ /Y ₃)	
ESTRUCTURA No. 1	
$Fr = -0,0627 * \frac{h_2^2}{Y_3^2} + 1,1897 * \frac{h_2}{Y_3} - 1,4137$	
ESTRUCTURA No. 2	
$Fr = -0,1207 * \frac{h_2^2}{Y_3^2} + 1,6904 * \frac{h_2}{Y_3} - 2,3181$	
ESTRUCTURA No. 3	
$Fr = 0,7421 * \frac{h_2^2}{Y_3^2} + 0,5799 * \frac{h_2}{Y_3} + 0,6443$	

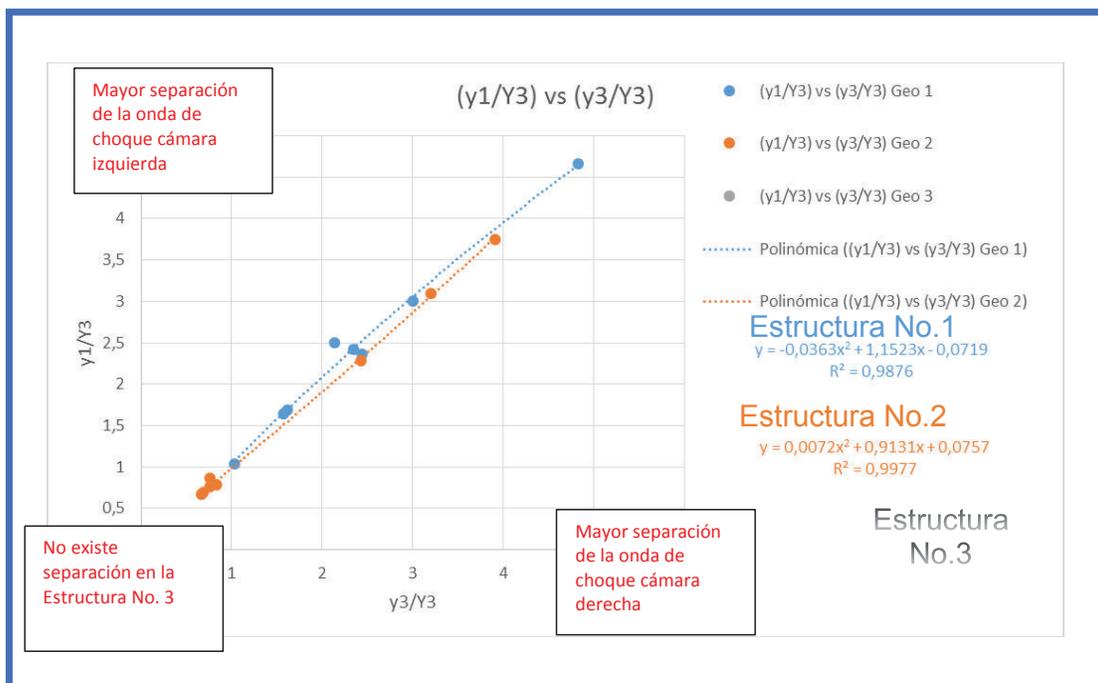
ECUACION 6.7

ECUACION 6.8

ECUACION 6.9

GRAFICO N° 6.13

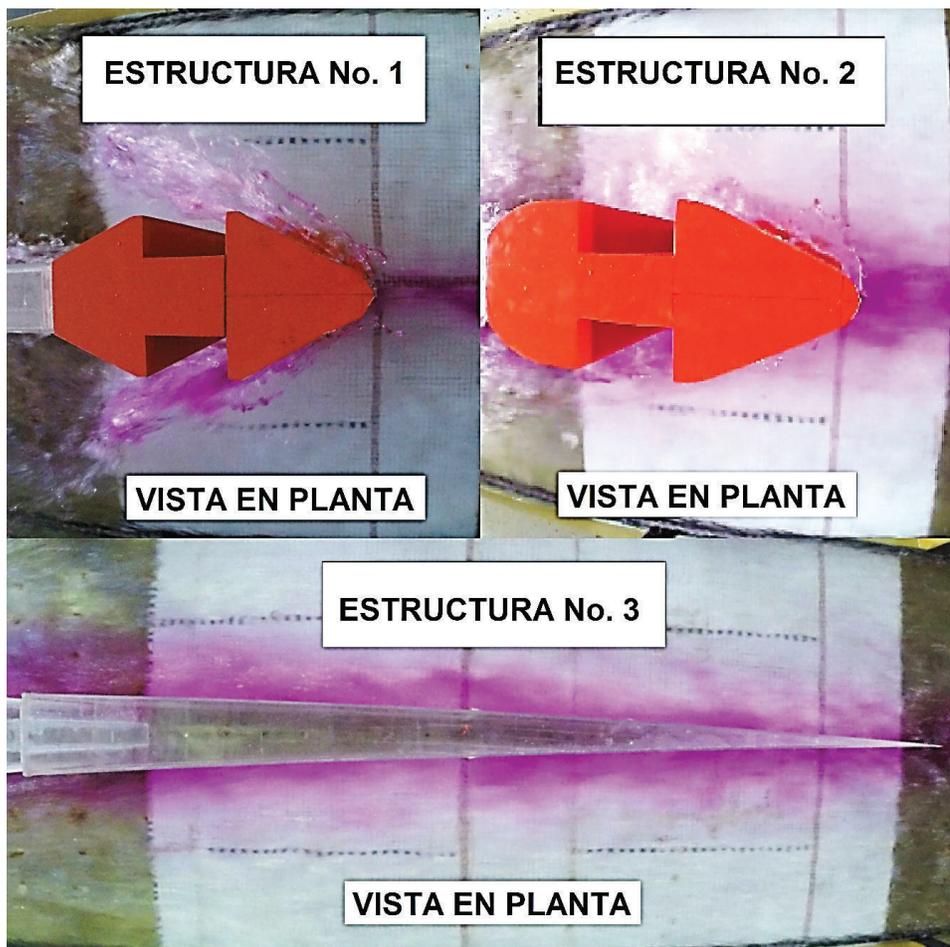
(Separación de la onda y_1) / (Calado de aproximación Y_3) Vs (Separación de la onda y_3) / (Calado de aproximación Y_3)



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Para números de Froude muy similares en las tres estructuras, se denota un comportamiento muy similar entre la primera y la segunda estructura, en la tercera estructura se puede evidenciar que el comportamiento hidráulico es el idóneo pues no existe una separación de la onda de choque en esta estructura. Esto se refleja con los ensayos experimentales a continuación se muestra fotografías comparativas.

FOTO N° 6.33



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

ESTRUCTURA No. 1	
$\frac{y1}{y3} = -0,0363 * \frac{y3^2}{y3^2} + 1,1523 * \frac{y3}{y3} - 0,0719$	ECUACION 6.10
ESTRUCTURA No. 2	
$\frac{y1}{y3} = 0,0072 * \frac{y3^2}{y3^2} + 0,9131 * \frac{y3}{y3} + 0,0757$	ECUACION 6.7
ESTRUCTURA No. 3	
$\frac{y1}{y3} = 0$	ECUACION 6.7

6.4 RESULTADOS OBTENIDOS

La estructura optimizada no genera elevación de la onda de choque en la punta de la nariz del tabique bifurcador, que sea perceptible o que tenga incidencia en el flujo aguas abajo, caso que no sucede con las estructuras uno y dos en las cuales se tiene una elevación considerablemente alta y que afectan la estabilidad del flujo aguas abajo del tabique.

6.5 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO CON EL TABIQUE ÓPTIMO

El flujo supercrítico al ser separado por la Estructura No. 3 que es la óptima bajo estas condiciones casi no sufre una perturbación apreciable, en las siguientes fotografías se presenta una comparativa para poder visualizar de mejor manera que el comportamiento de la Estructura No. 3 es la óptima.

6.6 CONCLUSIONES

6.6.1 CONCLUSIONES DEL TABIQUE BIFURCADOR ESTRUCTURA No. 1

La Estructura No. 1 denota un mal funcionamiento con las condiciones de flujo supercrítico, pues es evidente la generación de una onda de choque que tiene una incidencia notable en el flujo generando perturbaciones que hacen que el flujo deje de ser estable, perdiendo eficiencia hidráulica aguas abajo.

Por otro lado esta estructura genera una separación inapropiada del flujo lo que realmente es un inconveniente si lo que se busca es ecualizar el flujo aguas debajo de la estructura de separación.

6.6.2 TABIQUE BIFURCADOR ESTRUCTURA No. 2

La Estructura No. 2 denota un mal funcionamiento con las condiciones de flujo supercrítico, pues es evidente la generación de una onda de choque que tiene una incidencia notable en el flujo generando perturbaciones que hacen que el flujo deje de ser estable, perdiendo eficiencia hidráulica aguas abajo.

Por otro lado esta estructura genera una separación inapropiada del flujo lo que realmente es un inconveniente si lo que se busca es ecualizar el flujo aguas debajo de la estructura de separación.

6.6.3 TABIQUE BIFURCADOR ESTRUCTURA No. 3

La Estructura No. 3 es la estructura óptima para flujos supercríticos, las perturbaciones en el flujo son casi imperceptibles, así también se ecualiza la separación del flujo o que ayuda a la eficiencia hidráulica de las estructuras hidráulicas aguas debajo de la estructura separadora.

CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES.

Las estructuras hidráulicas que operan con flujo en régimen supercrítico en especial las que hemos tratado las cuales separan el flujo, deben cumplir con un diseño óptimo de su geometría, el cual asegure que las condiciones del flujo aguas abajo de la separación del mismo sea estable, además debe minimizar las ondas de choque, debido a que el impacto generado por estas aguas abajo de la separación daña las estructuras, debe generar una división de caudales de manera similar, lo que facilitará la operación y mantenimiento de las estructuras hidráulicas de conducción aguas abajo de la bifurcación del flujo.

Estas estructuras son de gran importancia para separar flujos debido a que siempre en una conducción se requiere dividir los caudales por distintas condiciones inherentes a cada proyecto, esta separación debe generar caudales similares, para que no se genere una onda de choque la cual perturbe el flujo, alcanzar este objetivo es indispensable y se debe realizar la construcción y el diseño de geometrías de tabiques bifurcadores acordes al tipo del régimen del flujo en operación, considerando que varias de estas estructuras en nuestra región lo hacen en flujos con régimen supercrítico.

En los distintos sistemas de conducción en la región, que trabajan en régimen de flujo supercrítico debido a las condiciones geográficas de las ciudades andinas o del diseño inherente a cada proyecto hidráulico, se requiere implementar un diseño de tabiques bifurcadores de flujo con una geometría tal que permita:

- Eliminar tanto la elevación así como la separación en planta de la onda de choque en el área de ataque de la nariz del tabique bifurcador, la cual tiene incidencia en la operación con flujos en regímenes supercríticos.
- Eliminar las perturbaciones aguas debajo del tabique bifurcador debido a una geometría precaria del tabique bifurcador.
- El flujo al no tener una elevación por la onda de choque genera un flujo estable aguas debajo del tabique bifurcador

El impacto generado por la onda de choque en las paredes contenedoras de las cámaras se eliminan.

Generar una división de caudales de manera similar.

El flujo analizado en las dos primeras estructuras bifurcadoras No. 1 y No. 2, es tridimensional y complejo, se caracteriza por tener una inercia realmente alta que genera ondas, choques e impactos violentos sobre las paredes de las estructuras de conducción es decir en cada cámara, lo que genera un riesgo en la estabilidad de las estructuras contenedoras.

El diseño de las estructuras de tabiques bifurcadores deben tener un diseño considerando que en la mayoría de casos en nuestra región trabajan en regímenes de flujo supercríticos, esta geometría perteneciente a la geometría de la Estructura No. 3 es óptima de igual manera en flujos con régimen suscritico.

Además el correcto diseño y asignación de dimensiones de este tipo de estructuras, que en gran cantidad hasta la fecha se han diseñado con criterios de hidráulica básica y unidimensional, deben ser analizadas con una óptica más amplia ya que de esta manera no se puede tener una estructura óptima que bifurque de manera similar los caudales.

Por lo que las Estructuras No.1 y No.2, no cumplen con las expectativas de diseño en este estudio y en la realidad ponen en riesgo la estabilidad de las obras hidráulicas. Siendo la estructura No. 3, la estructura idónea para la bifurcación de caudales que operen en régimen de flujo supercrítico.

La optimización de las geometrías del tabique bifurcador para caudales que operen en flujos de régimen supercrítico, presentados en este estudio son una colaboración al estudio de las estructuras hidráulicas de nuestra región debido a que manejamos condiciones únicas inherentes a nuestra geografía y topografía, siendo realmente necesario la utilización de una estructura optima como lo es la No. 3 bajo las condiciones de flujo antes mencionada.

Queda además ratificado en este estudio la importancia de realizar una modelación física que permita constatar el fenómeno, además de un correcto análisis dimensional que nos facilite la solución de problemas en el dimensionamiento hidráulico de obras importantes de infraestructura primordial para el país, facilitando en un contexto técnico los resultados arrojados por el estudio experimental como ábacos adimensionales de diseño.

7.2 CONCLUSIONES ACERCA DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

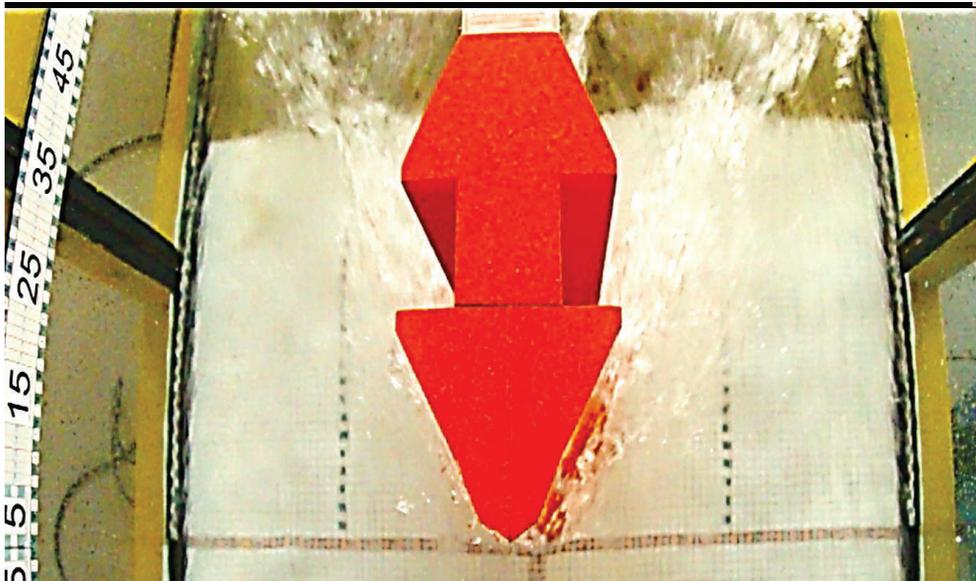
El estudio experimental de las estructuras de tabiques bifurcadores en flujos con régimen supercrítico No. 1, No. 2, y No. 3, muestran que en las dos primeras se genera una alta incidencia de las ondas de choque en la nariz del tabique bifurcador, eliminándose estos efectos en la estructura optimizada No.3, la cual elimina la presencia de una onda de choque y además genera que el flujo no se separe de la estructura, además ecualiza la división de caudales.

7.2.1 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 1.

Al observar el comportamiento del flujo que opera con la estructura bifurcadora No. 1, con su diseño original es una estructura que no está acorde a los objetivos de la misma, previstos para la bifurcación de caudales en régimen de flujo supercrítico, siendo así una estructura no apta para los caudales bajo estas condiciones considerando que:

- El flujo no evidencia una onda de choque con una elevación representativa en la estructura para valores de números de Froude que se generen en flujos con régimen supercrítico es decir para $Fr > 1$.
- La estructura tiene una geometría que genera una separación del flujo visto en planta, este flujo inestable impacta contra las paredes de las cámaras transportadoras lo que pone en peligro a la estructura, además genera una perturbación y una alta inercia por lo que el flujo se vuelve inestable haciendo imposible el manejo del mismo, esto genera una gran cantidad de perturbaciones aguas debajo de la estructura bifurcadora, generando varios problemas en la operación y mantenimiento de cualquier estructura aguas debajo de la estructura bifurcadora.
- Se genera una división del flujo desigual lo que impide una división ecualizada, haciendo el trabajo de operación y mantenimiento de las estructuras mucho más difícil si se utiliza esta geometría en una estructura bifurcadora.

FOTO N° 7.34



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

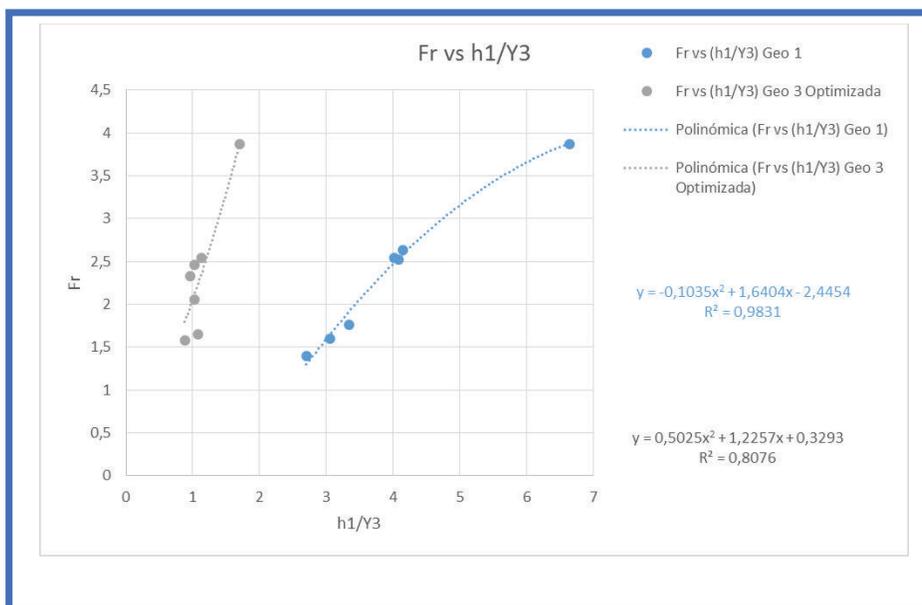
FOTO N° 7.35



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

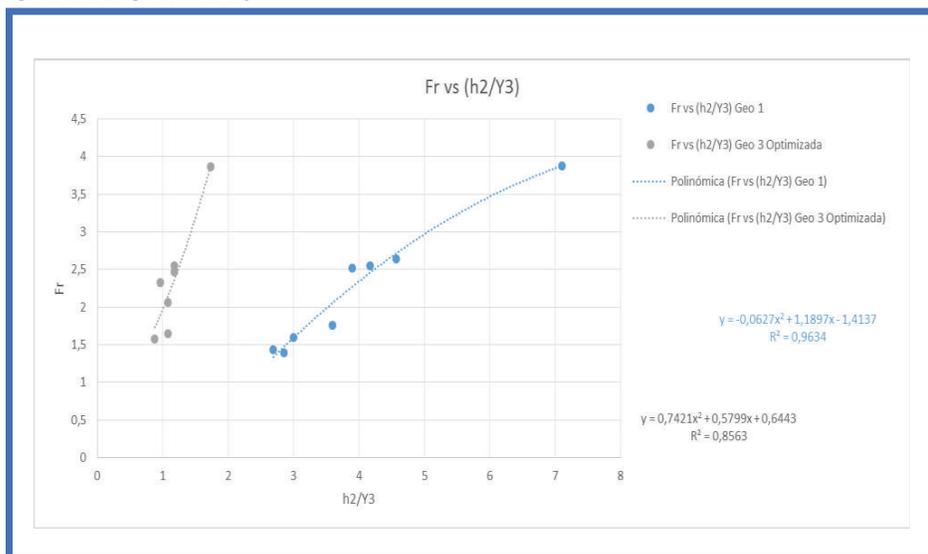
La investigación experimental ha generado la necesidad de modificar la geometría de Estructura No. 1, para optimizar el inadecuado comportamiento hidráulico con esta estructura, que compromete a la estructura completa pues genera una onda de choque la cual pone en riesgo la estabilidad de la obra. En la siguiente grafica se muestra el comportamiento de la onda de choque en la estructura original y también en la estructura modificada en la cual se aprecia el comportamiento inadecuado de la estructura No. 1.

GRAFICO N° 7.14



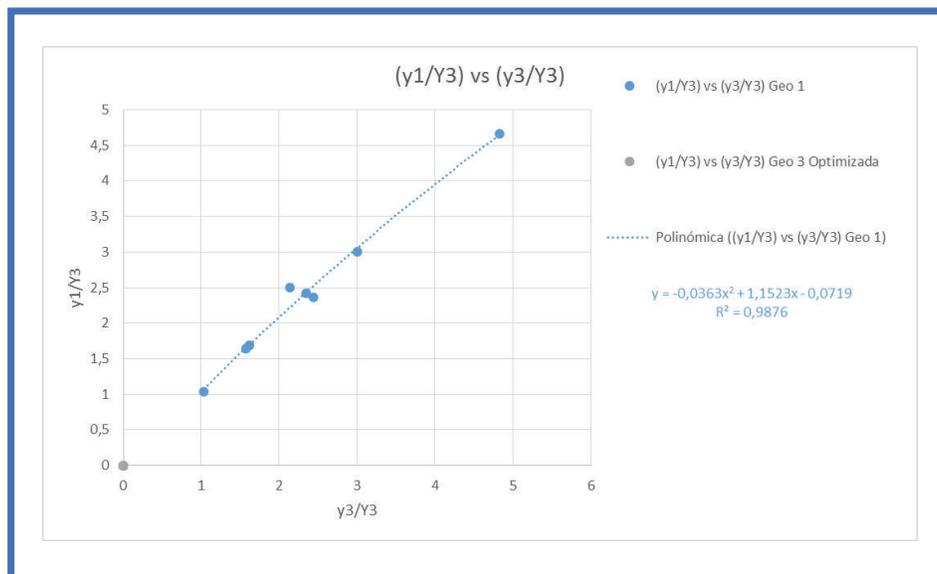
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

GRÁFICO N° 7.15



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

GRÁFICO N° 7.16



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Se observa claramente que la Estructura tabique bifurcador No. 1 tiene una elevación de la onda de choque tanto en la parte inicial y media claramente alta mientras que en la Estructura tabique bifurcador No. 3 es decir la optimizada es muy baja la elevación de la

onda de choque a lo largo de la estructura, en efecto no es apreciable a simple vista debido a sus bajos valores de elevación.

Así mismo la separación vista en planta de la onda de choque en la Estructura tabique bifurcador No. 1, realmente es notoria, en la Estructura tabique bifurcador No. 3 es decir la optimizada desaparece este efecto, es decir que se puede observar que la Estructura No. 1 en efecto genera ondas de choque que ponen en peligro la estabilidad de la estructura, debido al impacto de manera violenta por parte de la onda en las cámaras.

Se observa un flujo inestable aguas abajo de la Estructura No. 1, debido a las ondas de choque generadas los caudales en cada cámara no son similares, además se denota una fuerte perturbación aguas abajo.

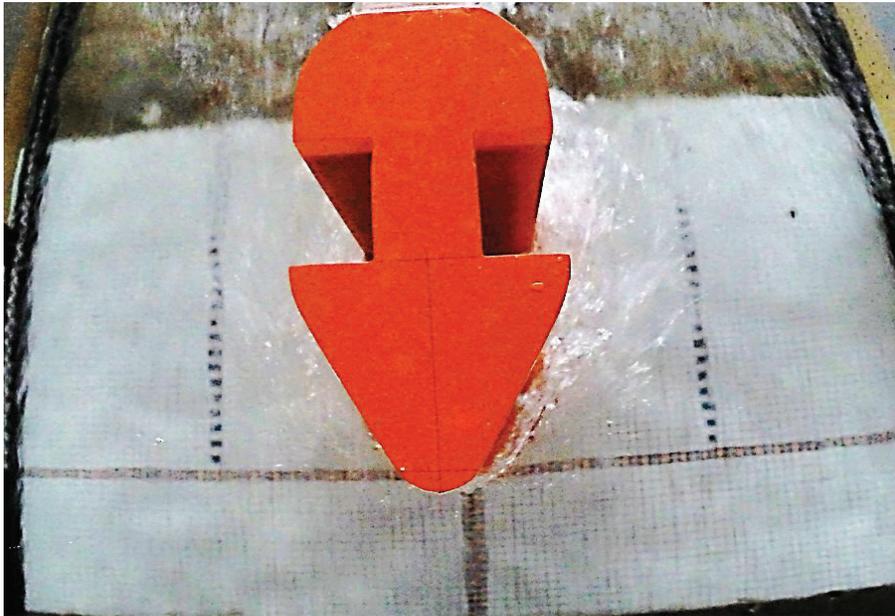
7.2.2 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRÍTICO No. 2.

Al observar el comportamiento del flujo que opera con la estructura bifurcadora No. 2, se observa que mantiene una similitud con la estructura bifurcadora No. 1, con su diseño original es una estructura que no está acorde a los objetivos de la misma, previstos para la bifurcación de caudales en régimen de flujo supercrítico, siendo así una estructura no apta para los caudales bajo estas condiciones considerando que:

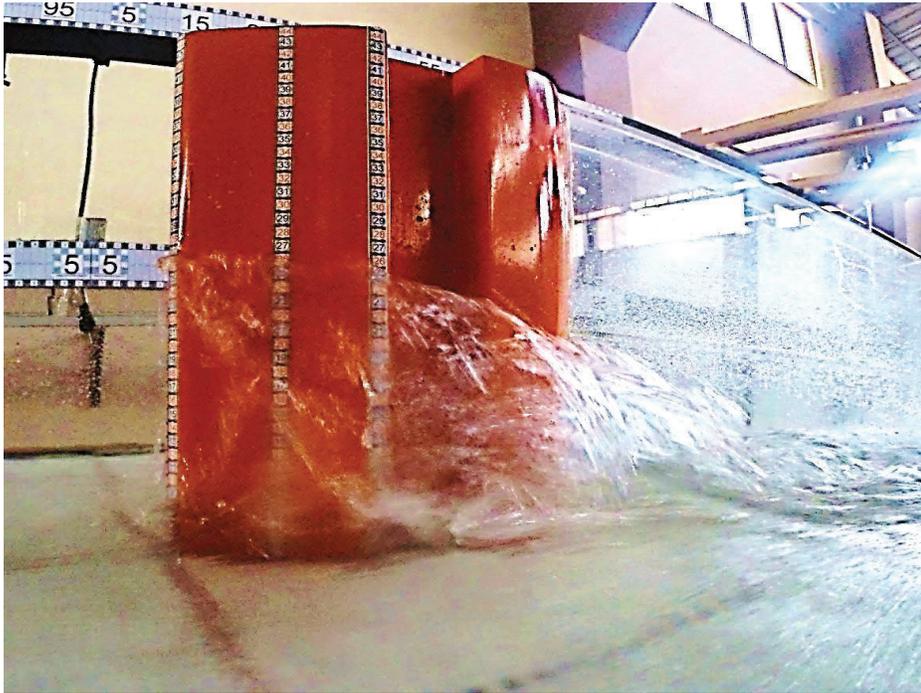
- El flujo no evidencia una onda de choque con una elevación representativa en la estructura para valores de números de Froude que se generen en flujos con régimen supercrítico es decir para $Fr > 1$.
- La estructura tiene una geometría que genera una separación del flujo visto en planta, este flujo inestable impacta contra las paredes de las cámaras transportadoras lo que pone en peligro a la estructura, además genera una perturbación y una alta inercia por lo que el flujo se vuelve inestable haciendo imposible el manejo del mismo, esto genera una gran cantidad de perturbaciones aguas debajo de la estructura bifurcadora, generando varios problemas en la operación y mantenimiento de cualquier estructura aguas debajo de la estructura bifurcadora.

- Se genera una división del flujo desigual lo que impide una división ecualizada, haciendo el trabajo de operación y mantenimiento de las estructuras mucho más difícil si se utiliza esta geometría en una estructura bifurcadora.

FOTO N° 7.36



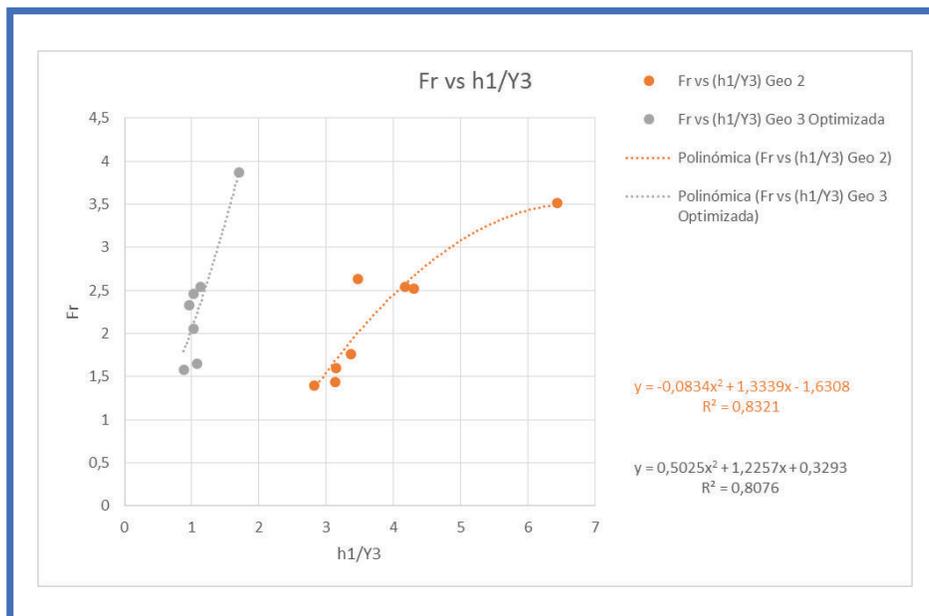
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

FOTO N° 7.37

ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

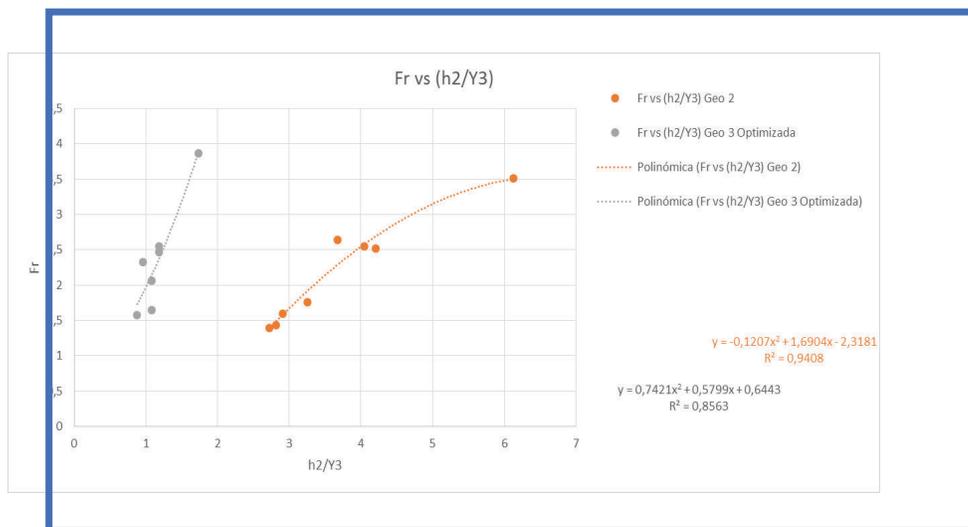
La investigación experimental ha generado la necesidad de modificar la geometría de Estructura No. 2, para optimizar el inadecuado comportamiento hidráulico con esta estructura, que compromete a la estructura completa pues genera una onda de choque la cual pone en riesgo la estabilidad de la obra. En la siguiente grafica se muestra el comportamiento de la onda de choque en la estructura original y también en la estructura modificada en la cual se aprecia el comportamiento inadecuado de la estructura No. 2.

GRAFICO N° 7.17



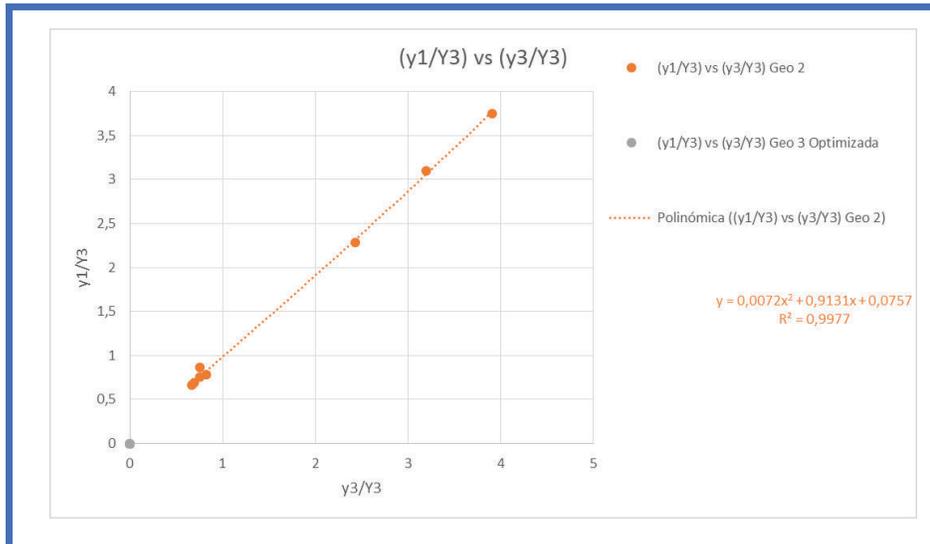
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

GRÁFICO N° 7.18



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

GRÁFICO N° 7.19



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Se observa claramente que la Estructura tabique bifurcador No. 2 tiene una elevación de la onda de choque tanto en la parte inicial y media claramente alta mientras que en la Estructura tabique bifurcador No. 3 es decir la optimizada es muy baja la elevación de la onda de choque a lo largo de la estructura, en efecto no es apreciable a simple vista debido a sus bajos valores de elevación.

Así mismo la separación vista en planta de la onda de choque en la Estructura tabique bifurcador No. 2, realmente es notoria, en la Estructura tabique bifurcador No. 3 es decir la optimizada desaparece este efecto, es decir que se puede observar que la Estructura No. 1 en efecto genera ondas de choque que ponen en peligro la estabilidad de la estructura, debido al impacto de manera violenta por parte de la onda en las cámaras.

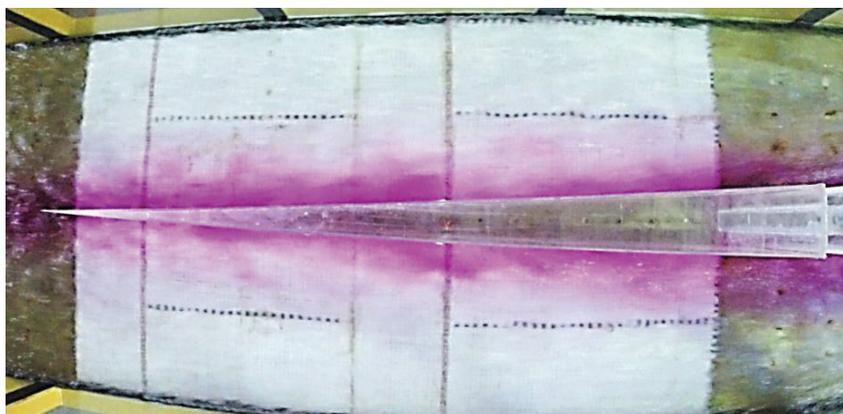
Se observa un flujo inestable aguas abajo de la Estructura No. 2, debido a las ondas de choque generadas los caudales en cada cámara no son similares, además se denota una fuerte perturbación aguas abajo.

7.2.3 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRÍTICO No. 3 OPTIMIZADA.

Al observar el comportamiento del flujo que opera con la estructura bifurcadora No. 3, la que contiene todas las modificaciones, es una estructura que si está acorde a los objetivos de la misma, previstos para la bifurcación de caudales en régimen de flujo supercrítico, siendo así una estructura totalmente apta para los caudales bajo estas condiciones considerando que:

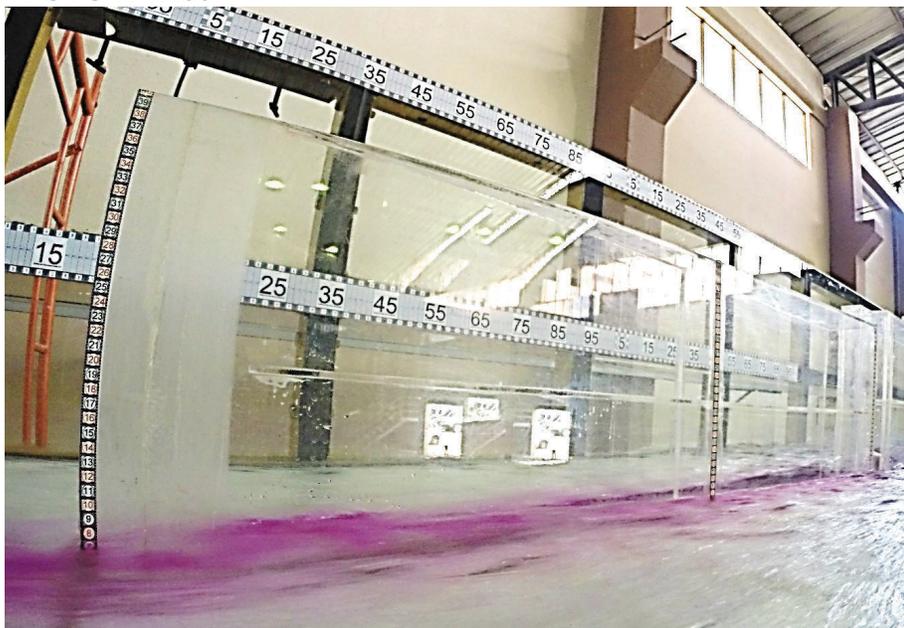
- El flujo no evidencia una onda de choque con una elevación representativa en la estructura para valores de números de Froude que se generen en flujos con régimen supercrítico es decir para $Fr > 1$.
- La estructura tiene una geometría que genera una separación del flujo visto en planta, este flujo inestable impacta contra las paredes de las cámaras transportadoras lo que pone en peligro a la estructura, además genera una perturbación y una alta inercia por lo que el flujo se vuelve inestable haciendo imposible el manejo del mismo, esto genera una gran cantidad de perturbaciones aguas debajo de la estructura bifurcadora, generando varios problemas en la operación y mantenimiento de cualquier estructura aguas debajo de la estructura bifurcadora.
- Se genera una división del flujo desigual lo que impide una división ecualizada, haciendo el trabajo de operación y mantenimiento de las estructuras mucho más difícil si se utiliza esta geometría en una estructura bifurcadora.

FOTO N° 7.38



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

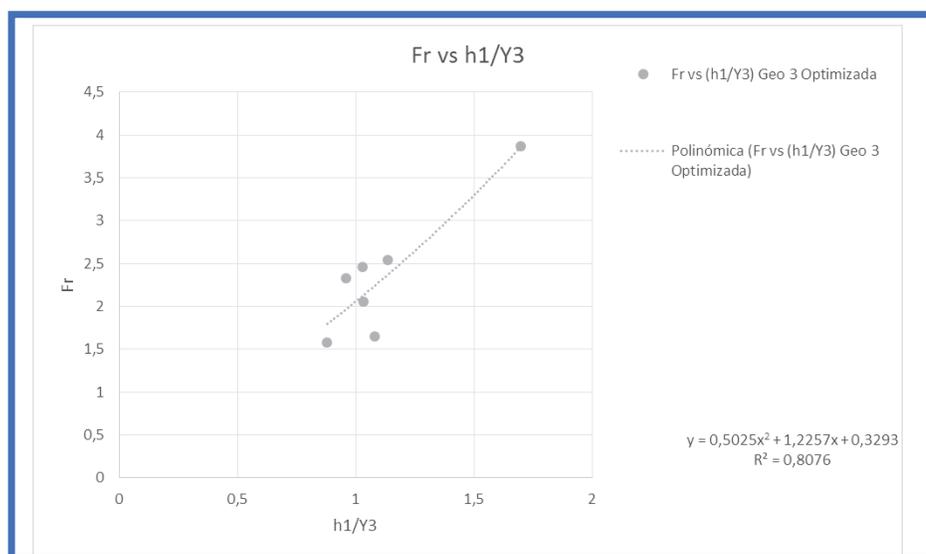
FOTO N° 7.39



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

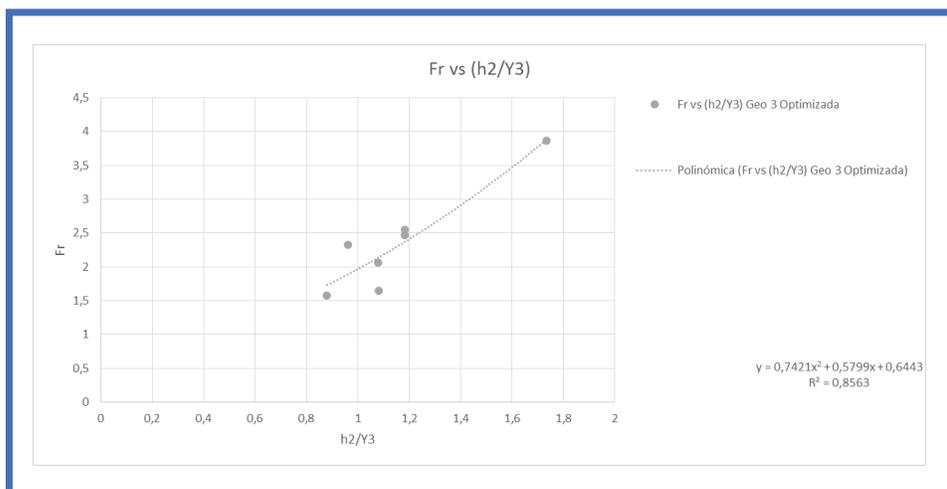
La investigación experimental ha generado la necesidad de generar esta geometría de Estructura No. 3, para optimizar el inadecuado comportamiento hidráulico con las dos estructuras anteriores, En la siguiente grafica se muestra el comportamiento de la onda de choque en la estructura la cual es inexistente.

GRAFICO N° 7.20



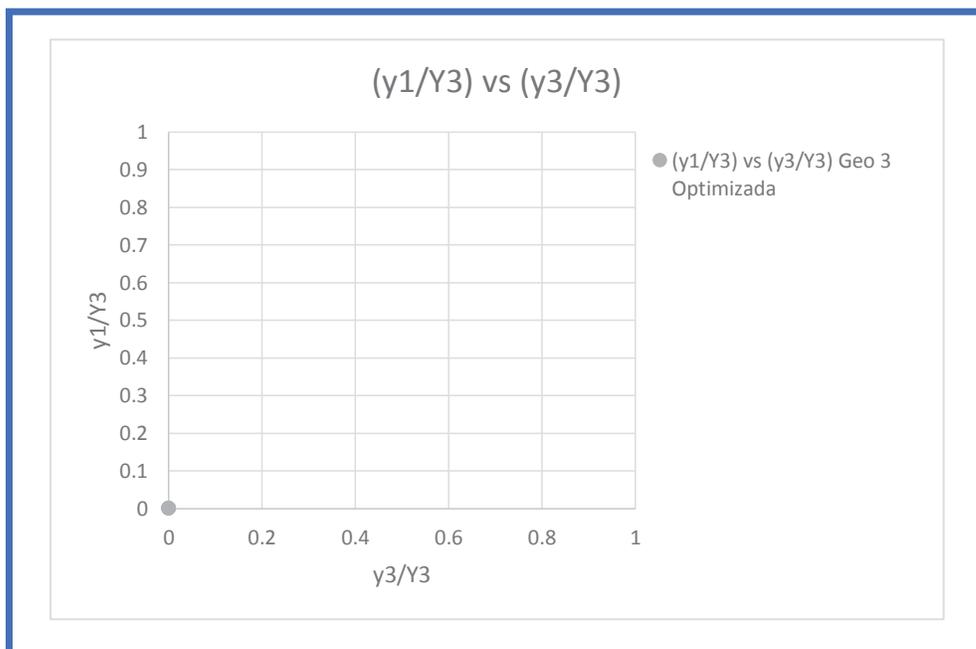
ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

GRAFICO N° 7.21



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

GRÁFICO N° 7.22



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Se observa claramente que la Estructura tabique bifurcador No. 3 no tiene una elevación de la onda de choque, en efecto no es apreciable a simple vista debido a sus bajos valores de elevación.

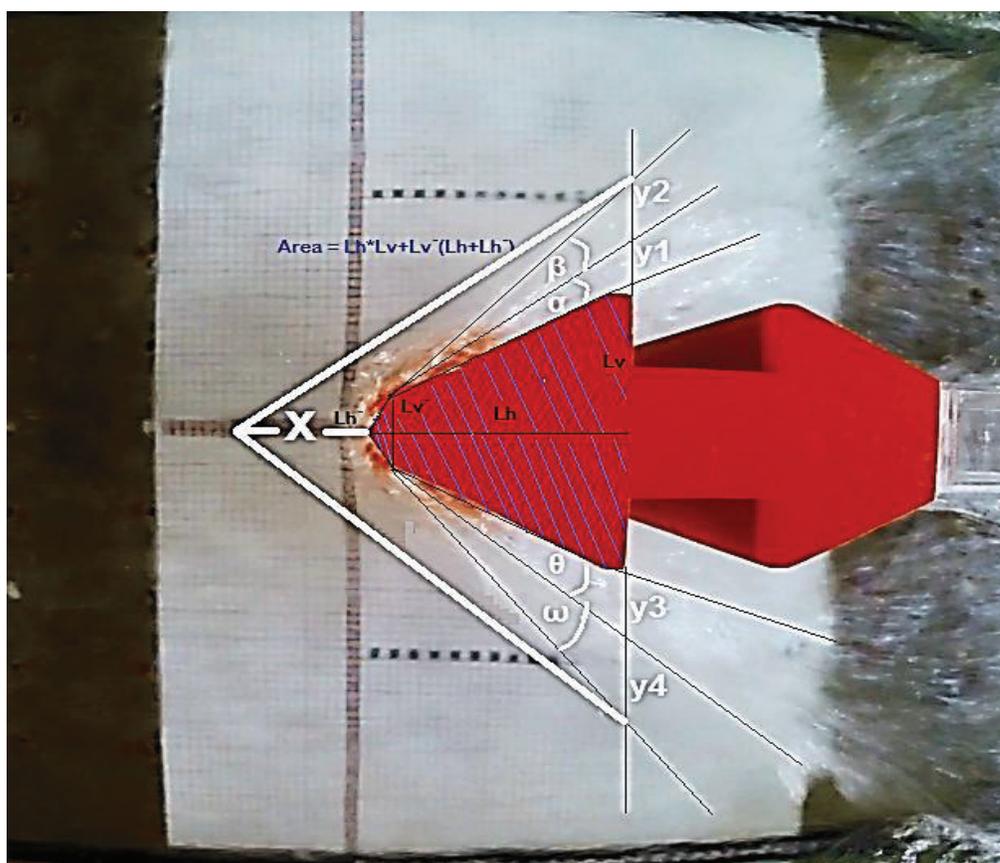
Así mismo la separación vista en planta desaparece, es decir que se puede observar que el flujo nunca se separa de la Estructura No. 1.

Se observa un flujo Estable aguas abajo de la Estructura No. 3, debido a las ondas de choque desaparecen.

7.3 RECOMENDACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS TABIQUES BIFURCADORES CON OPERACIÓN EN FLUJOS SUPERCRÍTICOS.

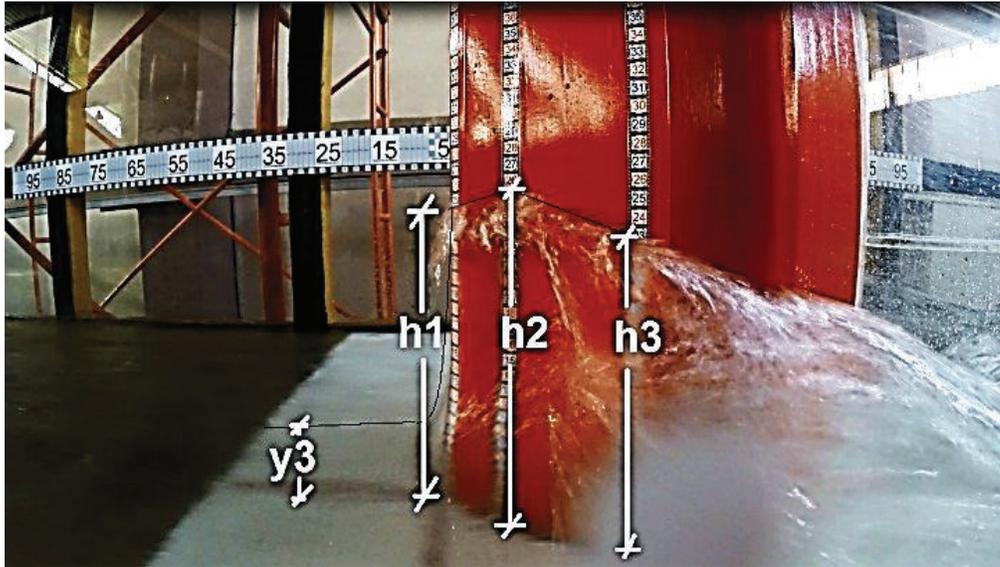
7.3.1 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 1.

FOTO N° 7.40



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

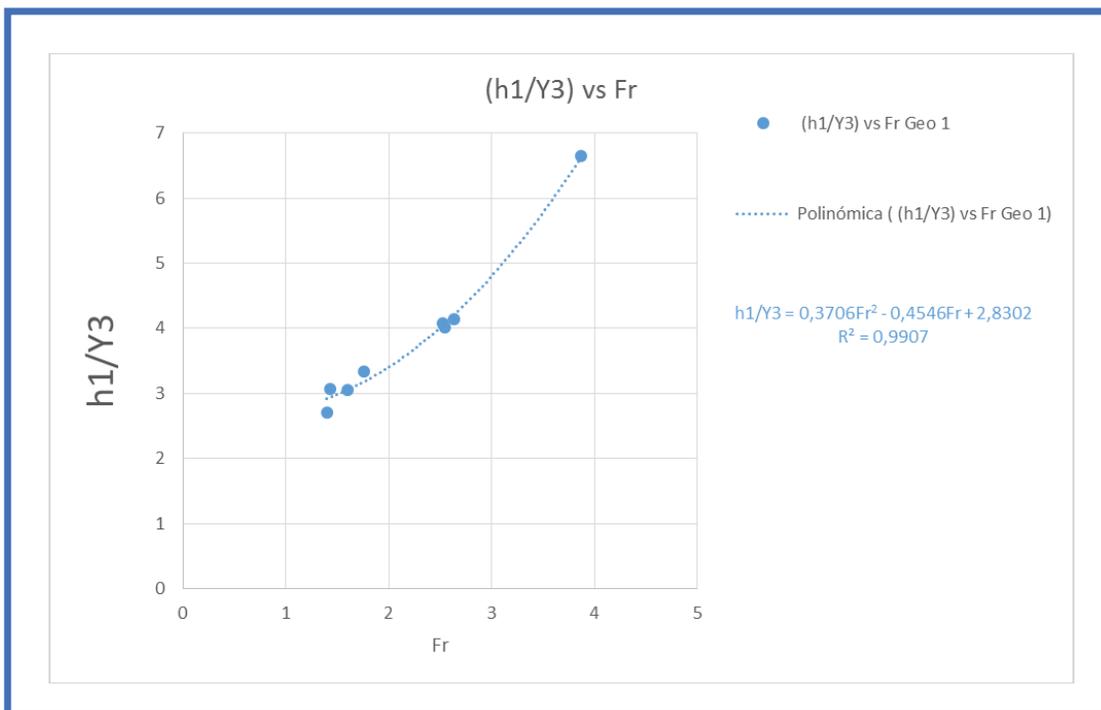
FOTO N° 7.41



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Como resultado del análisis experimental realizado en este estudio se muestran a continuación los siguientes gráficos adimensionales que permiten cuantificar las características de la onda con la geometría de la Estructura No. 1 en función de los números de Froude que pertenecientes a flujo con régimen supercrítico.

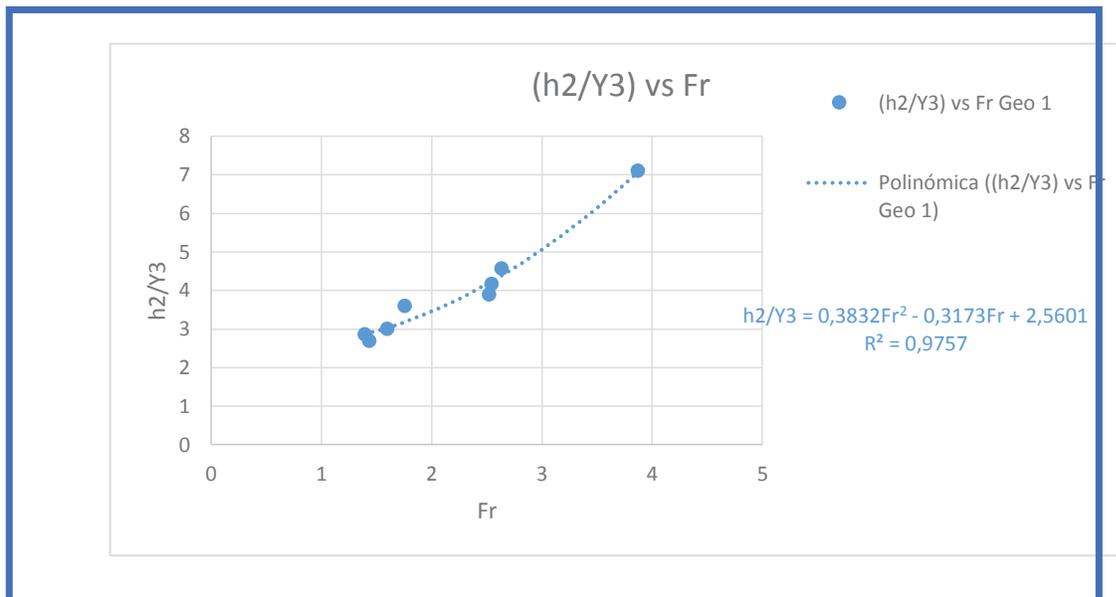
GRAFICO N° 7.23



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En esta estructura se evidencia que la elevación en el inicio de la nariz el tabique bifurcador de la onda de choque es alta y es directamente proporcional al Fr y al calado de aproximación, es una estructura que presenta una baja eficiencia por lo que se realizaron modificaciones, en el caso específico de la elevación se propone tener una geometría del tabique bifurcador mas esbelta, para que el área de ataque de la estructura sea menor.

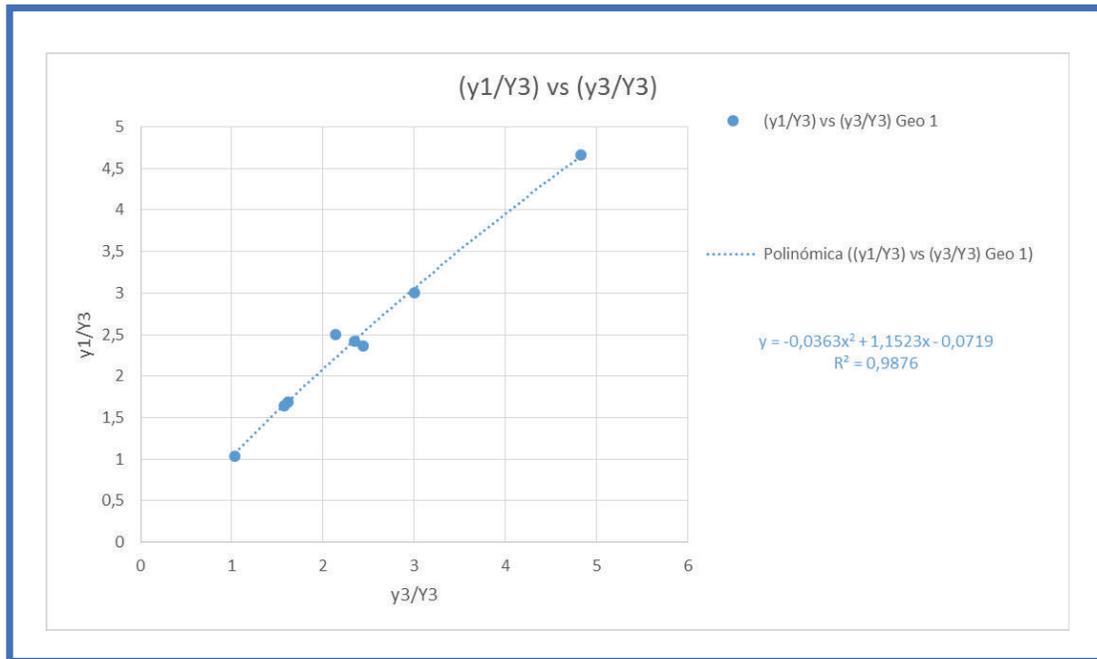
GRAFICO N° 7.24



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En esta estructura se evidencia que la elevación de la onda de choque es alta en la parte media de la nariz del tabique bifurcador y es directamente proporcional al Fr y al calado de aproximación, es una estructura que presenta una baja eficiencia por lo que se realizaron modificaciones, en el caso específico de la elevación se propone tener una geometría del tabique bifurcador mas esbelta, para que el área de ataque de la estructura sea menor.

GRAFICO N° 7.25

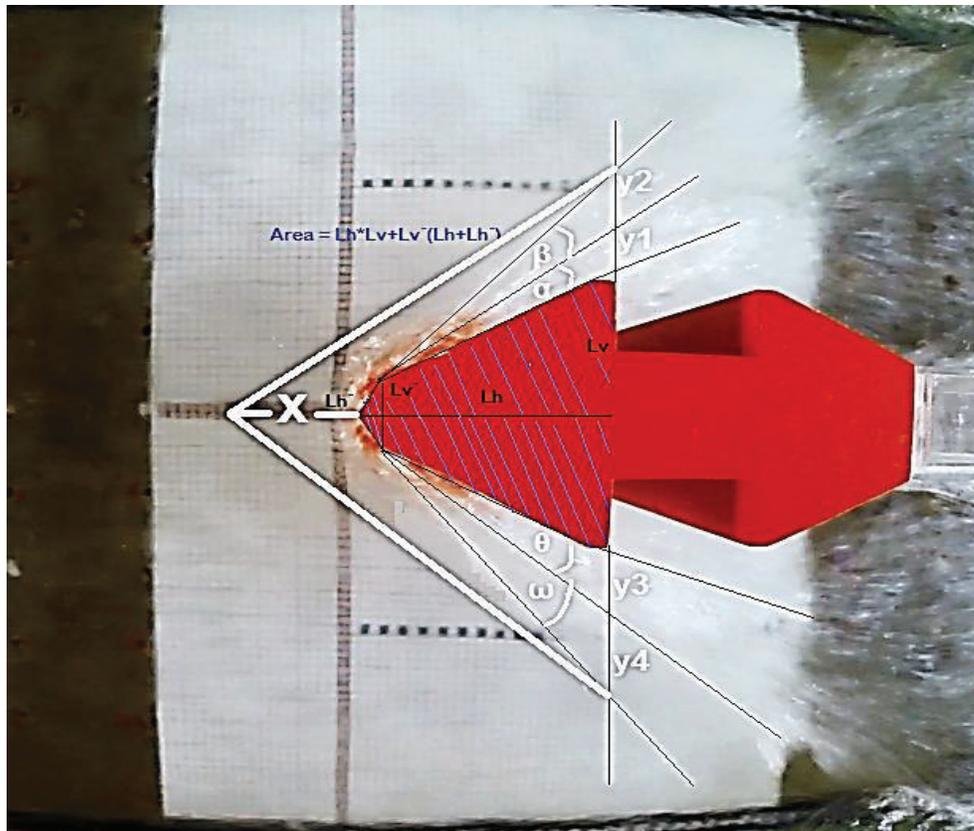


ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

La separación de la onda de choque vista en planta en esta estructura es directamente proporcional al número de Froude y al calado de aproximación, sigue el mismo patrón tanto en el lado izquierdo como en el derecho.

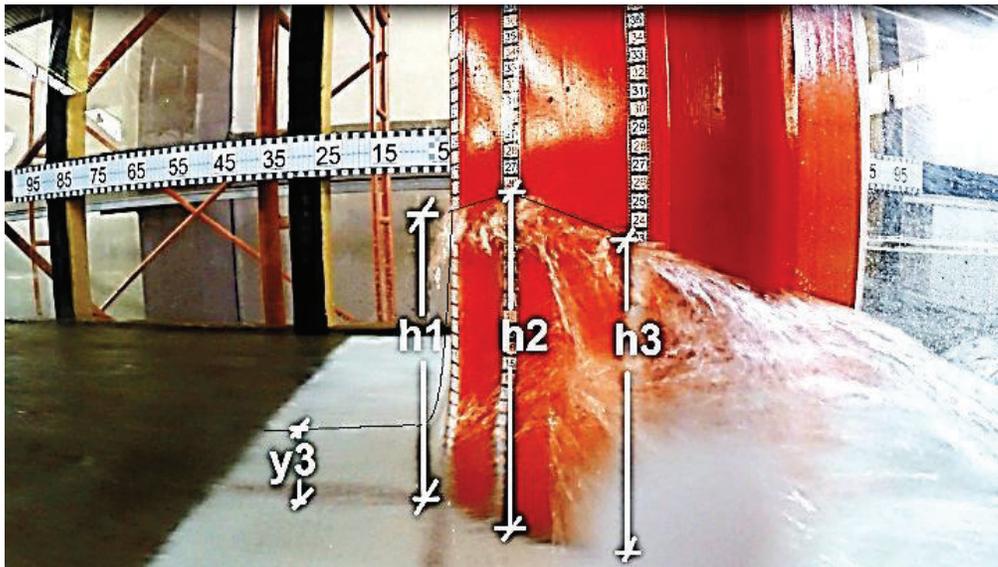
7.3.2 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 2.

Foto N° 7.42



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

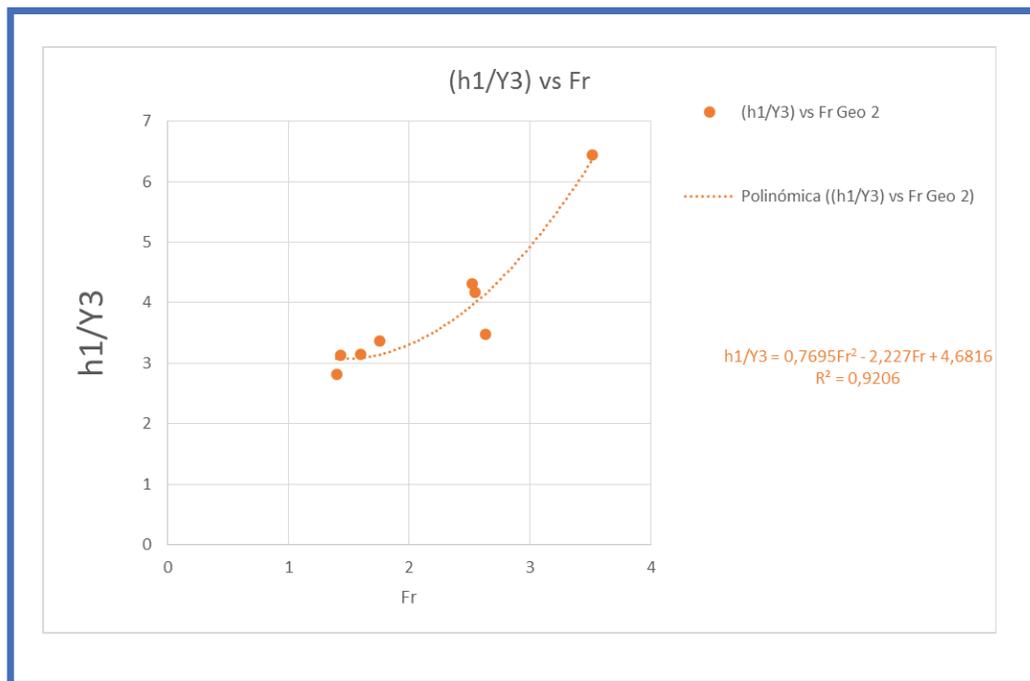
FOTO N° 7.43



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Como resultado del análisis experimental realizado en este estudio se muestran a continuación los siguientes gráficos adimensionales que permiten cuantificar las características de la onda con la geometría de la Estructura No. 2 en función de los números de Froude que pertenecientes a flujo con régimen supercrítico.

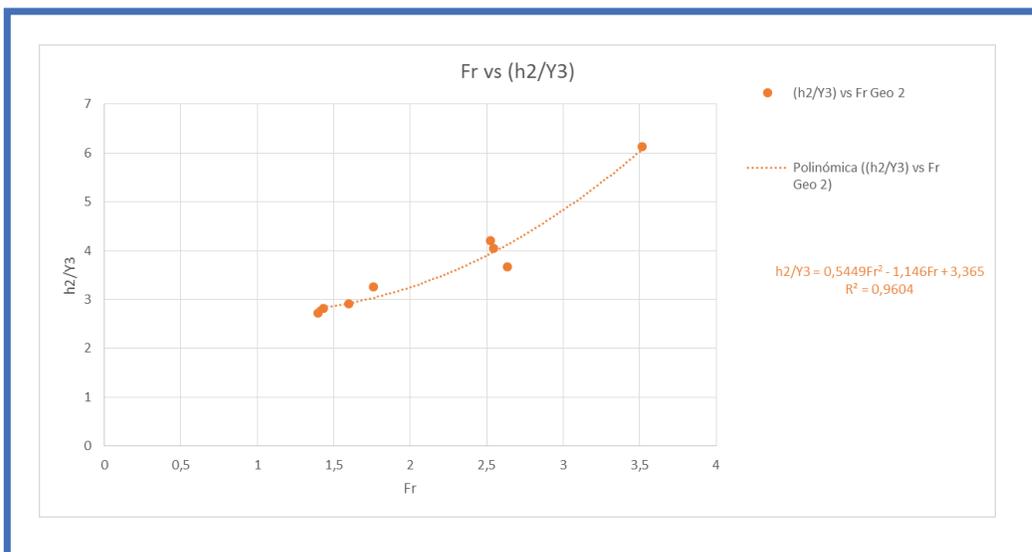
GRAFICO N° 7.26



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En esta estructura se evidencia que la elevación en el inicio de la nariz el tabique bifurcador de la onda de choque es alta y es directamente proporcional al Fr y al calado de aproximación, es una estructura que presenta una baja eficiencia por lo que se realizaron modificaciones, en el caso específico de la elevación se propone tener una geometría del tabique bifurcador mas esbelta, para que el área de ataque de la estructura sea menor.

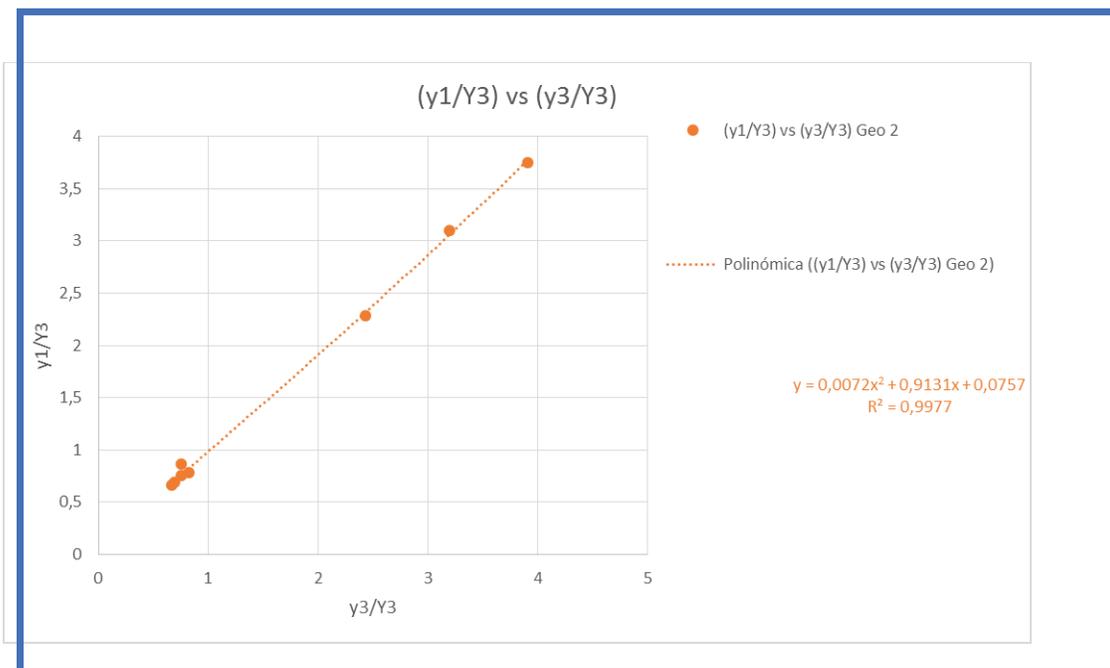
GRAFICO N° 7.27



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En esta estructura se evidencia que la elevación de la onda de choque es alta en la parte media de la nariz del tabique bifurcador y es directamente proporcional al Fr y al calado de aproximación, es una estructura que presenta una baja eficiencia por lo que se realizaron modificaciones, en el caso específico de la elevación se propone tener una geometría del tabique bifurcador mas esbelta, para que el área de ataque de la estructura sea menor.

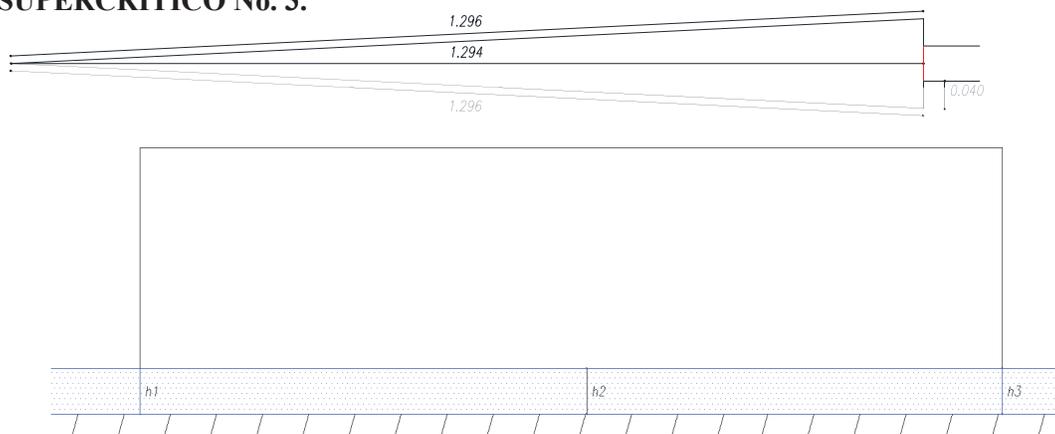
GRAFICO N° 7.28



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

La separación de la onda de choque vista en planta en esta estructura es directamente proporcional al número de Froude y al calado de aproximación, sigue el mismo patrón tanto en el lado izquierdo como en el derecho.

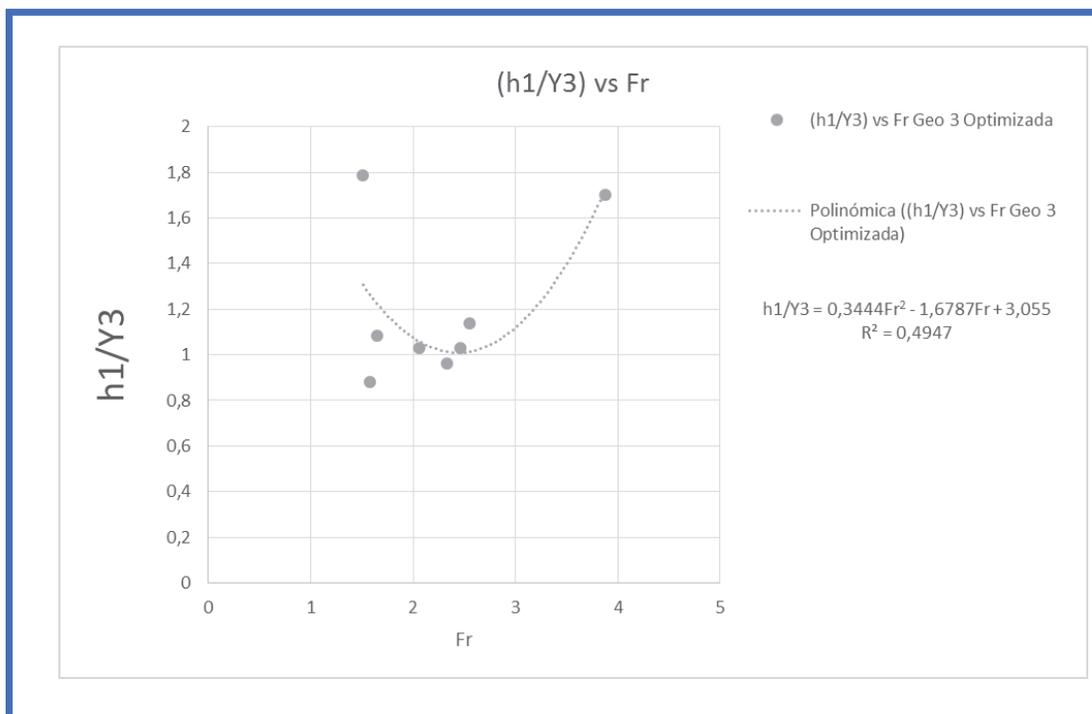
7.3.3 ESTRUCTURA TABIQUE BIFURCADOR PARA FLUJO CON RÉGIMEN SUPERCRITICO No. 3.



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

Como resultado del análisis experimental realizado en este estudio se muestran a continuación los siguientes gráficos adimensionales que permiten demostrar que con la geometría en la estructura optimizada no existe onda de choque en función de los números de Froude que pertenecen a flujo con régimen supercrítico.

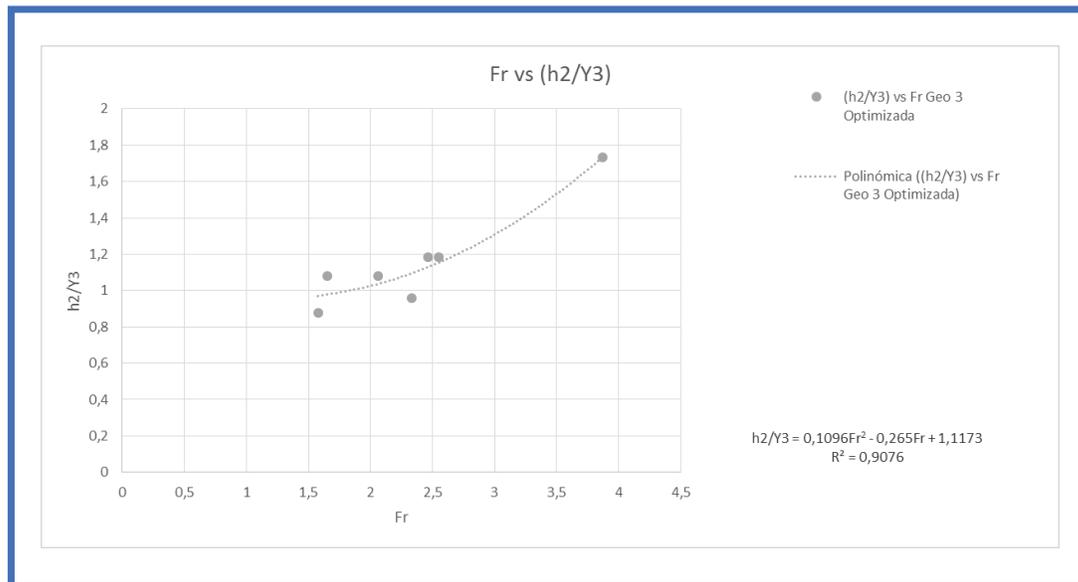
GRÁFICO N° 7.29



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En esta estructura se evidencia que la elevación en el inicio de la nariz el tabique bifurcador de la onda de choque es prácticamente nula por lo que en la medición de los datos de elevación genera una dispersión importante la gráfica, es una estructura que presenta una alta eficiencia.

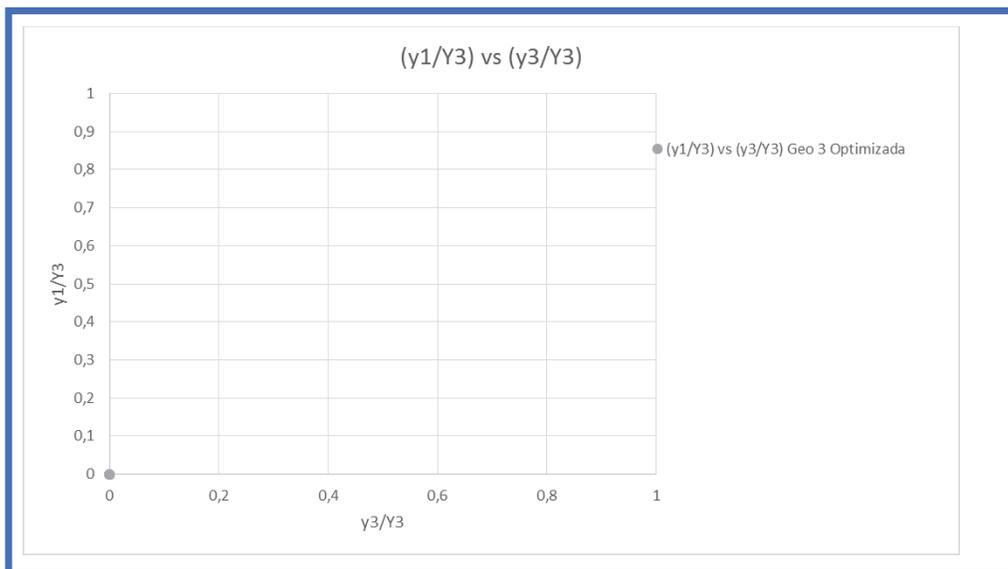
GRÁFICO N° 7.30



ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE

En esta estructura se evidencia que la elevación en la parte media de la nariz el tabique bifurcador de la onda de choque es prácticamente nula por lo que en la medición de los datos de elevación genera una dispersión importante la gráfica, es una estructura que presenta una alta eficiencia.

No existe separación de la onda de choque vista en planta en esta.

GRÁFICO N° 7.31**ELABORADO POR: CARLOS MICHEL ANDRADE**

BIBLIOGRAFIA

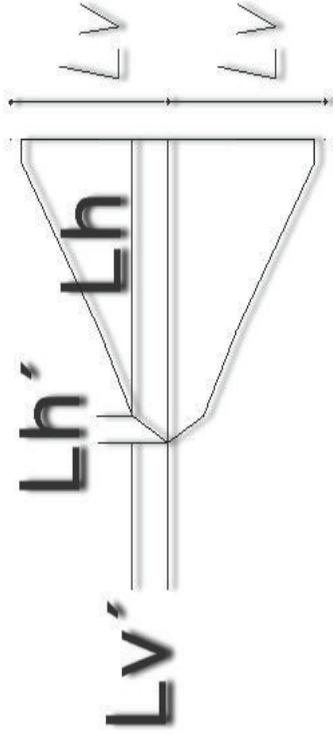
- Hidalgo, M. "Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas". Quito. Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional.
- (Sotelo, G. (1997). "Hidráulica General". México. Editorial Limusa)
- (Ranga, Raju K.G. (1997). "Flow Through Open Channels". Tata Mc Graw Hill.)

ANEXOS

INDICE DE ANEXOS

ANEXO N° 1 ABACO DE DISEÑO PARA H1	169
ANEXO N° 2 ABACO DE DISEÑO PARA H2	170
ANEXO N° 3 ABACO DE DISEÑO PARA H3	171
ANEXO N° 4 ABACO DE DISEÑO PARA Y1; Y3	172
ANEXO N° 5 ABACO DE DISEÑO PARA Y2; Y4	173
ANEXO N° 6 ESCALA VISUAL.....	174

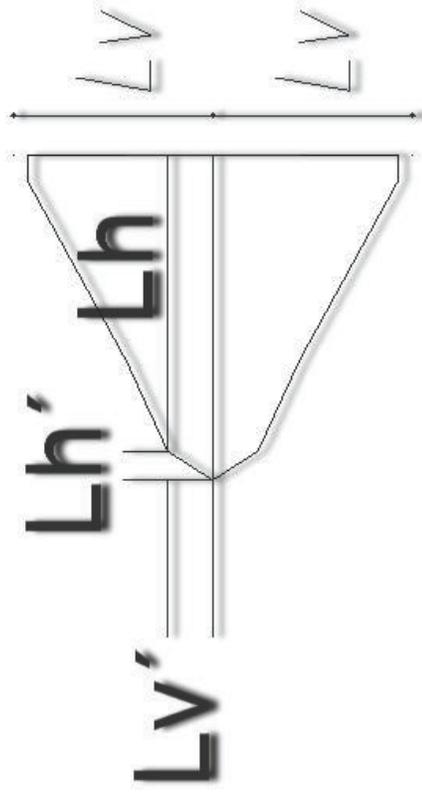
Anexo N° 1 Abaco de Diseño para h1



Abaco de Diseño para h1
 $h1-k'Lv' ; k-h1/Lv'$

	Estruct. No.1	Estruct. No.2	Estruct. No.3	
Lh'/Lv'	0,67	0,66	0,66	$Y3/Lh'$
1,43	4,906	5,02	2,44	20,13
3,87	10,889	11,36	2,69	0,11
1,60	8,416	8,65	4,21	0,11
1,76	12,681	13,01	5,89	0,14
1,40	13,396	13,97	7,57	0,16
				$Y3/Lh'$
				0,02
				0,02
				0,04
				0,05
				0,06

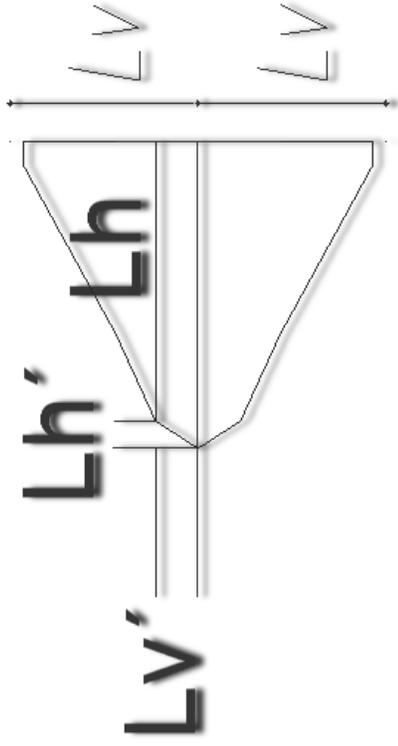
Anexo N° 2 Abaco de diseño para h2



Abaco de Diseño para h2
 $h2-k^*Lh' ; k^*=h2/Lh'$

	Estruct. No.1	Estruct. No.2	Estruct. No.3
Lv'/Lh'	0,67	0,66	$1/3/Lh'$
1,43	4,300	4,50	2,44
3,87	11,742	10,80	2,69
1,60	8,269	8,08	4,21
1,76	13,892	12,57	5,89
1,40	14,168	15,49	7,57

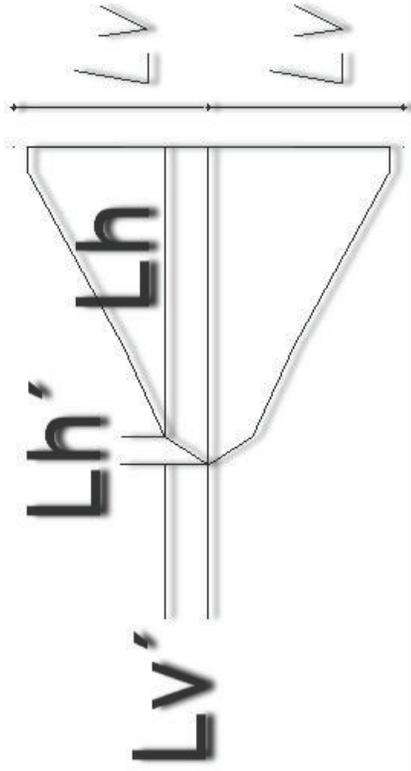
Anexo N° 3 Abaco de diseño para h3



Estruct. No.1		Estruct. No.2		Estruct. No.3	
Lv/Lh'	0.67	0.66	$Y3/Lh'$	20.13	$Y3/Lh'$
1.43	3.473	4.21	2.44	0.10	0.02
3.87	10.786	9.61	2.69	0.11	0.02
1.60	7.350	6.71	4.21	0.12	0.04
1.76	13.083	11.91	5.89	0.16	0.05
1.40	13.304	12.61	7.57	0.19	0.06

Abaco de Diseño para h3
h3-k'Lh' ; k= h3/Lh'

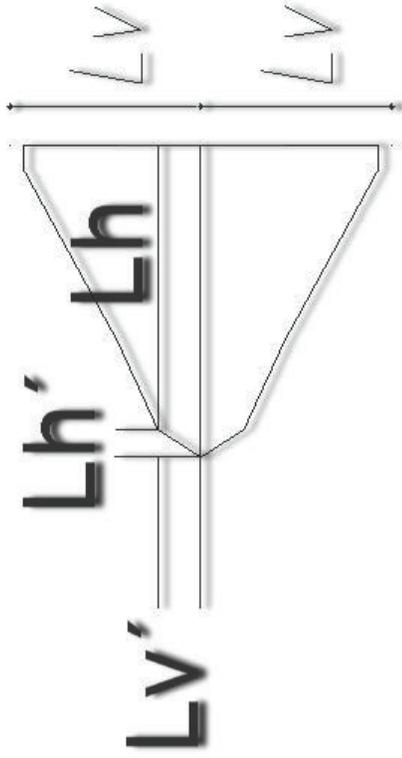
Anexo N° 4 Abaco de diseño para Y1; Y3



Abaco de Diseño para Y1, Y3
 $h3=k'Lh'$; $k=1, Y3/Lh'$

	Estruct. No.1	Estruct. No.2	Estruct. No.3	
Lv'/Lh'	0,67	0,66	$Y3/Lh'$	$Y3/Lh'$
1,43	2,523	2,40	2,44	0,02
3,87	11,775	10,09	2,69	0,02
1,60	12,616	13,04	4,21	0,04
1,76	14,718	13,46	5,89	0,05
1,40	17,914	5,05	7,57	0,06

Anexo N° 5 Abaco de diseño para Y2; Y4



Abaco de Diseño para y2, y4
 $h3=k^4Lh'$; $k=y2,y4/Lh'$

Lv'/Lh'	Estruct. No.1	Estruct. No.2	$Y3/Lh'$	Estruct. No.3	$Y3/Lh'$
0.67	0.66	20.13	0.02	0.02	0.02
1.43	1.682	0.42	2.44	0.00	0.02
3.87	3.384	2.52	2.69	0.00	0.02
1.60	4.205	2.10	4.21	0.00	0.04
1.76	11.354	2.94	5.89	0.00	0.05
1.40	5.457	1.68	7.57	0.00	0.06



