



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

# **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS**

**Alumno:** María Isabel Castellanos Santos

**Tutor:** Prof. D. Mario Miró Barnés

**Depto.:** Ingeniería Mecánica y Minera

**Septiembre, 2018**



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

# **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE FLUJO EN CANALES ABIERTOS**

**Alumno:** María Isabel Castellanos Santos

**Tutor:** Prof. D. Mario Miró Barnés

**Depto.:** Ingeniería Mecánica y Minera

Fdo. Alumna:

Fdo. Tutor:

**Septiembre, 2018**

# 1 Contenido

|           |                                                            |    |
|-----------|------------------------------------------------------------|----|
| 1         | INTRODUCCIÓN.....                                          | 9  |
| 1.1       | MOTIVACIÓN.....                                            | 9  |
| 1.2       | OBJETIVOS DEL PROYECTO.....                                | 10 |
| 1.3       | CONTENIDO DEL PROYECTO.....                                | 10 |
| 1.4       | INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....                                  | 10 |
| 1.4.1     | DEFINICIÓN.....                                            | 10 |
| 1.4.2     | CLASIFICACIÓN DE CANALES.....                              | 11 |
| 1.4.3     | TIPOS DE FLUJO.....                                        | 11 |
| 1.4.4     | ESTADO DEL FLUJO.....                                      | 15 |
| 1.4.4.1   | Efecto de la viscosidad.....                               | 15 |
| 1.4.4.2   | Efecto de la gravedad.....                                 | 16 |
| 1.4.5     | ENERGÍA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS.....                 | 17 |
| 1.4.5.1   | Energía específica.....                                    | 18 |
| 1.4.5.1.1 | Curva de energía específica a caudal específico constante. | 18 |
| 2         | CONSIDERACIONES IMPORTANTES SOBRE EL FLUJO EN CANALES      | 21 |
| 2.1       | FLUJO EN CANALES ABIERTOS.....                             | 21 |
| 2.2       | TIPOS DE FLUJO.....                                        | 21 |
| 2.3       | DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.....                           | 22 |
| 2.4       | MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD.....                              | 22 |
| 2.5       | PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.....                                | 23 |
| 2.6       | PARÁMETROS ADIMENSIONALES.....                             | 25 |
| 2.7       | FLUJO UNIFORME.....                                        | 26 |
| 2.8       | MOVIMIENTO NO UNIFORME EN CANALES.....                     | 28 |
| 2.8.1     | RÉGIMEN GRADUALMENTE VARIADO.....                          | 28 |
| 3         | EQUIPO DE LABORATORIO.....                                 | 34 |
| 3.1       | CANAL HIDRÁULICO (TÚNEL HIDRODINÁMICO).....                | 34 |
| 3.1.1     | DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA.....                             | 34 |
| 3.1.1.1   | Sistema mecánico.....                                      | 35 |
| 3.1.1.2   | Sistema eléctrico.....                                     | 36 |
| 3.1.1.3   | Sistema de control.....                                    | 37 |
| 3.2       | OBSTÁCULOS.....                                            | 37 |
| 3.3       | SISTEMA DE VARILLAS.....                                   | 39 |
| 3.4       | CAUDALÍMETRO ULTRASÓNICO.....                              | 40 |
| 3.5       | MANÓMETRO DIFERENCIAL: DIGITAL Y COLUMNAS                  |    |
|           | PIEZOMÉTRICAS DE AGUA.....                                 | 41 |
| 3.6       | TUBO DE PITOT.....                                         | 44 |
| 4         | ENSAYOS DE LABORATORIO.....                                | 46 |
| 4.1       | RESALTO HIDRÁULICO.....                                    | 46 |
| 4.1.1     | TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO.....                           | 48 |
| 4.1.2     | DESAGÜE A TRAVÉS DE COMPUERTAS.....                        | 50 |
| 4.1.3     | RESULTADOS EXPERIMENTALES.....                             | 52 |
| 4.2       | ESTRECHAMIENTO (EFECTO VENTURI).....                       | 59 |

|           |                                                                                                |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.1     | RESULTADOS EXPERIMENTALES.....                                                                 | 60  |
| 4.2.1.1   | Gráficas.....                                                                                  | 63  |
| 4.3       | OBSTÁCULOS DE FONDO.....                                                                       | 64  |
| 4.3.1     | TRANSICIÓN DE FLUJO SUBCRÍTICO A SUPERCRÍTICO.<br>OBSTÁCULO GRANDE.....                        | 66  |
| 4.3.1.1   | Gráficas.....                                                                                  | 68  |
| 4.3.2     | TRANSICIÓN DE FLUJO SUBCRÍTICO A SUBCRÍTICO.....                                               | 71  |
| 4.3.2.1   | Gráficas.....                                                                                  | 74  |
| 4.3.3     | TRANSICIÓN DE FLUJO SUPERCRÍTICO A SUPERCRÍTICO. ..                                            | 80  |
| 4.3.3.1   | Gráficas.....                                                                                  | 83  |
| 4.4       | VERTEDEROS.....                                                                                | 90  |
| 4.4.1     | TERMINOLOGÍA RELATIVA AL FLUJO DE VERTEDEROS.....                                              | 91  |
| 4.4.2     | TIPOS DE LÁMINA VERTIENTE.....                                                                 | 91  |
| 4.4.3     | CLASIFICACIÓN DE LOS VERTEDEROS.....                                                           | 93  |
| 4.4.3.1   | Según el espesor de la pared.....                                                              | 93  |
| 4.4.3.2   | Según su forma geométrica.....                                                                 | 93  |
| 4.4.3.3   | Según la altura de la lámina de agua, aguas abajo.....                                         | 95  |
| 4.4.3.4   | Según la longitud de la cresta.....                                                            | 95  |
| 4.4.3.5   | Según la posición del plano del vertedero con respecto a la<br>dirección del la corriente..... | 95  |
| 4.4.4     | FÓRMULAS PARA EL CAUDAL A TRAVÉS DE VERTEDEROS.....                                            | 96  |
| 4.4.4.1   | Vertederos de pared delgada.....                                                               | 96  |
| 4.4.4.1.1 | Expresión para el caudal en vertederos rectangulares.....                                      | 96  |
| 4.4.4.1.2 | Expresión para el caudal en vertederos triangulares.....                                       | 98  |
| 4.4.5     | OTRAS CURVAS HIDRÁULICAS.....                                                                  | 99  |
| 4.4.5.1   | Perfil de Creager.....                                                                         | 99  |
| 4.4.5.2   | Perfil de Bradley.....                                                                         | 100 |
| 4.4.6     | VERTEDEROS DE PARED GRUESA.....                                                                | 102 |
| 4.4.7     | RESULTADOS DE ENSAYOS.....                                                                     | 102 |
| 4.4.7.1   | Vertedero de pared delgada rectangular.....                                                    | 102 |
| 4.4.7.2   | Vertedero de pared delgada triangular.....                                                     | 106 |
| 4.4.7.3   | Vertedero de pared gruesa.....                                                                 | 110 |
| 5         | CONCLUSIONES.....                                                                              | 115 |
| 6         | BIBLIOGRAFÍA.....                                                                              | 116 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Presa de las Tres Gargantas .....                                       | 9  |
| Figura 2: Profundidad del flujo uniforme permanente .....                        | 12 |
| Figura 3: Flujo uniforme no permanente. ....                                     | 12 |
| Figura 4: Flujo rápidamente variado. ....                                        | 13 |
| Figura 5: Flujo gradualmente variado. ....                                       | 13 |
| Figura 6: Flujo gradualmente retardado. ....                                     | 14 |
| Figura 7: Flujo gradualmente acelerado. ....                                     | 14 |
| Figura 8: Canal con flujo de retraso gradual llamado curva de remanso.....       | 15 |
| Figura 9: Energía total en una sección de un canal .....                         | 17 |
| Figura 10: Curva de energía específica para caudal específico constante. ....    | 18 |
| Figura 11: Energía frente a calado para distintos caudales específicos.....      | 19 |
| Figura 12: Variación del caudal a energía constante o Curva de Koch.....         | 20 |
| Figura 13: Distribución de velocidades. ....                                     | 22 |
| Figura 14: Sección transversal de un canal. ....                                 | 23 |
| Figura 15: Sección transversal de un canal trapezoidal. ....                     | 23 |
| Figura 16: Parámetros geométricos en un canal. ....                              | 24 |
| Figura 17: Parámetros geométricos para varios tipos de sección de un canal. .... | 25 |
| Figura 18: Líneas de energía en canales con flujo uniforme. ....                 | 26 |
| Figura 19: Tipos de movimiento del flujo en un canal. ....                       | 28 |
| Figura 20: Perfiles de flujo. ....                                               | 33 |
| Figura 21: Ejemplos de flujo gradualmente variado. ....                          | 33 |
| Figura 22: Canal Hidrodinámico E.P.S. de Linares.....                            | 34 |
| Figura 23: Vista general del Canal de Ensayos. ....                              | 35 |
| Figura 24: Esquema del sistema mecánico. ....                                    | 35 |
| Figura 25: Dimensiones generales del Túnel Hidrodinámico. ....                   | 36 |
| Figura 26: Armario Principal .....                                               | 36 |
| Figura 27: Interior armario principal. ....                                      | 37 |
| Figura 28: Obstáculo compuerta.....                                              | 37 |
| Figura 29: Obstáculo vertedero grueso.....                                       | 38 |
| Figura 30: Obstáculo crítico.....                                                | 38 |
| Figura 31: Sistema de varillas medición calado. ....                             | 39 |
| Figura 32: Medición del calado. ....                                             | 39 |
| Figura 33: Instrumento de medición para el caudal. ....                          | 40 |
| Figura 34: Caudalímetro ultrasónico.....                                         | 41 |
| Figura 35: Manómetro diferencial digital. ....                                   | 42 |
| Figura 36: Manómetro diferencial manual.....                                     | 43 |
| Figura 36: Tubo de Pitot. ....                                                   | 44 |
| Figura 37: Esquema Tubo de Pitot. ....                                           | 45 |
| Figura 38: Resalto hidráulico. ....                                              | 46 |
| Figura 39: Tipos de Resalto Hidráulico.....                                      | 48 |
| Figura 40: Variación de $\Delta H/y_1$ en función del número de Froude. ....     | 50 |
| Figura 41: Compuerta en un canal. ....                                           | 50 |
| Figura 42: Ensayo compuerta laboratorio C.C.T. de Linares. ....                  | 52 |
| Figura 43: Disipación energía en resalto hidráulico .....                        | 58 |
| Figura 44: Efecto Venturi. ....                                                  | 59 |
| Figura 45: Ensayo Efecto Venturi en el laboratorio. ....                         | 60 |
| Figura 46: Expresión para el Calado .....                                        | 61 |
| Figura 47: Obstáculo pequeño .....                                               | 65 |
| Figura 48: Obstáculo grande. ....                                                | 65 |
| Figura 49: Transición de flujo subcrítico a supercrítico. ....                   | 66 |
| Figura 50: Transición de flujo Subcrítico a Subcrítico. ....                     | 71 |
| Figura 51: Transición de flujo Supercrítico a Supercrítico. ....                 | 80 |
| Figura 52: Diferentes vertederos. ....                                           | 90 |
| Figura 53: Terminología de vertederos. ....                                      | 91 |
| Figura 54: Tipos de lámina vertiente.....                                        | 92 |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 55: Tipos de vertedero.....                                | 93  |
| Figura 56: Vertederos según su forma geométrica. ....             | 94  |
| Figura 57: Vertederos según la altura de lámina. ....             | 95  |
| Figura 58: Vertederos según longitud de cresta. ....              | 95  |
| Figura 59: Vertederos según la posición del plano. ....           | 96  |
| Figura 60: Vertedero rectangular. ....                            | 96  |
| Figura 61: Vertedero triangular. ....                             | 98  |
| Figura 62: Vertedero que muestra el perfil de Creager. ....       | 99  |
| Figura 63: Representación gráfica de Perfil de Creager. ....      | 99  |
| Figura 64: Parámetros adimensionales del Perfil de Creager. ....  | 100 |
| Figura 65: Representación de la curva del perfil de Bradley. .... | 101 |
| Figura 66: crítico sobre vertederos de pared gruesa.....          | 102 |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1: $y_q = 61$ mm y una frecuencia de 33 Hz .....                                  | 52  |
| Tabla 2: $y_q = 61$ mm y una frecuencia de 33 Hz .....                                  | 52  |
| Tabla 3: $y_q = 61$ mm y una frecuencia de 33 Hz .....                                  | 53  |
| Tabla 4: $y_q = 73$ mm y una frecuencia de 37 Hz .....                                  | 54  |
| Tabla 5: $y_q = 73$ mm y una frecuencia de 37 Hz .....                                  | 54  |
| Tabla 6: $y_q = 73$ mm y una frecuencia de 37 Hz .....                                  | 55  |
| Tabla 7: de $y_q = 97$ mm y una frecuencia de 45 Hz.....                                | 56  |
| Tabla 8: de $y_q = 97$ mm y una frecuencia de 45 Hz.....                                | 56  |
| Tabla 9: de $y_q = 97$ mm y una frecuencia de 45 Hz.....                                | 57  |
| Tabla 10: Resumen resultados.....                                                       | 58  |
| Tabla 11: Estrechamiento con altura de agua en reposo de 175 mm y 35 Hz. 61             |     |
| Tabla 12: Estrechamiento (Caudales) .....                                               | 62  |
| Tabla 13: Valores para el Estrechamiento (Venturi).....                                 | 62  |
| Tabla 14: Flujo Sub-Sup aguas arriba (35 Hz).....                                       | 66  |
| Tabla 15: Flujo Sub-Sup aguas abajo (35 Hz).....                                        | 66  |
| Tabla 16: Calados aguas arriba y abajo en flujo Sub-Sup (35 Hz).....                    | 67  |
| Tabla 17: Valores hallados en transición Sub-Sup (35 Hz).....                           | 68  |
| Tabla 18: Flujo Sub-Sup aguas arriba (resalto de 50 mm y 35 Hz).....                    | 72  |
| Tabla 19: Flujo Sub-Sup aguas abajo (resalto de 50 mm y 35 Hz). ....                    | 72  |
| Tabla 20: Calados aguas arriba y abajo en flujo Sub-Sup (resalto de 50 mm y 35 Hz)..... | 72  |
| Tabla 21: Caudales en flujo Sub-Sup (resalto de 50 mm y 35 Hz).....                     | 73  |
| Tabla 22: Valores hallados en transición Sub-Sup (resalto de 50 mm y 35 Hz).....        | 73  |
| Tabla 23: Flujo Sub-Sup aguas arriba (resalto de 75 mm y 35 Hz).....                    | 75  |
| Tabla 24: Flujo Sub-Sup aguas abajo (resalto de 75 mm y 35 Hz). ....                    | 75  |
| Tabla 25: Calados aguas arriba y abajo en flujo Sub-Sup (resalto de 75 mm y 35 Hz)..... | 76  |
| Tabla 26: Caudales en flujo Sub-Sup (resalto de 75 mm y 35 Hz).....                     | 76  |
| Tabla 27: Valores hallados en transición Sub-Sup (resalto de 75 mm y 35 Hz).....        | 77  |
| Tabla 28: Ensayo a 45 Hz con obstáculo de 75 mm.....                                    | 79  |
| Tabla 29: Ensayo a 45 Hz con obstáculo de 75 mm.....                                    | 79  |
| Tabla 30: Ensayo a 45 Hz con obstáculo de 75 mm.....                                    | 79  |
| Tabla 31: Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 33 Hz). ....                                | 81  |
| Tabla 32: Calados en Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 33 Hz).....                      | 81  |
| Tabla 33: Caudales con Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 33 Hz).....                    | 81  |
| Tabla 34: Valores hallados para Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 33 Hz). ..            | 82  |
| Tabla 35: Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 40 Hz). ....                                | 85  |
| Tabla 36: Calados en Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 40 Hz).....                      | 86  |
| Tabla 37: Caudales con Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 40 Hz).....                    | 86  |
| Tabla 38: Valores hallados para Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 40 Hz). ..            | 87  |
| Tabla 39: Datos para Vertedero rectangular (Ensayo 1).....                              | 103 |
| Tabla 40: Altura de carga vertedero rectangular (Ensayo 1).....                         | 103 |
| Tabla 41: Caudales y Coeficientes para vertedero rectangular (Ensayo 1)....             | 103 |
| Tabla 42: Datos para Vertedero rectangular (Ensayo 2).....                              | 105 |
| Tabla 43: Altura de carga vertedero rectangular (Ensayo 2).....                         | 105 |
| Tabla 44: Caudales y Coeficientes para vertedero rectangular (Ensayo 2)....             | 105 |
| Tabla 45: Datos para Vertedero triangular (Ensayo 1).....                               | 107 |
| Tabla 46: Altura de carga vertedero triangular (Ensayo 1).....                          | 107 |
| Tabla 47: Caudales y Coeficientes para vertedero triangular (Ensayo 1).....             | 108 |
| Tabla 48: Datos para Vertedero triangular (Ensayo 2).....                               | 109 |
| Tabla 49: Altura de carga vertedero triangular (Ensayo 2).....                          | 109 |
| Tabla 50: Caudales y Coeficientes para vertedero triangular (Ensayo 2).....             | 110 |
| Tabla 51: Datos para Vertedero Grueso (Ensayo 1).....                                   | 111 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 52: Altura de carga vertedero grueso (Ensayo 1).....              | 111 |
| Tabla 53: Caudales y Coeficientes para vertedero grueso (Ensayo 1)..... | 111 |
| Tabla 54: Datos para Vertedero Grueso (Ensayo 2).....                   | 113 |
| Tabla 55: Altura de carga vertedero grueso (Ensayo 2).....              | 113 |
| Tabla 56: Caudales y Coeficientes para vertedero grueso (Ensayo 2)..... | 113 |

## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUCCIÓN.

#### 1.1 MOTIVACIÓN.

La energía producida gracias al agua es esencial para el día a día. Esta rama de la ciencia existe prácticamente desde los inicios de la historia de la humanidad, debido a la lucha del ser humano para sobrevivir le llevó a controlar la fuerza del agua para canalizar ríos y basar la economía en la agricultura.

Uno de los grandes precursores que crearon numerosos sistemas de canalización del agua fueron los romanos. Ejemplos de estos sistemas de canalización son el acueducto, el complejo de baños o la cloaca máxima.

En el año 1975 se creó el primer modelo físico hidráulico gracias al ingeniero Luís Jerónimo en un tramo del río Garona, en Francia. Pasados los años se descubrió la relación que existía entre la fuerza de la inercia y la fuerza de fricción interna, ya que estas premisas fueron de gran importancia a la hora de elaborar el diseño de los modelos hidráulicos.

El primer laboratorio se fundó en el año 1981 en Dresden, Alemania y fue uno de los principales motores en la investigación y formación de ingenieros en esta rama.

Por tanto, cabe destacar la importancia que tiene la ingeniería en este tiempo. Con ella no sólo se pueden hacer presas de agua, sino conductos de presión para transportar agua potable, alcantarillados, canales, etc.

Por último, mencionar una de las obras más importantes realizadas por ingenieros hidráulicos, la cual se encuentra en China. La presa de las Tres Gargantas es la planta hidroeléctrica más grande del mundo y se tardó alrededor de 19 años su construcción.



*Figura 1 Presa de las Tres Gargantas*

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.**

Este Trabajo de Fin de Grado consiste en el estudio y caracterización teórico – experimental de un canal hidrodinámico con la utilización del equipo de laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Superior de Linares, con sus distintos elementos de ensayos como obstáculos, resaltos, estrechamientos y vertederos.

Para ello, la metodología a seguir en la elaboración de este trabajo se ha considerado como:

- Estudio de la teoría sobre el flujo en canales abiertos.
- Realización de un estudio de la velocidad del flujo en canales abiertos.
- Análisis y estudio de los elementos que permiten variar la sección transversal del canal. Obstáculos y estrechamientos.
- Estudio del comportamiento del flujo en un resalto de forma teórica y experimental.
- Comparación de resultados teóricos y experimentales obtenidos.

## **1.3 CONTENIDO DEL PROYECTO.**

Este proyecto consta de 5 capítulos. En el primer capítulo se desarrolla la introducción al estudio de canales hidráulicos donde se exponen la motivación, los objetivos del proyecto y una introducción teórica en la que se profundiza más sobre el estudio de canales hidráulicos. En el segundo capítulo se exponen las consideraciones más importantes acerca del flujo en canales. En el tercer capítulo se describe el equipo de ensayo utilizado en el laboratorio. En el cuarto capítulo se centra en los ensayos y resultados obtenidos durante el proceso de ensayo en el laboratorio. Y en el quinto capítulo se obtienen las conclusiones entre los datos obtenidos y los datos que se querían obtener. Por último, se hace mención de la bibliografía utilizada para el desarrollo de este proyecto.

## **1.4 INTRODUCCIÓN TEÓRICA.**

### **1.4.1 DEFINICIÓN.**

La hidráulica es la rama de la física que estudia el comportamiento de los líquidos en función de sus propiedades específicas, es decir, estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos. Todo esto depende de las fuerzas que se interponen con masa y a las condiciones que se encuentre el fluido, relacionadas también con la viscosidad.

Se denomina canal a la construcción destinada al transporte de fluidos, normalmente agua, y que, a diferencia de las tuberías, está abierta a la atmósfera. Los canales también se utilizan como vías artificiales de navegación. La descripción del comportamiento hidráulico de los canales es una parte fundamental de la hidráulica y su diseño pertenece al campo de la ingeniería hidráulica, una de las especialidades de la ingeniería civil e ingeniería agrícola.

### **1.4.2 CLASIFICACIÓN DE CANALES.**

Los canales se pueden clasificar en,

- Canales naturales.

Se denomina canal natural a las depresiones de la corteza terrestre, algunos de estos canales tienen poca profundidad y otros más, según la situación en la que se encuentren. Algunos de estos canales permiten la navegación sin necesidad de dragado.

En los canales naturales influyen todos los tipos de agua que existen en la tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyos en zonas montañosas hasta quebradas, ríos pequeños y grandes y estuarios de mareas. Las corrientes subterráneas que transportan agua con una superficie libre también son consideradas canales abiertos naturales. Por tanto, las propiedades hidráulicas de un canal natural son en general muy irregulares.

- Canales de riego.

Estos canales son vías construidas para conducir el agua hacia las zonas donde se requiere complementar el agua precipitada naturalmente sobre el terreno.

- Canales de navegación.

Un canal de navegación es una vía artificial creada por el ser humano que normalmente conecta lagos, ríos y océanos.

### **1.4.3 TIPOS DE FLUJO.**

El flujo en canales abiertos se clasifica en función de los parámetros de velocidad y área del flujo con respecto al tiempo y al espacio.

- Flujo permanente y flujo no permanente.

Un flujo es permanente si los parámetros no cambian con respecto al tiempo, es decir, en una sección del canal en todos los tiempos los elementos del flujo permanecen constantes. Si los parámetros cambian con respecto al tiempo el flujo se llama no permanente.

En la mayor parte de los problemas de canales abiertos es necesario estudiar el comportamiento del flujo solo bajo condiciones permanentes, excepto si el cambio en la condición del flujo con respecto al tiempo es importante, entonces el flujo debe tratarse como no permanente.

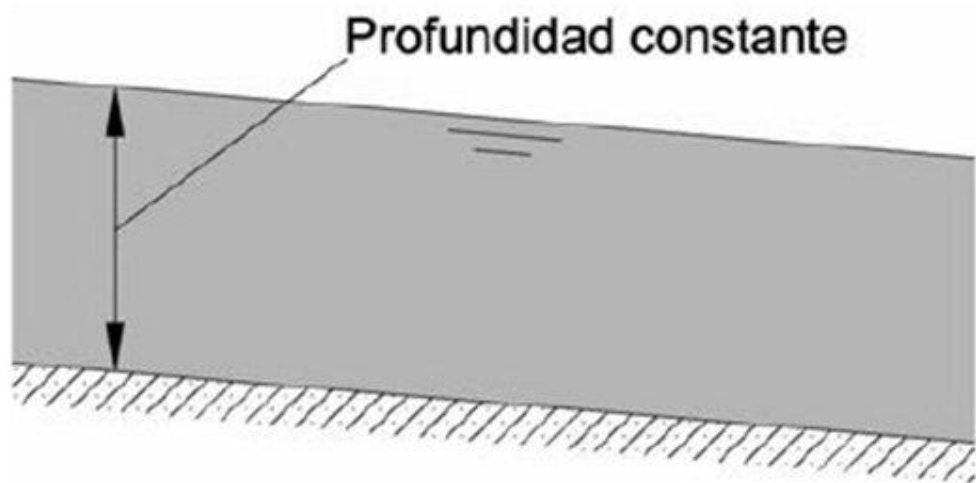
- Flujo uniforme y variado.

En este caso, el espacio es considerado como variable. El flujo es uniforme si los parámetros no cambian respecto al espacio, es decir, en cualquier sección del canal los elementos del flujo permanecen constantes. Si estos parámetros varían de una sección a otra, el flujo se denomina no uniforme o variado.

Un flujo uniforme puede ser permanente o variado, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo.

- Flujo uniforme permanente.

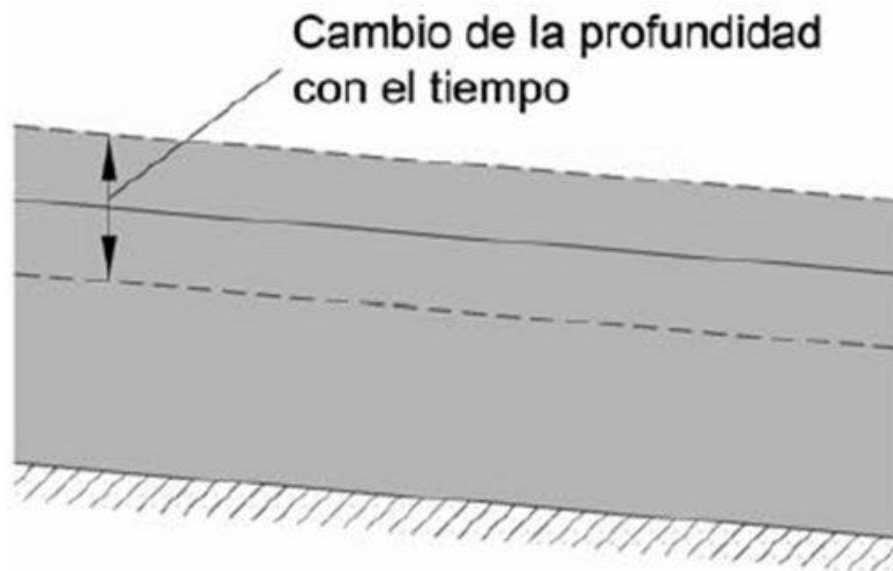
La profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración, es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos.



*Figura 2: Profundidad del flujo uniforme permanente*

- Flujo uniforme no permanente.

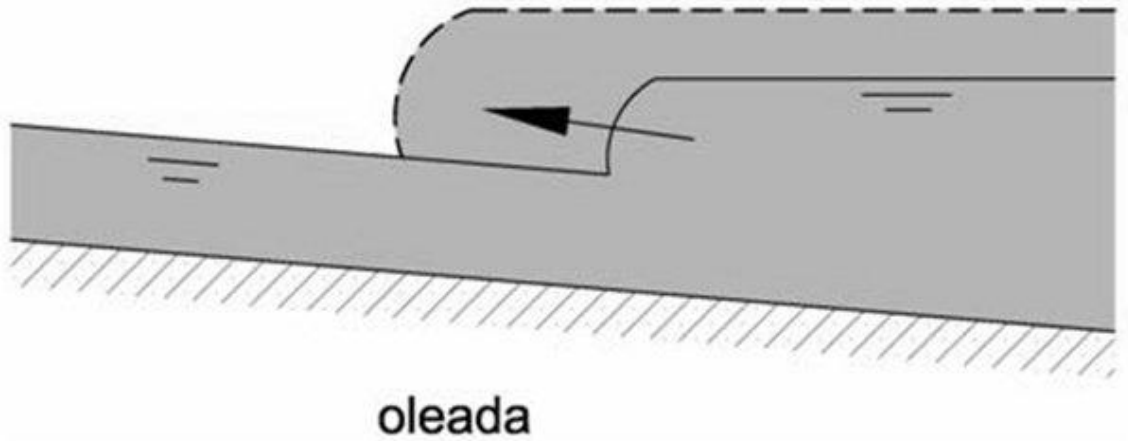
En este caso la superficie del agua fluctuará de un tiempo a otro permaneciendo paralela al fondo del canal. Al ser esta una condición casi imposible, el flujo uniforme no permanente es poco frecuente.



*Figura 3: Flujo uniforme no permanente.*

- Flujo rápidamente variado.

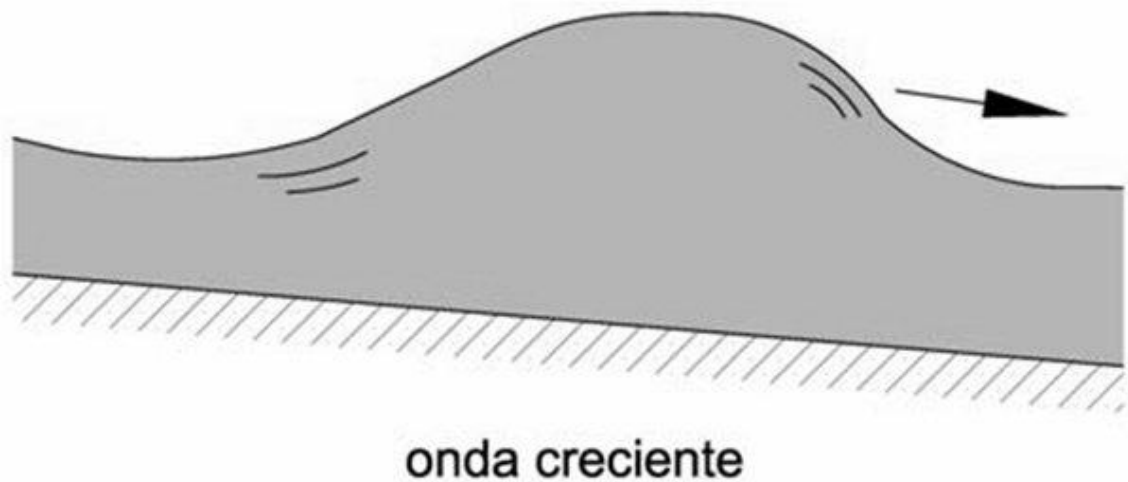
La profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas, como es el caso del resalto hidráulico.



*Figura 4: Flujo rápidamente variado.*

- Flujo gradualmente variado.

Es aquel en el cual los parámetros cambian de forma gradual a lo largo del canal, como es el caso de una curva de remanso.



*Figura 5: Flujo gradualmente variado.*

Este flujo puede ser acelerado o retardado. El flujo acelerado se presenta cuando los tirantes en la dirección del escurrimiento van disminuyendo y el flujo retardado, o de remanso, existe cuando el fenómeno se da al revés. En ambas figuras se representa este tipo de flujo.

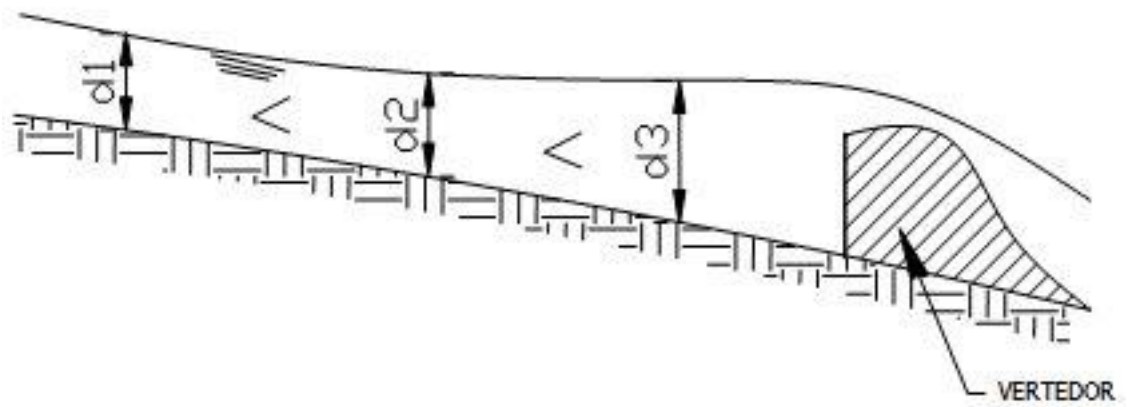


Figura 6: Flujo gradualmente retardado.

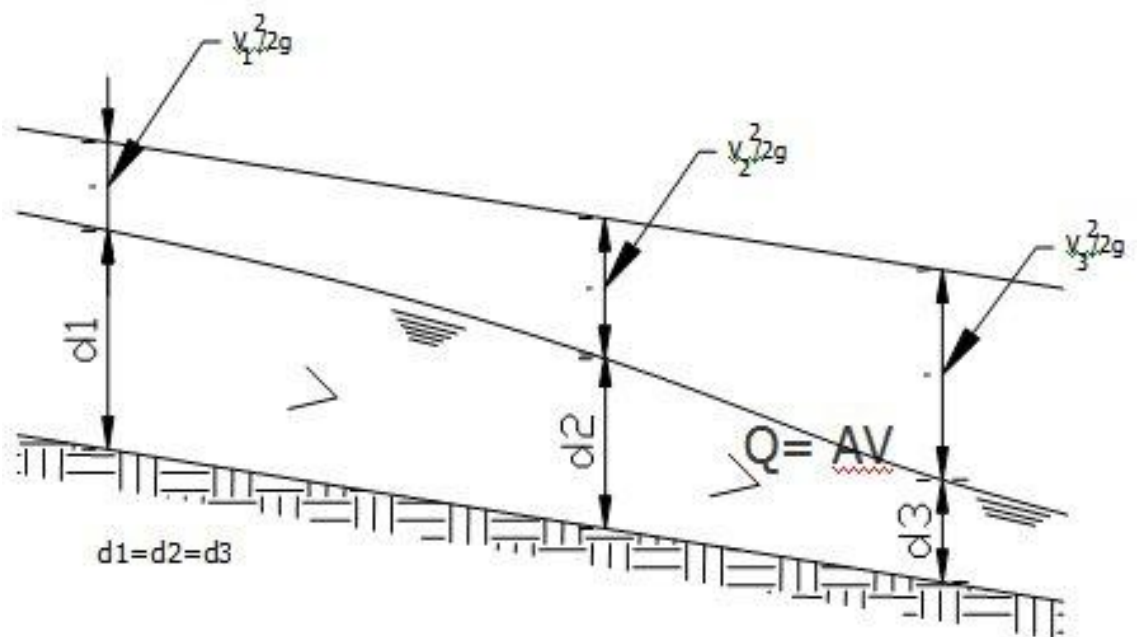


Figura 7: Flujo gradualmente acelerado.

Un caso típico de remanso es el que se presenta aguas arriba de un vertedero o alguna obstrucción semejante.

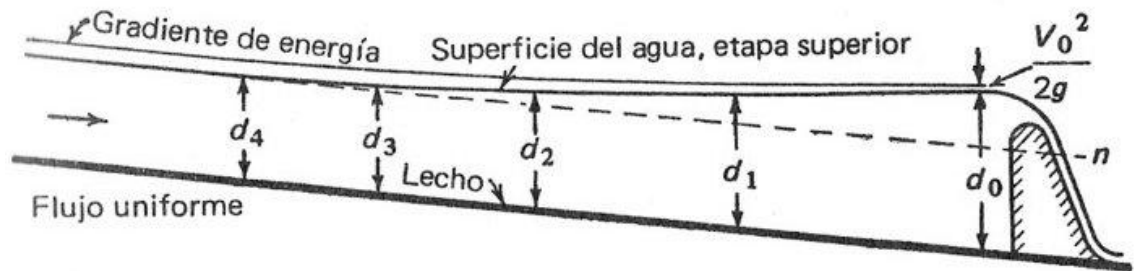


Figura 8: Canal con flujo de retraso gradual llamado curva de remanso.

#### 1.4.4 ESTADO DEL FLUJO.

El estado o comportamiento del flujo en un canal abierto está determinado por los efectos de la viscosidad y gravedad relativa a las fuerzas de inercia del flujo.

La tensión superficial es casi despreciable en la mayor parte de los problemas de canales abiertos ya que solo puede afectar al comportamiento del flujo bajo ciertas circunstancias.

Los efectos de presión y compresibilidad del fluido también son despreciables.

##### 1.4.4.1 Efecto de la viscosidad.

La viscosidad de un fluido es una medida de resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción. Dependiendo del efecto de la viscosidad relativa a la inercia, el flujo puede ser laminar, turbulento o de transición.

El flujo es laminar si las fuerzas viscosas son tan fuertes comparadas con las fuerzas de inercia, que la viscosidad juega un papel importante para determinar el comportamiento del flujo. En flujo laminar, las partículas del flujo parecen moverse en recorridos calmados definidos o líneas de corriente, y las capas infinitesimalmente delgadas del fluido parecen deslizarse sobre las capas adyacentes.

El flujo es turbulento si las fuerzas viscosas son débiles comparadas con las fuerzas de inercia. En el flujo turbulento, las partículas del fluido se mueven en recorridos irregulares, los cuales no son ni calmados ni determinados, pero en su conjunto todavía representan el movimiento hacia delante de la corriente total.

Entre los estados laminar y turbulento de la corriente, hay un estado mixto o estado de transición.

El efecto de la viscosidad relativo al de inercia puede representarse por el número de Reynolds. En la mayor parte de los canales abiertos el flujo laminar ocurre ocasionalmente.

De manera genérica se clasifica el flujo en función del número de Reynolds

$0 < Re < 10^3$  Flujo laminar

$10^3 < Re < 10^4$  Transición flujo laminar - turbulento

$Re > 10^4$  Flujo turbulento

#### 1.4.4.2 Efecto de la gravedad.

El efecto de la gravedad es un fenómeno natural por el cual los objetos con masa son atraídos entre sí, efecto mayormente observable en la interacción entre los planetas, galaxias y demás objetos del universo. Es una de las cuatro interacciones fundamentales que origina la aceleración que experimenta un cuerpo físico en las cercanías de un objeto astronómico. También se denomina interacción gravitatoria o gravitación.

El efecto de la gravedad sobre el estado del flujo se representa por una relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad. Esta relación es conocida como el número de Froude.

El número de Froude ( $Fr$ ) es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido. Debe su nombre al ingeniero hidrodinámico y arquitecto naval inglés William Froude (1810 - 1879). De esta forma, el número de Froude se puede escribir como:

$$Fr = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas de gravedad}} \quad Ec. 1.1$$

El número de Froude en canales abiertos nos informa del estado del flujo hidráulico y se define como

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g Dh}} \quad Ec. 1.2$$

dónde  $v$  es la velocidad,  $Dh$  la profundidad hidráulica y  $g$  la aceleración de la gravedad.

$Fr > 1$  el régimen del flujo será supercrítico

$Fr = 1$  el régimen del flujo será crítico

$Fr < 1$  el régimen del flujo será subcrítico

#### Flujo crítico

Este tipo de flujo presenta una combinación de fuerzas inerciales y gravitacionales que lo hacen inestable, convirtiéndolo en cierta manera en un estado intermedio y cambiante entre los otros dos tipos de flujo. Debido a esto es bastante inaceptable y poco recomendable, usarlo en el diseño de estructuras hidráulicas. Para éste tipo de flujo el número de Froude es igual a 1 y en esta condición no se generan resaltos hidráulicos (disipadores de energía).

## Flujo supercrítico

En este tipo de flujo las fuerzas inerciales presentan una influencia mucho mayor que las fuerzas gravitacionales. Además de esto, el flujo se presenta a velocidades y pendientes altas, y a profundidades más pequeñas. Cuando existe un flujo de este tipo en un canal un aumento en la cantidad de energía provoca una disminución de la profundidad de la lámina de agua. El número de Froude, en este caso, es mayor a 1. Este estado de flujo propicia la formación de resaltos hidráulicos; estos aumentan su capacidad de disipación de energía en ciertos intervalos, alcanzando la mayor capacidad para flujos con Froude mayores a 9.

## Flujo subcrítico

Para este régimen de flujo las fuerzas inerciales son sobrepasadas en importancia por las gravitacionales; en el flujo se tienen velocidades y pendientes bajas, pero las profundidades de la lámina del agua, por el contrario, son mayores que las que se presentan en el flujo supercrítico. Para este tipo de flujo un aumento en la energía se traduce en un aumento en la profundidad de la lámina de agua. El número de Froude en este estado es menor a 1.

### 1.4.5 ENERGÍA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS.

La energía total de cualquier tramo de corriente que pasa a través de una sección se define como la suma de las energías de posición, presión y velocidad.

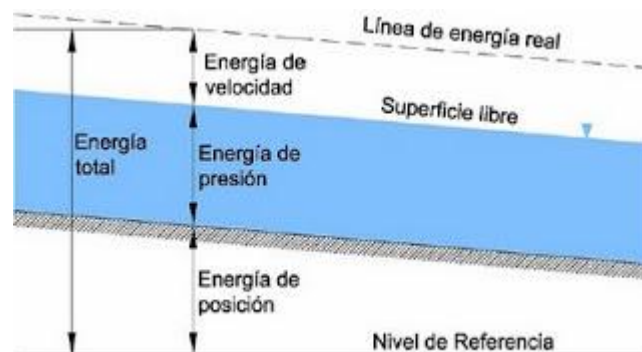


Figura 9: Energía total en una sección de un canal

En este tramo se considera un flujo estacionario en el que el perfil de velocidades es uniforme en cualquiera de las secciones perpendiculares al flujo, así se puede considerar que el flujo es adimensional, por tanto, se aplica la ecuación de la energía unidimensional al volumen de control definido por los extremos del tramo, que dividido por la gravedad queda,

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_s + h_L \quad \text{Ec. 1.3}$$

dónde todos los términos son energías por unidad de masa,  $p$  son presiones,  $v$  velocidad media,  $z$  altura de la solera respecto al nivel de referencia,  $h_s$  es el trabajo de las fuerzas externas y  $h_L$  las pérdidas de energía debido a la fricción.

### 1.4.5.1 Energía específica.

La energía específica en una sección de canal se define como la energía por unidad de masa respecto al fondo del canal.

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Para un canal rectangular, si  $q$  es el caudal por unidad de ancho la energía queda,

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad \text{Ec. 1.5}$$

La ecuación anterior puede estudiarse para  $q$  constante y para  $E$  constante.

#### 1.4.5.1.1 Curva de energía específica a caudal específico constante.

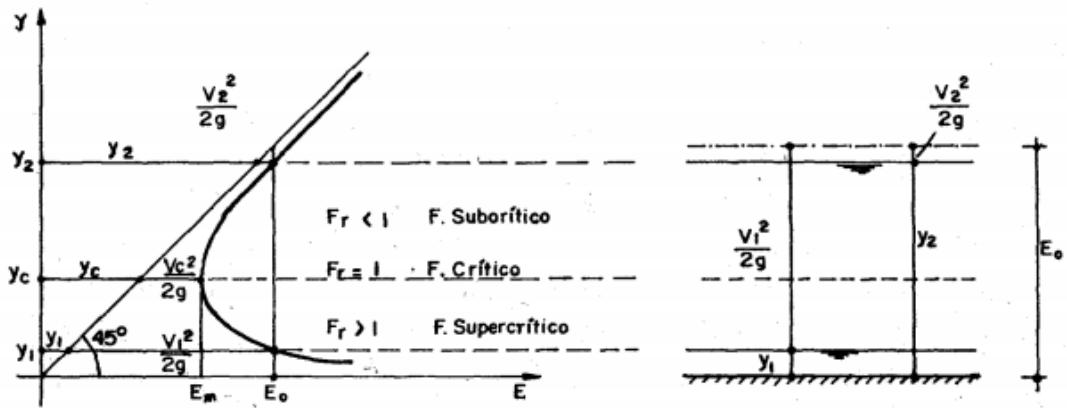


Figura 10: Curva de energía específica para caudal específico constante.

En la figura se observa que hay dos valores de  $y$  para un valor dado  $E_0$ . Se dice que  $y_1$  es la profundidad alterna de  $y_2$  y viceversa, también que  $y_1$  e  $y_2$  son profundidades alternas para  $E_0$ .

En la gráfica también se puede observar que hay un valor de energía específica mínima  $E_m$  correspondiente a  $y_c$  el cual tiene una expresión

$$E = y + \frac{v^2}{2g} = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad \text{Ec. 1.6}$$

$$\frac{dE}{dy} = 1 + \frac{\frac{q^2}{2g} 2y}{y^4} = 1 - \frac{q^2 2y}{2g y^4} = 1 - \frac{q^2}{gy^3} = 0 \quad \text{Ec. 1.7}$$

$$y_c = \left( \frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \quad \text{Ec. 1.8}$$

El valor de  $E_m$  es

$$E_m = y_c + \frac{q^2}{2gy_c^2} = y_c + \frac{gy_c^3}{2gy_c^2} = y_c + \frac{y_c}{2} \rightarrow E_m = \frac{3}{2}y_c \quad \text{Ec. 1.9}$$

$$\frac{y_c}{2} = \frac{v_c^2}{2g} \rightarrow v_c = \sqrt{gy_c} \quad \text{Ec. 1.10}$$

Si calculamos el Froude para esta velocidad se comprueba que es la unidad, confirmando que se encuentra en estado crítico.

$$F_r = \frac{v_c}{\sqrt{gy_c}} = \frac{\sqrt{gy_c}}{\sqrt{gy_c}} = 1 \quad \text{Ec. 1.11}$$

El flujo uniforme que tiene valor mayor a  $y_c$  se llama flujo subcrítico porque su velocidad media es menor que la crítica,  $Fr < 1$ .

El flujo uniforme que tiene valor menor a  $y_c$  se llama flujo supercrítico porque su velocidad media es mayor que la crítica,  $Fr > 1$ .

Si el caudal específico aumentara, la curva se desplazaría hacia la derecha y en caso de disminuir hacia la izquierda, mostrado en la siguiente figura.

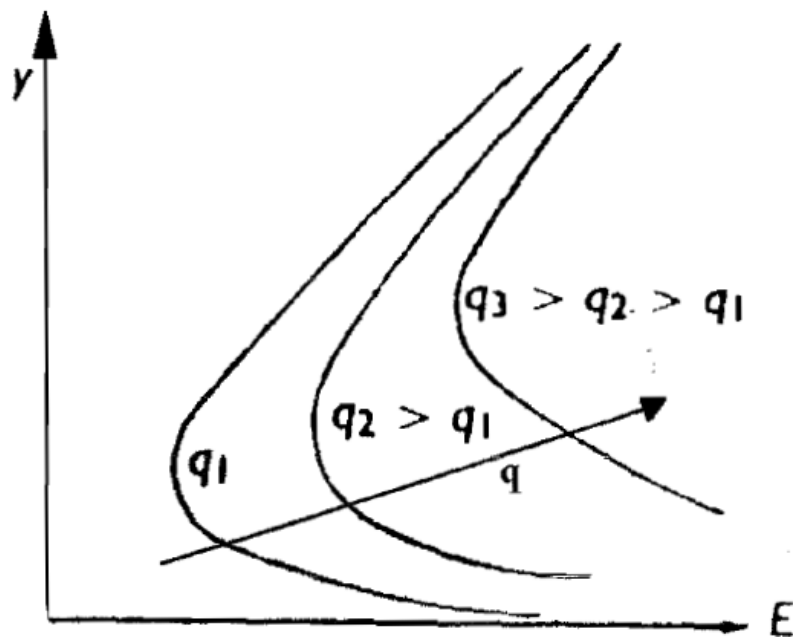


Figura 11: Energía frente a calado para distintos caudales específicos.

La variación de caudal se muestra en la siguiente figura en la que el caudal máximo para la profundidad crítica. Esta curva también se denomina curva de Koch.

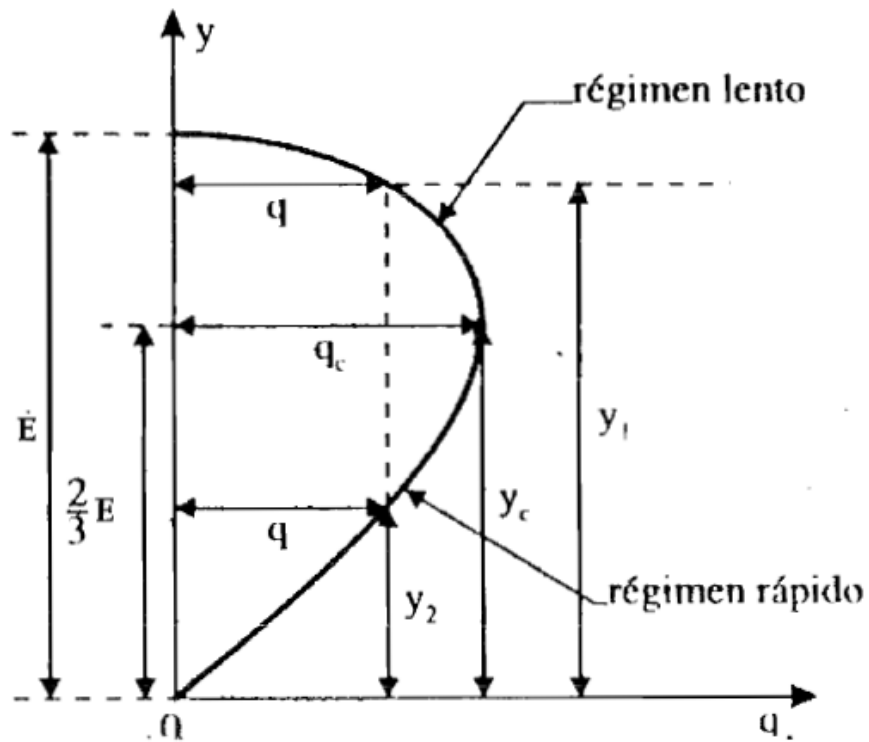


Figura 12: Variación del caudal a energía constante o Curva de Koch.

En la gráfica anterior se muestra la curva de Koch para una energía específica dada presenta un caudal específico máximo, o crítico, para un calado crítico.

Para un caudal específico mayor que  $q_c$ , el movimiento es imposible salvo que aumente la energía específica.

La energía específica adopta un solo valor en cada sección del canal, aunque puede variar a lo largo de éste debido a las pérdidas de energía o variación de la elevación del canal.

## CAPÍTULO 2

### 2 CONSIDERACIONES IMPORTANTES SOBRE EL FLUJO EN CANALES

#### 2.1 FLUJO EN CANALES ABIERTOS

En conductos cerrados el flujo lleva el conducto y se mueve debido a un gradiente de presión reducida, siendo el gradiente de presión

$$\frac{dP}{dl} = \frac{dP}{dl} + \frac{d(\rho g z)}{dl} \quad Ec. 3.1$$

En canales abiertos el fluido fluye con una superficie libre, como pueden ser arroyos, ríos, acequias, etc.

$$\frac{dP}{dl} = \frac{dP}{dl} + \frac{d(\rho g z)}{dl} \quad Ec. 3.2.$$

La fuerza impulsora es la gravedad existiendo un cambio neto de elevación en el canal para producir el movimiento.

En el análisis del flujo en canales abiertos hay que tener en cuenta,

- El fluido no asciende en un canal abierto.
- Se desconoce la geometría exacta de la corriente.
- El análisis del flujo en canales abiertos es más complicado que el análisis de flujo en conductos.
- Se requieren más datos empíricos y aproximaciones que flujo en tuberías.
- La superficie libre puede desplazarse.
- Las secciones transversales pueden ser de gran variedad dependiendo de su función práctica.
- La distribución de velocidades a través de la sección es menos uniforme y más compleja que en tuberías.
- La fuerza másica a considerar es la gravedad.
- En general, el movimiento turbulento está dominado por la rugosidad.

#### 2.2 TIPOS DE FLUJO.

- Permanente o estacionario: la profundidad no cambia con el tiempo.
  - Uniforme: la profundidad no varía a lo largo del canal.
  - Variado:
    - Gradualmente variado: la profundidad varía en distancias grandes.
    - Rápidamente variado:
- No estacionario
  - Uniforme
  - Variado

## 2.3 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES.

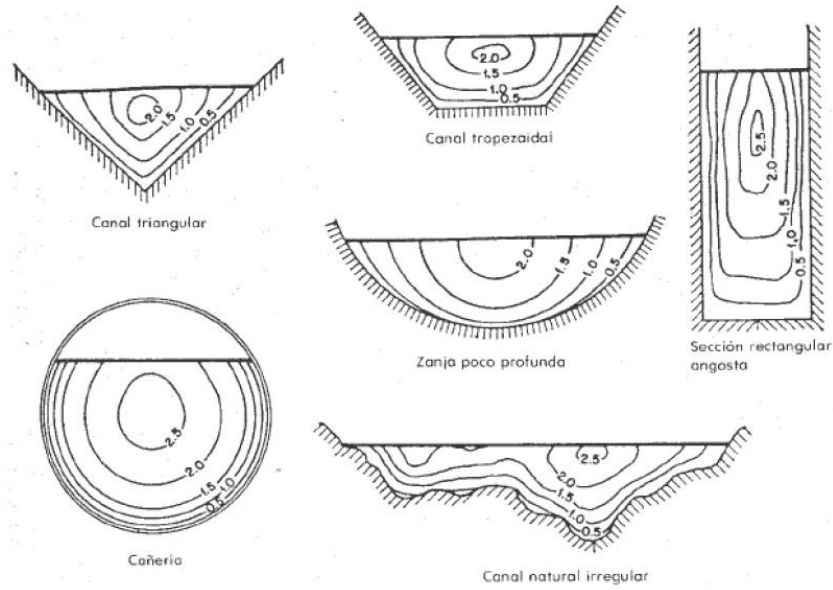


Figura 13: Distribución de velocidades.

La velocidad máxima se encuentra entre 0.05 y 0.25 veces la profundidad. Si el suelo es liso la velocidad máxima se encuentra en la superficie libre.

## 2.4 MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD.

$$Q = \sum V_i A_i \quad \text{Ec. 3.3}$$

Velocidad media:

$$\bar{U} = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Coeficiente de energía:

$$\alpha = \frac{\int u^3 dA}{\bar{v}^3 A} = \frac{\sum u_i^3 A_i}{\bar{v}^3 A} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Aplicando Bernouilli

$$P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \alpha_1 \rho v_1^2 = P_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \alpha_2 \rho v_2^2 + \Delta P_2 \quad \text{Ec. 3.6}$$

Coeficiente cantidad de movimiento:

$$\beta = \frac{\int u^2 dA}{\bar{v}^2 A} = \frac{\sum u_i^2 A_i}{\bar{v}^2 A} \quad \text{Ec. 3.7}$$

En perfil uniforme se considera  $\beta = \alpha = 1$

## 2.5 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.

Los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad del flujo. Estos elementos son muy importantes y se utilizan con amplitud en el cálculo de flujo. Para secciones de canal regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección. La forma más conocida de la sección transversal de un canal es la trapezoidal, como se muestra en las siguientes figuras.

- Sección Vertical ( $S_v$ ): tomada verticalmente a la sección del flujo.
- Sección transversal ( $S_t$ ): Tomada perpendicularmente a la sección del flujo
- Profundidad de circulación ( $y$ ): Distancia entre la superficie libre del agua y el punto más bajo de la sección vertical.
- Tirante ( $d$ ): Es la distancia entre la superficie y fondo del canal en un plano perpendicular a la dirección del flujo.
- Ancho de fondo ( $b$ ): Ancho del canal en la parte más profunda
- Talud ( $m$ ): distancia horizontal correspondiente a una unidad vertical de altura.

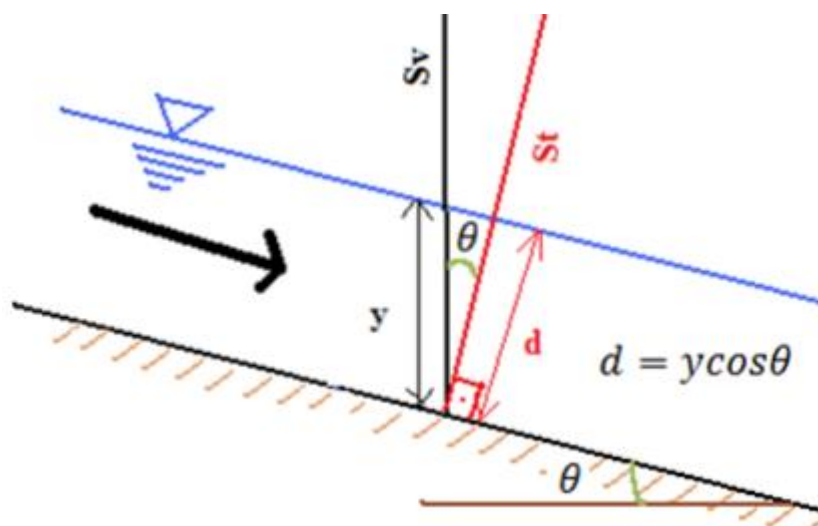


Figura 14: Sección transversal de un canal.



Figura 15: Sección transversal de un canal trapezoidal.

- Área Mojada (A): Área de la sección transversal del flujo por debajo de la superficie libre.
- Perímetro Mojado (P): longitud de la traza de las paredes de conducción más el ancho de fondo.
- Ancho superficial: es el ancho del canal en la zona de la superficie libre.
- Radio hidráulico: es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado.

$$R_h = \frac{A}{P} \quad Ec. 3.8$$

- Profundidad hidráulica (D): Relación entre el área mojada y el ancho superficial.

$$D = \frac{A}{T} \quad Ec. 3.9$$

- Factor de sección (Z): producto entre el área mojada y la raíz de la profundidad hidráulica.

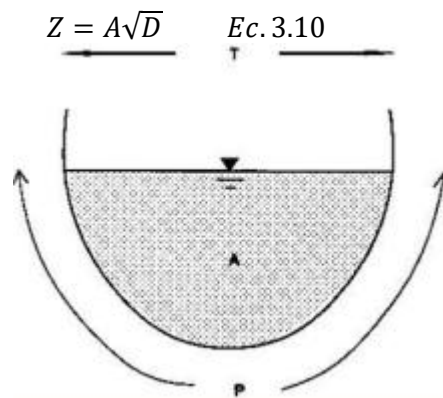


Figura 16: Parámetros geométricos en un canal.

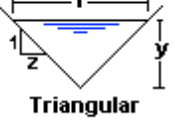
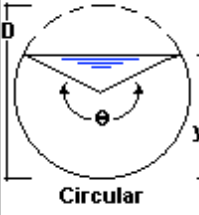
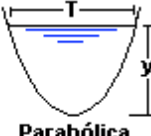
| Tipo de sección                                                                                  | Área A (m <sup>2</sup> )                   | Perímetro mojado P (m) | Radio hidráulico Rh (m)                            | Espejo de agua T (m)                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| <br>Rectangular | $by$                                       | $b+2y$                 | $\frac{by}{b+2y}$                                  | $b$                                                      |
| <br>Trapezoidal | $(b+zy)y$                                  | $b+2y\sqrt{1+z^2}$     | $\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$                 | $b+2zy$                                                  |
| <br>Triangular  | $zy^2$                                     | $2y\sqrt{1+z^2}$       | $\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$                         | $2zy$                                                    |
| <br>Circular    | $\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$ | $\frac{\theta D}{2}$   | $(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$ | $(\text{sen}\frac{\theta}{2})D$<br>ó<br>$2\sqrt{y(D-y)}$ |
| <br>Parabólica | $\frac{2}{3}Ty$                            | $T + \frac{8y^2}{3T}$  | $\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$                            | $\frac{3A}{2y}$                                          |

Figura 17: Parámetros geométricos para varios tipos de sección de un canal.

## 2.6 PARÁMETROS ADIMENSIONALES.

El agua al fluir está afectada por la gravedad, la fricción en las paredes y la tensión superficial en la superficie libre.

Las fuerzas de gravedad actúan para nivelar la superficie.

Número de Froude.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gl}} = \sqrt{\frac{\rho v^2}{\rho gl}} = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas gravitatorias}} \quad \text{Ec. 3.11}$$

Número de Reynolds.

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad \text{Ec. 3.12}$$

## 2.7 FLUJO UNIFORME.

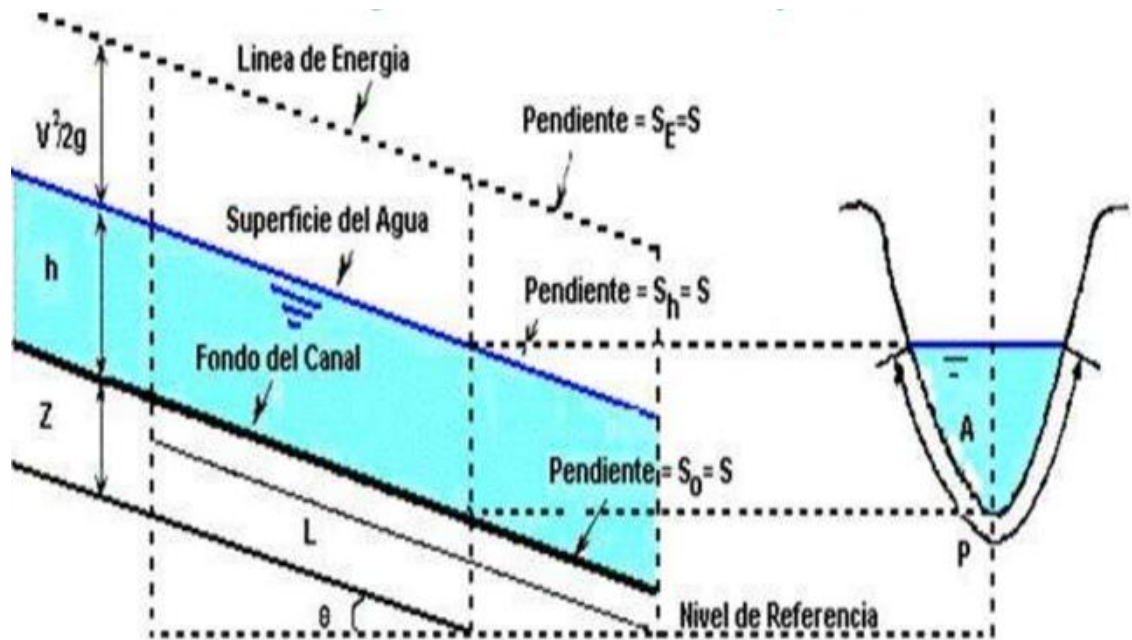


Figura 18: Líneas de energía en canales con flujo uniforme.

Si el flujo es uniforme  $Y_1 = Y_2$

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \text{ siendo } v_1 = v_2 \quad \text{Ec. 3.14}$$

Ecuación de la energía

$$z_1 + Y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + Y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_L \quad \text{Ec. 3.15}$$

$$z_1 - z_2 = \Delta h_2 \rightarrow s = \frac{z_1 - z_2}{L} = \frac{\Delta h_L}{L} \quad \text{Ec. 3.16}$$

$$s = f \frac{v^2}{2g} \frac{1}{D_H} = f \frac{v^2}{8gR_H} \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$U = \left( \frac{8g}{f} R_H S \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Dónde

$$D_H = \text{diámetro hidráulico} = \frac{4A}{\rho} \quad \text{Ec. 3.19}$$

$$R_H = \text{Radio hidráulico} = \frac{A}{\rho} \quad \text{Ec. 3.20}$$

El mismo resultado se puede obtener aplicando la ecuación de Cantidad de Movimiento al volumen de control.

$$\int_{S_c} \rho \bar{u} (\bar{u} - \bar{u}_e) \bar{n} ds = \int_{S_c} (P - P_a) \bar{n} ds + \underbrace{\int_{S_c} \bar{z}' \bar{n} ds + \int_{V_c} \rho f_m dV}_{F_f = F_m} \quad Ec. 3.21$$

El primer término es nulo debido a que no hay efectos convectivos y el segundo término también es nulo por ser la misma distribución de presiones en 1 y 2.

$$\int_{S_c} \bar{z}' \bar{n} ds = \bar{Z}_p \rho L \quad Ec. 3.22$$

$$\int_{V_c} \rho f_m dV = \rho g A L S \quad Ec. 3.23$$

$$Z_p = \rho g S R_H \quad Ec. 3.24$$

En general, la diferencia de presión reducida  $P = P + \rho g z$  es la fuerza que produce el movimiento venciendo la fuerza de fricción  $F_f = Z_p \rho L$

$$\Delta P A = Z_p \rho L \rightarrow Z_p = \frac{\Delta P}{L} R_H = - \frac{dP}{dl} R_H = Z_p \quad Ec. 3.25$$

Factor de fricción

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho v^2} \frac{D_H}{L} = \frac{dP}{dl} \frac{D_H}{\frac{1}{2} \rho v^2} = \frac{8 Z_p}{\rho v^2} \quad Ec. 3.26$$

Sustituyendo (3.23) y (3.25) en (3.24) se obtiene la velocidad de flujo con pendiente S

$$U = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R_H S} \quad Ec. 3.27$$

La velocidad U aumenta con la pendiente S y con  $R_H$ , y disminuye al aumentar el factor de fricción  $f(Re, \epsilon/D_H)$

La velocidad se suele expresar como

$$U = C \sqrt{R_H S} = \text{Fórmula de Chezy} \quad Ec. 3.28$$

Donde  $C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$ , que varía de 33 – 88 m<sup>1/2</sup>/s y depende del Reynolds y de la rugosidad.

## 2.8 MOVIMIENTO NO UNIFORME EN CANALES.

### 2.8.1 RÉGIMEN GRADUALMENTE VARIADO.

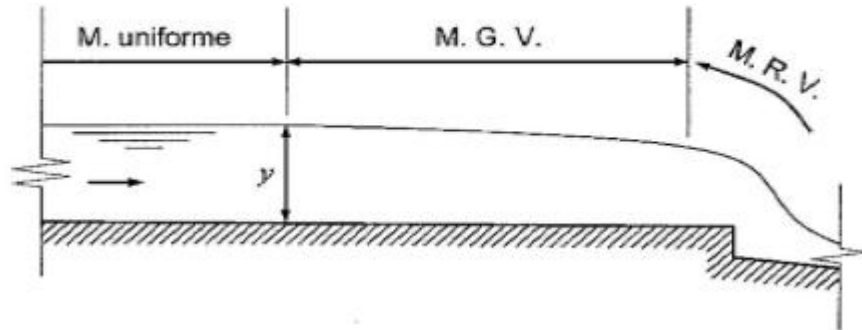


Figura 19: Tipos de movimiento del flujo en un canal.

MU: movimiento uniforme  
 MGU: movimiento gradualmente variado  
 MRV: movimiento rápidamente variado

Aplicando continuidad:

$$Q = UA = \text{constante} \quad \text{Ec. 3.29}$$

$$\frac{d}{dl}(UA) = 0 \quad \text{Ec. 3.30}$$

El área (A) puede variar porque varía el nivel del agua o porque varíe la forma de la sección transversal

$$U \frac{\partial A}{\partial l} + U \frac{\partial A}{\partial y} \frac{dy}{dl} + A \frac{dv}{dl} = 0 \quad \text{Ec. 3.31}$$

Si el canal es de sección constante,  $\frac{\partial A}{\partial l} = 0$

En el caso de canal rectangular de sección constante

$$u \frac{dy}{dl} + y \frac{du}{dl} = 0 \quad \text{Ec. 3.32}$$

Aplicando cantidad de movimiento

$$u \frac{\partial u}{\partial l} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial l} = -\frac{\tau_p}{\rho R_H} \quad \text{Ec. 3.33}$$

Siendo  $P = P_a + \rho g z = \text{Presión reducida}$   
 $\tau_p = \text{esfuerzos cortantes en la pared}$

$$R_H = \frac{A}{P} = \text{radio hidráulico}$$

$$P = P_a + \rho g(z_s + y) \quad \text{Ec. 3.34}$$

$$\frac{\partial P}{\partial l} = \rho g \frac{\delta}{\delta l} (z_s + y) \quad \text{Ec. 3.35}$$

$$\frac{d}{dl} \left( \frac{u^2}{2} + g(z_s + y) \right) = -\frac{\tau_p}{\rho R_H} = -S_f g \quad \text{Ec. 3.36}$$

$$\frac{\tau_p}{\rho R_H} = g S_f \quad \text{Ec. 3.37}$$

$$\frac{d}{dl} (z_s) = -S = \text{Pendiente del canal} \quad \text{Ec. 3.38}$$

$$\frac{d}{dl} \left( \frac{u^2}{2} + g y \right) = g(S - S_f) \quad \text{Ec. 3.39}$$

$$u \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial l} + A \frac{du}{dl} = 0 \quad \text{Ec. 3.40}$$

Sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas (u, y) con S como dato y  $S_f$  calculado mediante número de Reynolds y rugosidad.

Desarrollando la ecuación (3.39)

$$u \frac{du}{dl} + g \frac{dy}{dl} = g(S - S_f) \quad \text{Ec. 3.41}$$

$$g \frac{dy}{dl} - \frac{u^2}{A} \frac{\partial A}{\partial y} \frac{dy}{dl} = g(S - S_f), \text{ donde } b = \frac{\partial A}{\partial y} \quad \text{Ec. 3.42}$$

$$\left( g - \frac{u^2 b}{A} \right) \frac{dy}{dl} = g(S - S_f) \quad \text{Ec. 3.43}$$

$$\left( 1 - \frac{u^2}{g \frac{A}{b}} \right) \frac{dy}{dl} = (S - S_f) \quad \text{Ec. 3.44}$$

Siendo  $A/b = Y_m$  que es el calado medio y el número de Froude  $F_r^2 = \frac{u^2}{g Y_m}$   
 Por tanto, la ecuación de variación de la superficie libre queda

$$\frac{dy}{dl} = \frac{S - S_f}{1 - F_r^2} \quad \text{Ec. 3.45}$$

Sabiendo que  $S_f = \frac{\tau_p}{\rho g R_H}$  y que  $\tau_p = \frac{\lambda}{8} \rho u^2$

$$\text{Con } \lambda = 8g \frac{n^2}{R_H y^3} \rightarrow \tau_p = \frac{g n^2}{R_H y^3} \rho u^2$$

$$S_f = \frac{n^2 u^2}{R_H^{4/3}} \quad \text{Ec. 3.46}$$

$$\frac{dy}{dl} = \frac{s - \frac{n^2 u^2}{R_H^{4/3}}}{1 - \frac{b u^2}{A g}} \quad \text{Ec. 3.47}$$

En función del caudal Q, que es conocido

$$\frac{dy}{dl} = \frac{s - \frac{n^2 Q^2}{R_H^{4/3} A^2}}{1 - \frac{b Q^2}{A^3 g}} \quad \text{Ec. 3.48}$$

Con n, Q, s como datos y A, b,  $R_H$  como función de y.

En el caso particular de sección rectangular

$$A = by \quad \text{Ec. 3.49}$$

$$R_H = \frac{by}{b + 2y} \quad \text{Ec. 3.50}$$

$$Q = uyb \quad \text{Ec. 3.51}$$

$$q = \frac{Q}{b} \quad \text{Ec. 3.52}$$

$$\frac{dy}{dl} = \frac{s - \frac{n^2 q^2}{R_H^{4/3} y^2}}{1 - \frac{q^2}{y^3 g}} \quad \text{Ec. 3.53}$$

En régimen uniforme

$$S = S_f = \frac{n^2 Q^2}{R_H^{4/3} A^2} \rightarrow \frac{dy}{dl} = 0 \quad \text{Ec. 3.54}$$

Si el canal es infinitamente ancho  $R_H \rightarrow y$

$$\frac{dy}{dl} = \frac{s - \frac{n^2 q^2}{y^{10/3}}}{1 - \frac{q^2}{y^3 g}} \quad Ec. 3.55$$

$$\frac{dy}{dl} = \frac{s - \frac{n^2 q^2}{y^{10/3}}}{1 - \frac{q^2}{y^3 g}} = \frac{S - S_f}{1 - F_r^2} \quad Ec. 3.56$$

Cuando el calado es uniforme  $S = S_f \rightarrow dy/dl=0$ . Por tanto, cuando  $y=y_n$ , calado uniforme, no habrá variación de calado. Siendo  $y_n$  el calado para el cual con cauce  $Q$  y pendiente  $S$  y coeficiente  $n$  se alcanza el régimen uniforme.

La superficie libre, al aproximarse al régimen uniforme, tiende a  $Y_n$  sin superarlo,

$$Y_n^{10/3} = \frac{n^2 q^2}{s} \quad Ec. 3.57$$

Por otra parte, se encuentra la altura crítica:

$$Y_c^3 = \frac{q^2}{g} \quad Ec. 3.58$$

Para la cual  $F_r = 1 \rightarrow dy/dl \rightarrow \infty$  y no depende de la pendiente del canal.

Si la evolución se produce partiendo de un flujo supercrítico aguas arriba, se produce un resalto hidráulico antes de pasar al régimen subcrítico.

En caso de partir de  $F_r < 1$  transición ordenada pero la teoría deja de ser aplicable cuando  $dy/dl=\infty$  (flujo no gradualmente variado).

Las líneas paralelas a la solera a distancias  $Y_N$  e  $Y_c$  son límites de cálculo de la forma de la superficie libre.

Para canales rectangulares de gran anchura

$$\frac{dy}{dl} = \frac{s - \frac{n q^2}{y^{10/3}}}{1 - \frac{q^2}{y^3 g}} \quad Ec. 3.59$$

$$S = \frac{1 - \left(\frac{Y_N}{Y}\right)^{10/3}}{1 - \left(\frac{Y_c}{Y}\right)^3} = \frac{dy}{dl} \quad Ec. 3.60$$

Condiciones para la pendiente,

Si  $Y_N < y$  el numerador es positivo

$F_r < 1$  si  $y > y_c \rightarrow dy/dl > 0$  Pendiente creciente  
 $F_r > 1$  si  $y < y_c \rightarrow dy/dl < 0$  Pendiente decreciente

Si  $Y_N > y$  el numerador es negativo

$F_r < 1$  si  $y > y_c \rightarrow dy/dl < 0$  Pendiente decreciente  
 $F_r > 1$  si  $y < y_c \rightarrow dy/dl > 0$  Pendiente creciente

Los perfiles de la superficie libre dependen de las relaciones entre  $Y_c$ ,  $Y_N$ , y  $S$ .

- $Y_c < Y_N \rightarrow S < S_{fc}$  representa canal con pendiente suave  
Las curvas de superficie libre denominadas M
- $Y_c > Y_N$  Pendiente fuerte. Curvas tipo S
- $Y_c = Y_N$  Pendiente crítica. Curvas tipo C
- $S = 0$   $Y_N = \infty$  Horizontal. Curva tipo H

A su vez se denomina

Tipo 2  $Y > Y_c, Y_N$   
Tipo 2  $Y_c < Y < Y_N$  o  $Y_N < Y < Y_c$   
Tipo 3  $Y < Y_c, Y_N$

A continuación, se presenta gráficamente los perfiles de flujo resultantes en los diversos casos.

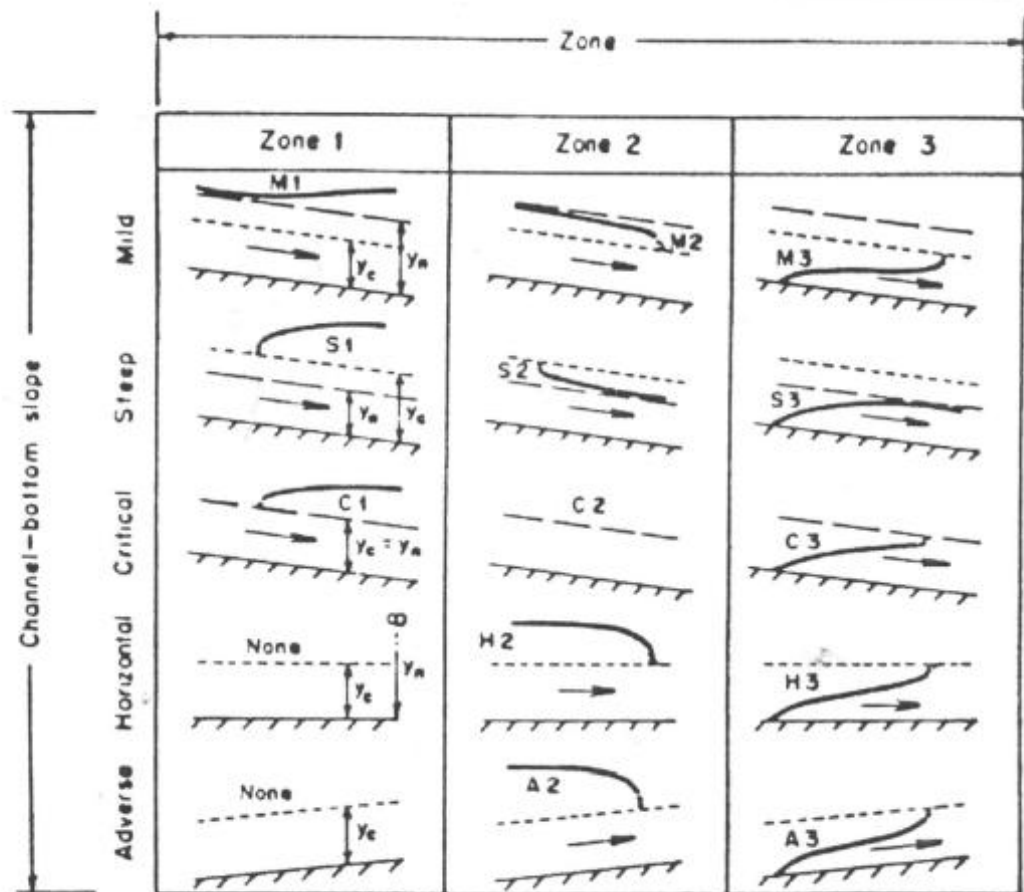


Figura 20: Perfiles de flujo.

Los ejemplos en los cuales ocurre flujo gradualmente variado son muy diversos. A continuación, se presentan tan solo algunos de los más usuales para canales de pendiente suave (mild slope) y fuerte (steep slope).

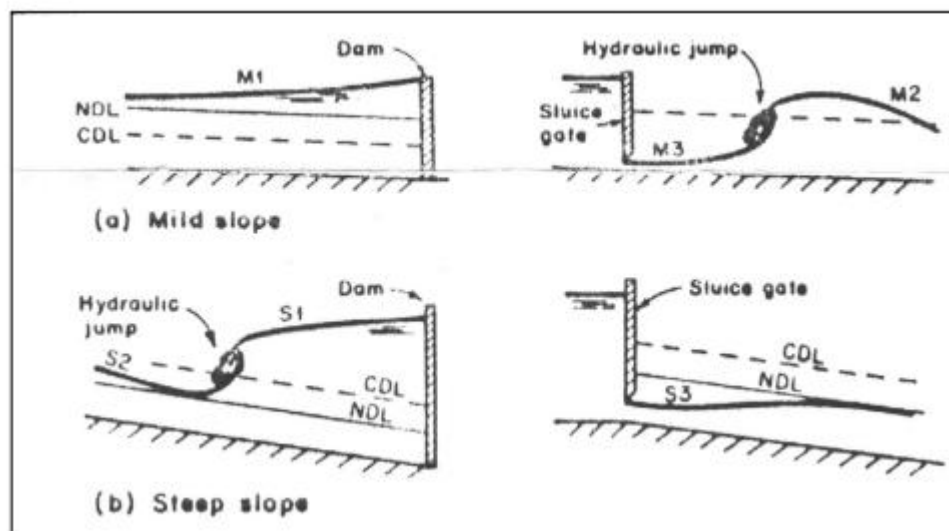


Figura 21: Ejemplos de flujo gradualmente variado.

## CAPÍTULO 3

### 3 EQUIPO DE LABORATORIO.



*Figura 22: Canal Hidrodinámico E.P.S. de Linares.*

#### 3.1 CANAL HIDRÁULICO (TÚNEL HIDRODINÁMICO).

El manual describe y detalla las características generales constructivas y las instrucciones de instalación, operación y mantenimiento del Canal Hidráulico (Túnel Hidráulico) suministrado de acuerdo a las condiciones técnicas del Lote 2, EQUIPAMIENTO MECANICA DE FLUIDOS 1. UN CANAL HIDRAULICO (TÚNEL HIDRODINAMICO) correspondiente al Expediente 2014/25: "Suministro e instalación de instrumentación y equipos científicos para el Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera en el Complejo de Laboratorios de I+D del Campus Científico-Tecnológico de Linares. Edificio de Laboratorios Este".

El Canal Hidráulico -Túnel Hidráulico ha sido diseñado y desarrollado para generar condiciones de flujo laminar uniforme de velocidad máxima de 1 m/s en la sección de ensayo y poder realizar, entre otras actividades, ensayos (estudios) de simulación de las condiciones de interacción de un cuerpo (modelo a escala) con un flujo de alta densidad en condiciones de visualización tridimensional del flujo alrededor de dicho elemento.

##### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA.

El Canal Hidráulico -Túnel Hidráulico (CH-TH) ha sido diseñado para su funcionamiento sin tapa superior (canal) o con tapa (túnel), es capaz de generar un flujo uniforme (intensidad turbulenta inferior al 1.5%) en la sección de ensayo (0,4 x 0.4 x 2m) con una velocidad máxima de 1m/s, dispone en la sección de ensayo de una zona habilitada para la fijación de instrumentos medida, accesorios para prácticas y se suministra junto a los accesorios de prácticas diseñados para las dimensiones y anclajes del mismo.

En la figura siguiente se recoge una vista general del Canal Hidráulico.

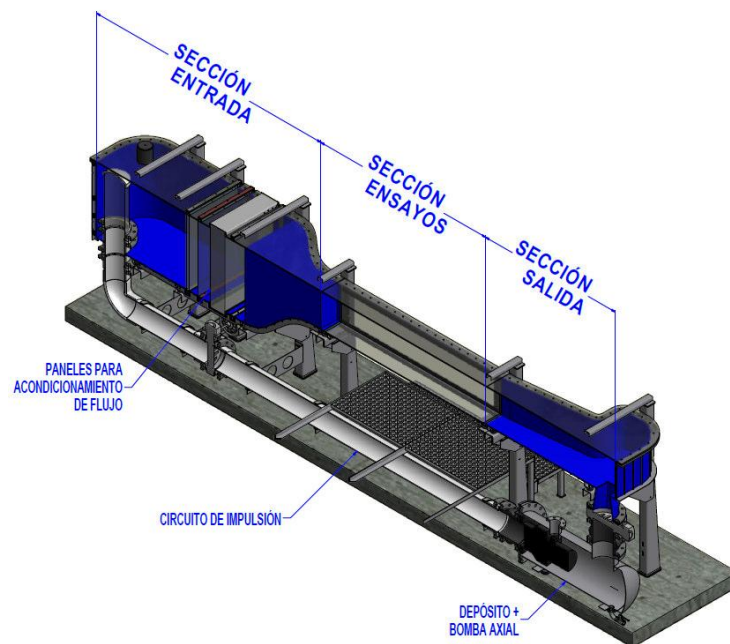


*Figura 23: Vista general del Canal de Ensayos.*

El Túnel Hidrodinámico está formado por los siguientes componentes o elementos principales que se describen a continuación:

#### **3.1.1.1 Sistema mecánico.**

El sistema mecánico del Túnel Hidrodinámico es un circuito cerrado que se compone de una sección de entrada, una sección de ensayos, una sección de salida y el circuito de impulsión.



*Figura 24: Esquema del sistema mecánico.*

En la siguiente imagen se muestran las dimensiones generales del sistema:

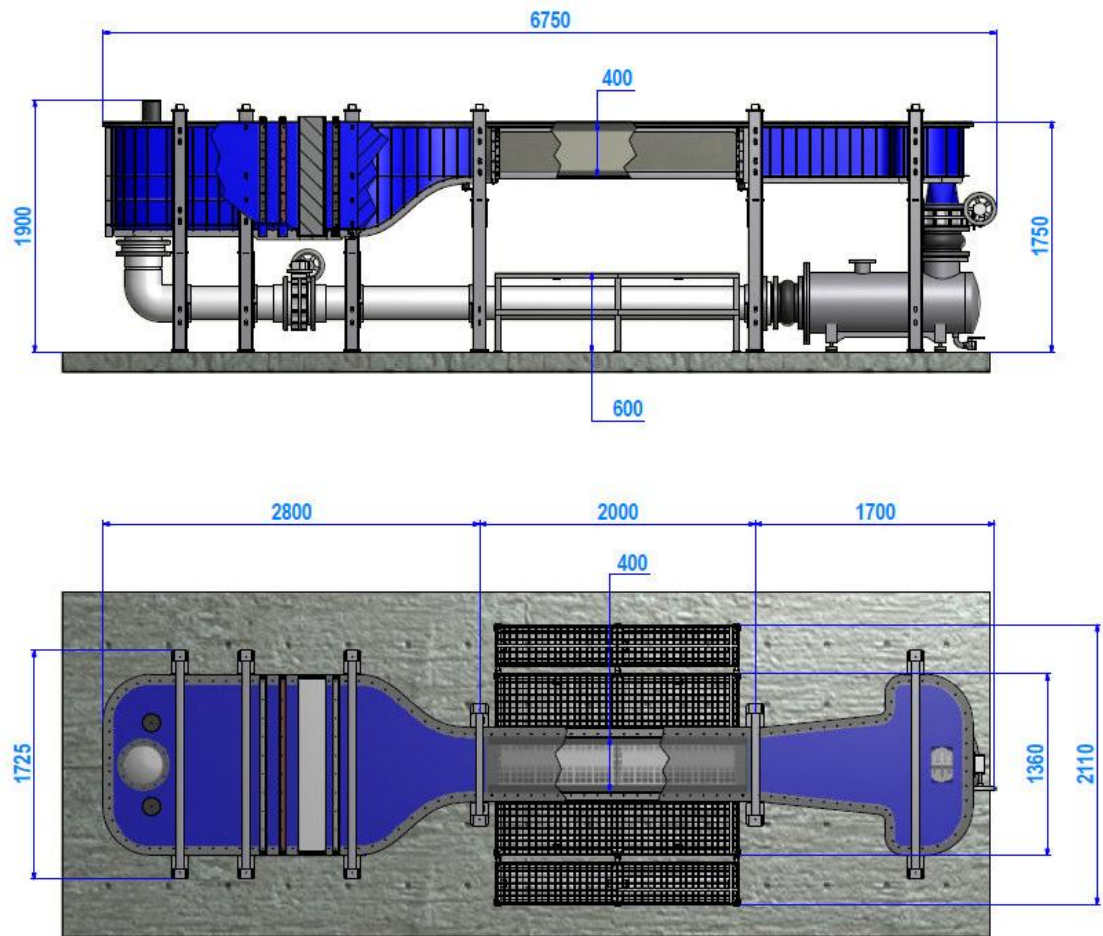


Figura 25: Dimensiones generales del Túnel Hidrodinámico.

### 3.1.1.2 Sistema eléctrico.

Todas las conexiones de control y potencia se encuentran recogidas en un único armario: Armario Principal.



Figura 26: Armario Principal

Situado en el lateral de la sala. Alberga los elementos de protección eléctrica, el dispositivo supervisor de seguridad PILZ, el variador de frecuencia y el convertidor para conexión USB.



*Figura 27: Interior armario principal.*

### 3.1.1.3 Sistema de control.

El sistema de control está formado por:

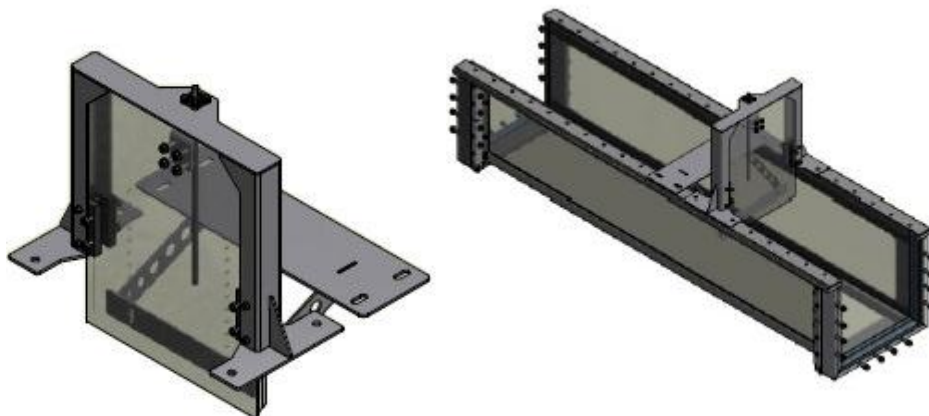
- Software de ensayo específico en entorno Windows: *ApliTúnel*
- Variador de frecuencia

El sistema *ApliTúnel* permite el encendido y apagado de la bomba, así como el control en frecuencia de la misma para la selección de flujo.

## 3.2 OBSTÁCULOS.

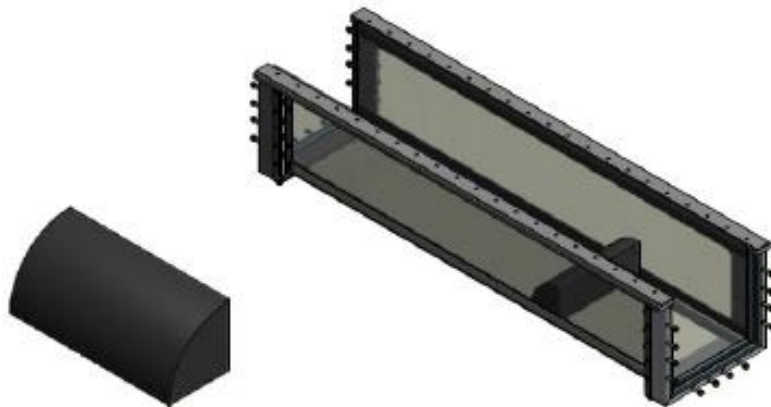
A continuación, se muestran los obstáculos de ensayo utilizados.

- Compuerta



*Figura 28: Obstáculo compuerta.*

- Vertedero grueso.



*Figura 29: Obstáculo vertedero grueso.*

- Obstáculo crítico.

Este obstáculo crítico consta de dos obstáculos diferentes, uno grande de 75 mm y otro pequeño de 50 mm.



*Figura 30: Obstáculo crítico.*

### 3.3 SISTEMA DE VARILLAS.

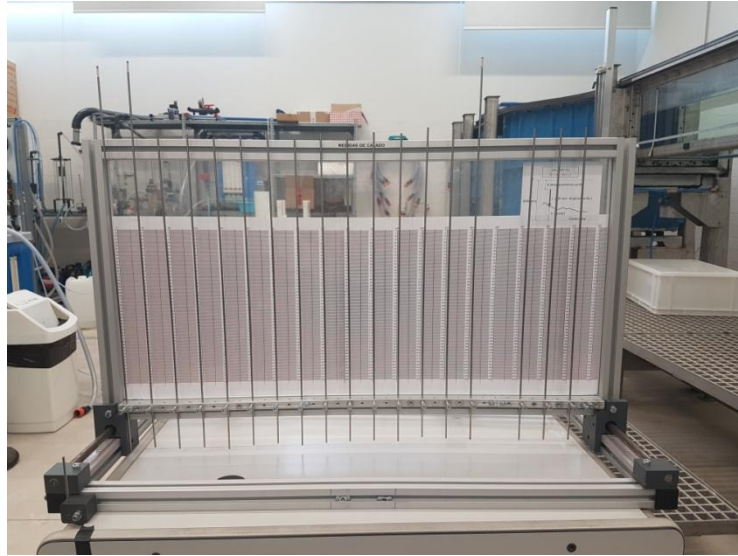


Figura 31: Sistema de varillas medición calado.

Este sistema se ha creado con la finalidad de medir el flujo a través de 18 varillas, las cuales se van bajando hasta la superficie del flujo para medir el calado.

En la siguiente imagen se muestra la medición del calado mediante la fórmula

$$h = A - (D + L) \quad \text{Ec. 2.1}$$

dónde  $h$  es el calado que se quiere obtener,  $A$  es igual a 800 mm,  $D$  el desplazamiento de la varilla y  $L$  la longitud de varilla.

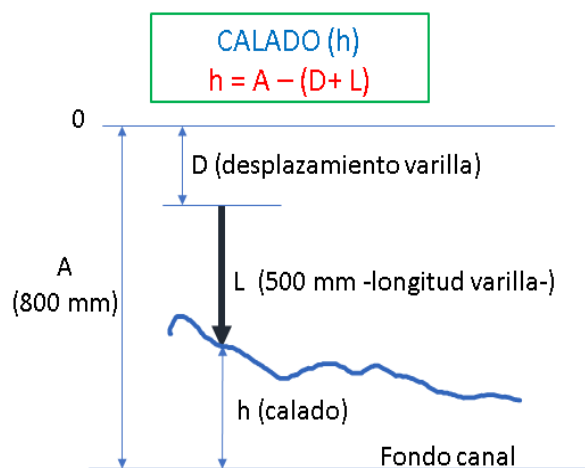


Figura 32: Medición del calado.

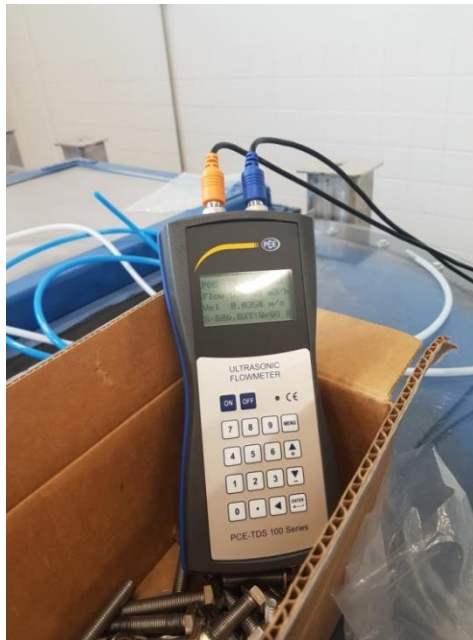
### 3.4 CAUDALÍMETRO ULTRASÓNICO.



*Figura 33: Instrumento de medición para el caudal.*

Los caudalímetros ultrasónicos usan ondas de sonido para determinar la velocidad de un fluido que fluye en una tubería. Sin condiciones de flujo, las frecuencias de una onda ultrasónica transmitida a una tubería y sus reflejos del fluido son las mismas. En condiciones de flujo, la frecuencia de la onda reflejada es diferente debido al efecto Doppler. Cuando el fluido se mueve más rápido, el cambio de frecuencia aumenta linealmente. El transmisor procesa las señales de la onda transmitida y sus reflejos para determinar la velocidad de flujo.

Los caudalímetros ultrasónicos de tiempo de tránsito envían y reciben ondas ultrasónicas entre transductores tanto en sentido ascendente como descendente en la tubería. Sin condiciones de flujo, se requiere el mismo tiempo para viajar aguas arriba y aguas abajo entre los transductores. Bajo condiciones de flujo, la onda ascendente viajará más despacio y tomará más tiempo que la ola (más rápida) aguas abajo. Cuando el fluido se mueve más rápido, la diferencia entre los tiempos de subida y bajada aumenta. El transmisor procesa los tiempos de subida y bajada para determinar el caudal. Representan aproximadamente el 12% de todos los caudalímetros vendidos.



*Figura 34: Caudalímetro ultrasónico.*

Los caudalímetros ultrasónicos se utilizan comúnmente para medir la velocidad de los líquidos que permiten que pasen las ondas ultrasónicas, como el agua, el azufre fundido, los líquidos criogénicos y los productos químicos. Los diseños de tiempo de tránsito también están disponibles para medir el flujo de gas y vapor. Hay que tener cuidado porque los fluidos que no transmiten energía ultrasónica, como muchos tipos de superficie, limitan la penetración de las ondas ultrasónicas en el fluido. En los caudalímetros ultrasónicos Doppler, los fluidos opacos pueden limitar la penetración de la onda ultrasónica demasiado cerca de la pared de la tubería, lo que puede degradar la precisión y / o hacer que el medidor de flujo no mida. Los caudalímetros ultrasónicos de tiempo de tránsito pueden no funcionar cuando un fluido opaco debilita la onda ultrasónica hasta tal punto que la onda no llega al receptor.

### **3.5 MANÓMETRO DIFERENCIAL: DIGITAL Y COLUMNAS PIEZOMÉTRICAS DE AGUA.**

Un manómetro es un instrumento empleado para medir la presión de un fluido o gas en el interior de un circuito. En las instalaciones de aire comprimido, son instrumentos vitales para la información, regulación y control de los compresores, secadores o filtros.

En general, los manómetros utilizan la presión atmosférica como valor de referencia, es decir, que su valor cero corresponde al valor absoluto 1 de la presión atmosférica. El valor que se lee en el manómetro corresponde a la diferencia que existe entre la presión real y la atmosférica. A este valor se le denomina presión manométrica.

Las unidades más frecuentes son  $\text{Kg/cm}^2$ , bar, Atm, Pa, PSI.

En la actualidad existen muchos tipos de manómetros diferentes, en función de la forma en la que muestran los valores:

El más común es el tipo Bourdon que consiste en un tubo enrollado en espiral, que está conectado, en uno de sus extremos, a la línea de aire comprimido. Posiblemente es el más utilizado en este tipo de instalaciones.

El manómetro de presión diferencial se basa en la medición de la diferencia de presión entre dos puntos. El valor que muestra corresponde con el equivalente a la pérdida de presión o reducción de presión entre los dos puntos de referencia. Es muy usado para determinar el valor de saturación, por suciedad, de los filtros de línea.

Los manómetros digitales se utilizan en instalaciones donde se requiere una medición de precisión o la comunicación de los valores de presión con algún tipo de control. Muestran los valores sobre una pantalla con un rango de precisión muy alto. Algunos de ellos permiten interactuar mediante el protocolo HART, otros envían información por contactos o señales de 4 a 20 mA.

Los sensores de presión son equipos que miden la presión en un punto concreto o el valor de presión diferencial entre dos puntos y comunican dichos valores a un sistema de control específico. La comunicación suele ser con una señal de 4 a 20 mA. Se emplean mucho como parte de la instrumentación de control de los compresores.



*Figura 35: Manómetro diferencial digital.*

A continuación, se muestra la imagen del manómetro de columnas de agua, en el cual se hace una medición visual sobre una regla.

El manómetro de columnas de agua, es el instrumento de medición de presión más antiguo, y de los más exactos en los alcances de 500 Pa a 200 kPa. La selección de la configuración de la columna y del fluido manométrico permite la medición de todos los tipos de presión: absoluta, barométrica, bajo vacío, vacío negativo, relativa y diferencial. Las ventajas de este instrumento como patrón de referencia primario, así como su diseño, fabricación y uso, están al alcance de los laboratorios de calibración 'secundarios', que requieren o están interesados en prestar servicios de calibración de alta exactitud. La adecuada selección de la configuración del instrumento, la capacidad de medición de los instrumentos auxiliares, el claro conocimiento de las magnitudes de influencia que afectan su operación, y buenas prácticas de operación y calibración del mismo; hacen un instrumento de medición de presión muy versátil y capaz, a pesar de su antigüedad.

A continuación, se muestra la imagen del manómetro de columnas de agua que ha sido el que más se ha utilizado en los ensayos de este proyecto en el laboratorio para medir la velocidad del flujo.



*Figura 36: Manómetro diferencial manual.*

### 3.6 TUBO DE PITOT.



*Figura 37: Tubo de Pitot.*

El Tubo de Pitot se utiliza para establecer la velocidad del flujo a través de la medición de la presión de estancamiento (la presión en una rama paralela a la dirección del flujo y ocluida en su otro extremo que es igual a la suma de la presión estática y la presión dinámica. la presión estática es la presión de un fluido medida en un punto. la presión total se mide en el extremo ocluido. el valor de la presión dinámica que depende de la velocidad del flujo y su densidad se calcula por la diferencia entre las medidas, en este caso con el desplazamiento del diafragma.

Es utilizado para la medición del caudal y está constituido por dos tubos que detectan la presión en dos puntos distintos de la tubería. Pueden montarse por separado o agrupados dentro de un alojamiento, formando un dispositivo único. Uno de los tubos mide la presión de impacto en un punto de la vena y el otro mide únicamente la presión estática.

Generalmente mediante un orificio practicado en la pared de la conducción. Un Tubo de Pitot mide dos presiones simultáneamente, la presión de impacto ( $p_t$ ) y presión estática ( $p_s$ ). La unidad para medir la presión de impacto es un tubo con el extremo doblado en ángulo recto hacia la dirección del flujo. El extremo del tubo que mide presión estática es cerrado, pero tiene una pequeña ranura de un lado. Los tubos se pueden montar separados o en una sola unidad.

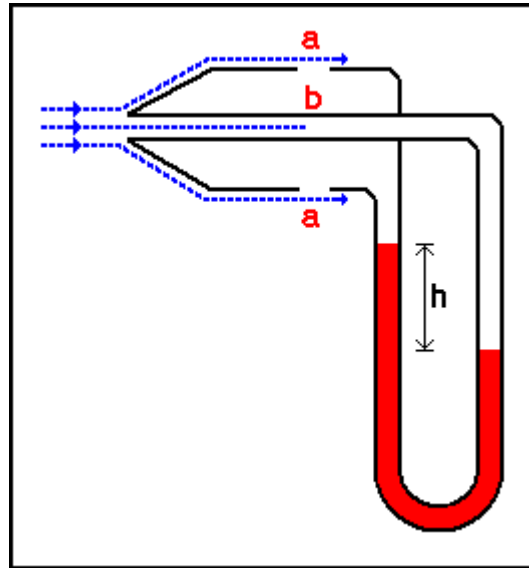
La ecuación de Bernoulli nos muestra:

$$p_t = p_s + \left( \frac{\rho V^2}{2} \right) \quad \text{Ec. 2.2}$$

La presión diferencial medida a través del tubo Pitot puede calcularse utilizando la ecuación de Bernoulli, y resulta ser proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido, por tanto, resolviendo la ecuación de Bernoulli anterior obtenemos la velocidad del flujo.

$$V = \sqrt{\frac{2(pt - ps)}{\rho}} \quad \text{Ec. 2.3.}$$

A continuación, se muestra un esquema del Tubo de Pitot.



*Figura 38: Esquema Tubo de Pitot.*

## CAPÍTULO 4

### 4 ENSAYOS DE LABORATORIO

#### 4.1 RESALTO HIDRÁULICO.

El salto hidráulico, conocido también como una onda hidráulica, es un fenómeno de la ciencia que se observa en canales abiertos (naturales o artificiales). Cuando un fluido a altas velocidades descarga a zonas de menores velocidades, se presenta una ascensión abrupta en la superficie del fluido. Este fluido es frenado bruscamente e incrementa la altura de su nivel, convirtiendo parte de la energía cinética inicial del flujo en energía potencial y sufriendo una inevitable pérdida de energía en forma de calor. En un canal abierto, este fenómeno se manifiesta como el fluido con altas velocidades rápidamente frenando y elevándose sobre sí mismo, de manera similar a como se forma una onda-choque.

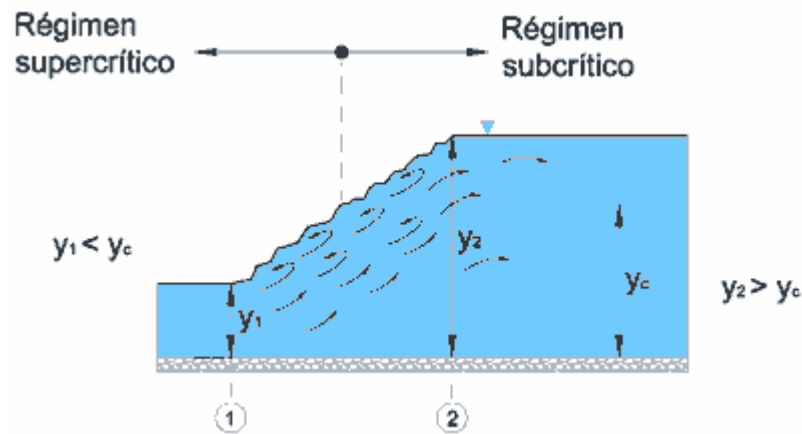


Figura 39: Resalto hidráulico.

El resalto hidráulico se genera cuando una corriente supercrítica cambia súbitamente a subcrítica. Este cambio de régimen se produce de manera brusca mediante un frente de onda de gran agitación.

Es por ello, que no se puede emplear la ecuación de la Energía para calcular los calados conjugados, por tanto, se utiliza la ecuación de la Cantidad de Movimiento.

Teniendo en cuenta la distribución de presiones en cualquier punto del fluido se puede considerar que esta presión es hidrostática debido a las características que presenta el flujo, siendo así la Ecuación de Cantidad de Movimiento.

Considerando que el caudal y el ancho son constantes, también lo es el caudal específico

$$q = u_1 y_1 = u_2 y_2 \quad \text{Ec. 4.1}$$

Por tanto, la ecuación de Cantidad de Movimiento queda,

$$P(y) = Pa + \rho g(y - z) \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$\rho u_1^2 y_1 - \rho u_2^2 y_2 = \rho \frac{g}{2} (y_2^2 - y_1^2) \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$\text{Sustituyendo el caudal específico} \rightarrow q(u_1 - u_2) = \frac{g}{2} (y_2^2 - y_1^2)$$

$$\frac{2q^2}{g} \left( \frac{1}{y_1} - \frac{1}{y_2} \right) = y_2^2 - y_1^2 \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$\frac{2q^2}{g} = y_1 y_2 (y_2 + y_1) \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$\frac{2q^2}{g} = y_1^2 y_2 + y_2^2 y_1 \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$\left( \frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \left( \frac{y_2}{y_1} \right) - \frac{2q^2}{g y_1^3} = 0 \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$\text{Resolviendo la ecuación anterior} \rightarrow \frac{y_2}{y_1} = \frac{\sqrt{1 + \frac{8q^2}{g y_1^3}} - 1}{2} \quad \text{Ec. 4.8}$$

Por tanto, la ecuación obtenida será para el régimen supercrítico.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1}{2}, \text{ siendo } F_1 \text{ el número de Froude} = \frac{u_1}{\sqrt{g y_1}} = \frac{q}{\sqrt{g y_1^3}} \quad \text{Ec. 4.9}$$

De forma similar, la ecuación expresada en función del número de Froude aguas abajo, es decir, régimen subcrítico queda,

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right) \quad \text{Ec. 4.10}$$

A continuación, se muestra la relación entre los números de Froude aguas arriba y aguas abajo, teniendo en cuenta la definición del número de Froude y la ecuación de continuidad.

$$F_2^2 = \frac{8F_1^2}{\left( \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)^3} \quad F_1^2 = \frac{8F_2^2}{\left( \sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right)^3} \quad \text{Ec. 4.11}$$

En función del número de Froude que se obtenga se encuentran varios tipos de resaltos:

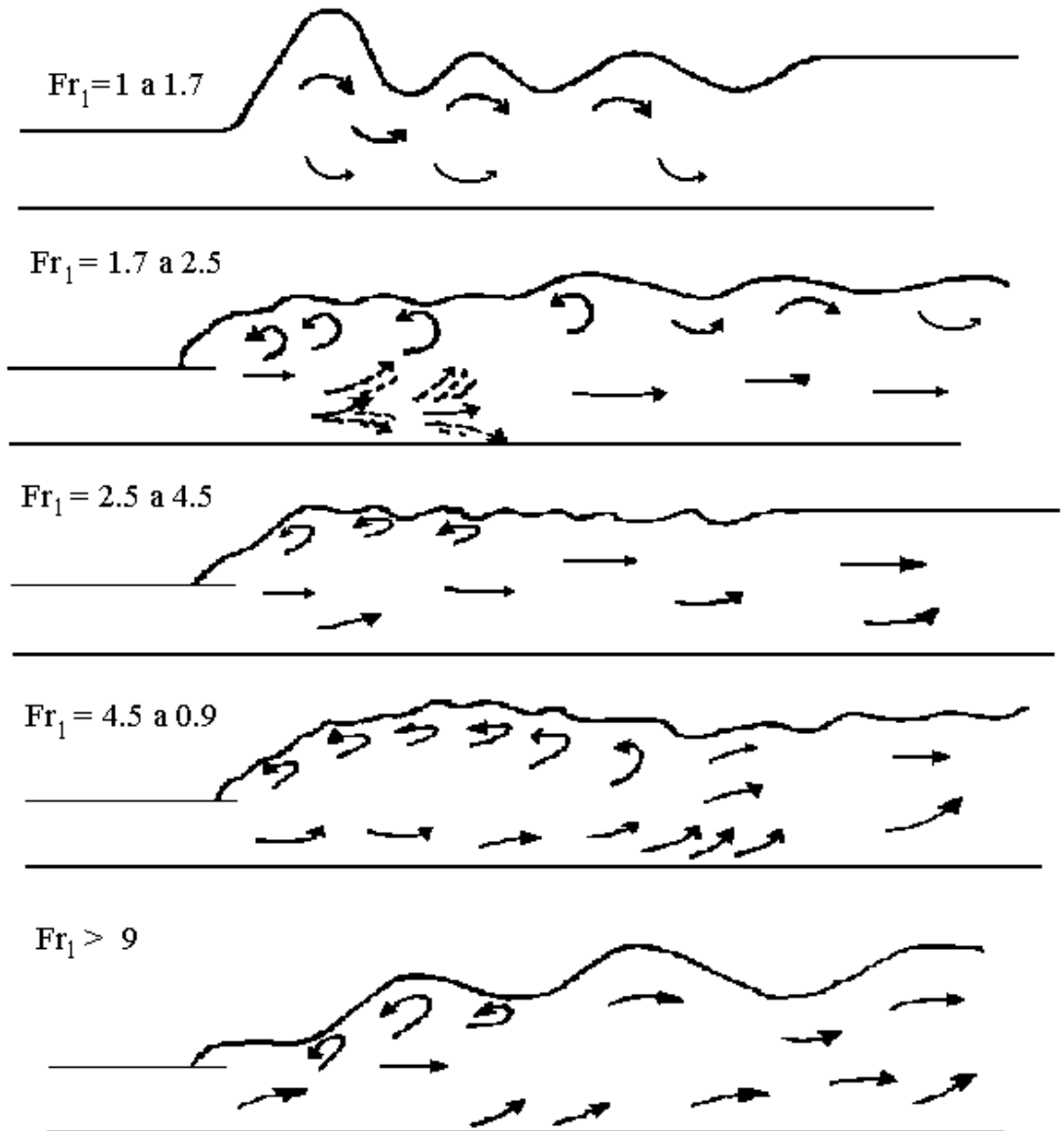


Figura 40: Tipos de Resalto Hidráulico.

#### 4.1.1 TIPOS DE RESALTO HIDRÁULICO.

Cuando el número de Froude es menor o igual a uno la ola provocada por el tipo de resalto hidráulico no se forma.

A continuación, se caracterizan los tipos de resaltos para los diferentes valores mostrados en la figura anterior.

- $1 < Fr_1 < 1.7 \rightarrow$  Resalto Ondulado
- $1.7 < Fr_1 < 2.5 \rightarrow$  Débil
- $2.5 < Fr_1 < 4.5 \rightarrow$  Oscilante
- $4.5 < Fr_1 < 9 \rightarrow$  Estable
- $Fr_1 > 9 \rightarrow$  Fuerte

Existe una pérdida de energía,  $\Delta H = E_1 - E_2$ , que es la diferencia entre la energía aguas arriba y la energía aguas abajo del resalto hidráulico para un flujo si la cota de la solera permanece constante e igual a cero siendo igual a la energía específica.

Teniendo en cuenta la definición de energía y ecuación de continuidad,

$$\left(\frac{1}{2}\rho u_1^2 + \rho g y_1\right) - \left(\frac{1}{2}\rho u_2^2 + \rho g y_2\right) > 0 \quad Ec. 4.12$$

$$E_1 - E_2 = \left(\frac{u_1^2}{2g} + y_1\right) - \left(\frac{u_2^2}{2g} + y_2\right) > 0 \quad Ec. 4.13$$

$$\frac{q^2}{2g} \left(\frac{1}{y_1^2} - \frac{1}{y_2^2}\right) + (y_1 - y_2) = \frac{y_1 y_2 (y_2 + y_1)}{4} \frac{(y_2^2 - y_1^2)}{y_2^2 y_1^2} + y_1 - y_2 \quad Ec. 4.14$$

$$\frac{(y_1 + y_2)(y_2^2 + y_1^2)}{4y_1 y_2} - (y_2 - y_1) = (y_2 - y_1) \left[ \frac{(y_1 + y_2)^2}{4y_1 y_2} - 1 \right] \quad Ec. 4.15$$

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 y_2} \geq 0 \rightarrow y_2 \geq y_1 \quad Ec. 4.16$$

Teniendo en cuenta el número de Froude, la pérdida de energía queda,

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1}{2} > 1 \rightarrow F_1 \geq 1 \quad Ec. 4.17$$

$$\frac{\Delta H}{y_1} = \frac{\left(\frac{y_2}{y_1} - 1\right)^3}{4\left(\frac{y_2}{y_1}\right)} = \frac{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 3\right)^3}{16\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1\right)} \quad Ec. 4.18$$

A continuación, se muestra la gráfica de variación de  $\Delta H/y_1$  en función del número de Froude, calculado en la ecuación anterior.

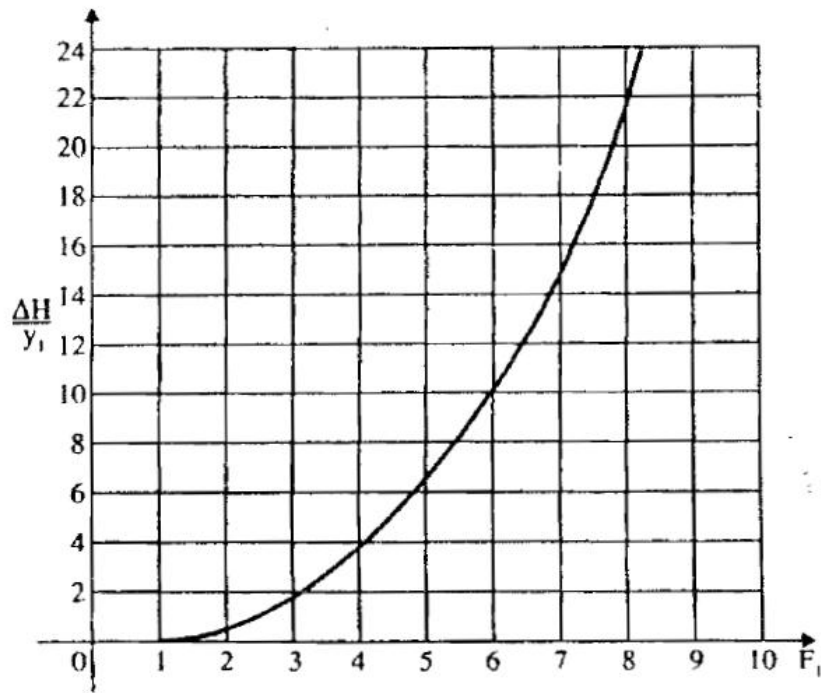


Figura 41: Variación de  $\Delta H/y_1$  en función del número de Froude.

#### 4.1.2 DESAGÜE A TRAVÉS DE COMPUERTAS.

Estas compuertas son utilizadas para el control del caudal a la entrada de un canal de riego o un río desde un canal. Provocan el régimen supercrítico en el flujo.

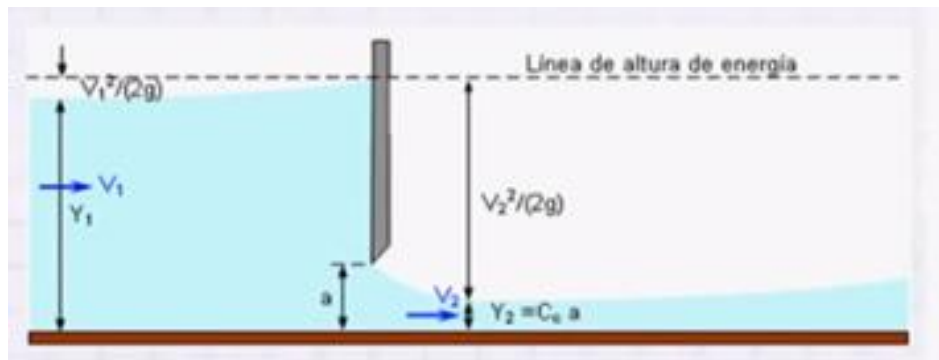


Figura 42: Compuerta en un canal.

- Ecuación de la energía entre la sección 1 y 2 lejos de la compuerta, mostrada en la figura anterior.

$$q = u_1 y_1 = u_2 y_2 \quad \text{Ec. 4.19}$$

$$y_1 + \frac{u_1^2}{2g} = y_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad \text{Ec. 4.20}$$

$$y_1 + \frac{u_2^2 y_2^2}{2g y_1^2} = y_2 + \frac{u_2^2}{2g} \quad \text{Ec. 4.21}$$

$$\frac{u_2^2}{2g} \left( 1 - \frac{y_2^2}{y_1^2} \right) = y_1 - y_2 \quad Ec. 4.22$$

$$u_2 = \frac{\sqrt{2gy_1}}{\sqrt{1 + \frac{y_2}{y_1}}} \quad Ec. 4.23$$

$$\text{Considerando } y_2 = C_c Y_g \rightarrow u_1 = \frac{\sqrt{2gy_1}}{\sqrt{1 + C_c \frac{y_g}{y_1}}} \quad Ec. 4.24$$

$C_c$  es el coeficiente de contracción del flujo.

$$q = \frac{C_v y_1}{\sqrt{1 + C_c \frac{y_g}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} \quad Ec. 4.25$$

$$\frac{y_g}{y_1} < 0.4 \quad Ec. 4.26$$

$$\text{Coeficiente de descarga} = C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + C_c \frac{y_g}{y_1}}}, \text{ siendo } C_c = 0.6 \quad Ec. 4.27$$

Siendo  $C_v$  un coeficiente de velocidad del fluido que depende del número de Reynolds, aproximándose

$$C_v = 0.960 + \frac{0.0979y_g}{y_1} \quad Ec. 4.28$$

#### 4.1.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES.



*Figura 43: Ensayo compuerta laboratorio C.C.T. de Linares.*

Todos los ensayos se hicieron con una altura en reposo de 208 mm.

→ **Primer ensayo** para una altura de compuerta de  $y_g = 61$  mm y una frecuencia de 33 Hz

| $y_0$ [mm] | $y_1$ [mm] | $y_2$ [mm] |
|------------|------------|------------|
| 244        | 44         | 155        |

*Tabla 1:  $y_g = 61$  mm y una frecuencia de 33 Hz*

| Pitot entrada |        | Velocidad | Pitot salida |        | Velocidad |
|---------------|--------|-----------|--------------|--------|-----------|
| $h_1$         | $h_2$  |           | $h_1$        | $h_2$  |           |
| 438 mm        | 240 mm | 1.971 m/s | 724 mm       | 747 mm | 0.672 m/s |

*Tabla 2:  $y_g = 61$  mm y una frecuencia de 33 Hz*

$$v = \sqrt{2g \left( \frac{h_1 - h_2}{1000} \right)}$$

Ahora, se calcula el valor del número de Froude en aguas arriba y en aguas abajo.

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{1.971}{\sqrt{9.81 * 0.044}} = 3.0$$

$$Fr_1 = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{y_2}{y_1} \right) \left( \frac{y_2}{y_1} + 1 \right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{0.155}{0.044} \right) \left( \frac{0.155}{0.044} + 1 \right)} = 2.822$$

Corresponde a un resalto oscilante, debido a que el número de Froude se encuentra entre los valores 2.5 – 4.5.

$$Fr_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gy_2}} = \frac{0.672}{\sqrt{9.81 * 0.155}} = 0.545$$

$$Fr_2 = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{y_1}{y_2} \right) \left( \frac{y_1}{y_2} + 1 \right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{0.044}{0.155} \right) \left( \frac{0.044}{0.155} + 1 \right)} = 0.423$$

| Primer ensayo | h [m] | Pitot [m] | Velocidad [m/s] | Fr por v | Fr por cal | Error |
|---------------|-------|-----------|-----------------|----------|------------|-------|
| Y1            | 0.044 | 0.198     | 1.971           | 3        | 2.822      | 5.93% |
| Y2            | 0.155 | 0.023     | 0.672           | 0.545    | 0.423      | 22.4% |

Tabla 3:  $y_g = 61 \text{ mm}$  y una frecuencia de 33 Hz

A continuación, se halla el valor del coeficiente de descarga,

$$C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + C_c \frac{y_g}{y_0}}} = \frac{0.6 * 0.984}{\sqrt{1 + 0.6 \frac{0.061}{0.244}}} = 0.551$$

Calculando los valores de contracción y velocidad,

$$C_v = 0.960 + \frac{0.0979 y_g}{y_0} = 0.960 + \frac{0.0979 * 0.061}{0.244} = 0.984$$

Con los valores anteriores se obtiene el valor del caudal específico,

$$q = C_d y_g \sqrt{2gy_0} = 0.551 * 0.061 * \sqrt{2 * 9.81 * 0.244} = 0.074 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$L = \frac{y_g}{C_c} = \frac{0.061}{0.6} = 0.102 \text{ m}$$

Los coeficientes de este ensayo junto con el caudal específico se muestran en la siguiente tabla,

| $C_c$ | $C_v$ | $C_d$ | $L$ [m] | $q$ [m <sup>2</sup> /s] |
|-------|-------|-------|---------|-------------------------|
| 0.6   | 0.984 | 0.551 | 0.102   | 0.074                   |

Ahora, se hallan los valores de energía

$$E = y + \frac{v^2}{2g}$$

$$E_1 = 0.044 + \frac{1.971^2}{2 * 9.81} = 0.252$$

$$E_2 = 0.155 + \frac{0.672^2}{2 * 9.81} = 0.178$$

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 0.252 - 0.178 = 0.074$$

$$\frac{\Delta E}{y_1} = \frac{0.074}{0.044} = 1.682$$

$$\frac{\Delta H}{y_1} = \frac{\left(\frac{0.155}{0.044} - 1\right)^3}{4 \left(\frac{0.155}{0.044}\right)} = 1.139$$

→ **Segundo ensayo** para una altura de compuerta de  $y_g = 73$  mm y una frecuencia de 37 Hz

| $y_0$ [mm] | $y_1$ [mm] | $y_2$ [mm] |
|------------|------------|------------|
| 238        | 53         | 165        |

Tabla 4:  $y_g = 73$  mm y una frecuencia de 37 Hz

| Pitot entrada |        | Velocidad | Pitot salida |        | Velocidad |
|---------------|--------|-----------|--------------|--------|-----------|
| $h_1$         | $h_2$  | 1.905 m/s | $h_1$        | $h_2$  | 0.700 m/s |
| 430 mm        | 245 mm |           | 730 mm       | 755 mm |           |

Tabla 5:  $y_g = 73$  mm y una frecuencia de 37 Hz

$$v = \sqrt{2g \left( \frac{h_1 - h_2}{1000} \right)}$$

Ahora, se calcula el valor del número de Froude en aguas arriba y en aguas abajo.

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{1.905}{\sqrt{9.81 * 0.053}} = 2.642$$

$$Fr_1 = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{y_2}{y_1} \right) \left( \frac{y_2}{y_1} + 1 \right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{0.165}{0.053} \right) \left( \frac{0.165}{0.053} + 1 \right)} = 2.53$$

Corresponde a un *resalto oscilante*, debido a que el número de Froude se encuentra entre los valores 2.5 – 4.5.

$$Fr_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gy_2}} = \frac{0.700}{\sqrt{9.81 * 0.165}} = 0.550$$

$$Fr_2 = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{y_1}{y_2} \right) \left( \frac{y_1}{y_2} + 1 \right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{0.053}{0.165} \right) \left( \frac{0.053}{0.165} + 1 \right)} = 0.461$$

| Segundo ensayo | h [m] | Pitot [m] | Velocidad [m/s] | Fr por v | Fr por cal | error  |
|----------------|-------|-----------|-----------------|----------|------------|--------|
| Y1             | 0.053 | 0.185     | 1.905           | 2.642    | 2.53       | 4.24%  |
| Y2             | 0.165 | 0.025     | 0.700           | 0.550    | 0.461      | 16.18% |

Tabla 6:  $y_g = 73 \text{ mm}$  y una frecuencia de 37 Hz

A continuación, se halla el valor del coeficiente de descarga,

$$C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + C_c \frac{y_g}{y_0}}} = \frac{0.6 * 0.990}{\sqrt{1 + 0.6 \frac{0.073}{0.238}}} = 0.546$$

Calculando los valores de contracción y velocidad,

$$C_v = 0.960 + \frac{0.0979 y_g}{y_0} = 0.960 + \frac{0.0979 * 0.073}{0.238} = 0.990$$

Con los valores anteriores se obtiene el valor del caudal específico,

$$q = C_d y_g \sqrt{2gy_0} = 0.546 * 0.073 * \sqrt{2 * 9.81 * 0.238} = 0.086 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$L = \frac{y_g}{C_c} = \frac{0.073}{0.6} = 0.122 \text{ m}$$

Los coeficientes de este ensayo junto con el caudal específico se muestran en la siguiente tabla,

| $C_c$ | $C_v$ | $C_d$ | L [m] | q [m <sup>2</sup> /s] |
|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| 0.6   | 0.990 | 0.546 | 0.122 | 0.086                 |

Ahora, se hallan los valores de energía

$$E = y + \frac{v^2}{2g}$$

$$E_1 = 0.053 + \frac{1.905^2}{2 * 9.81} = 0.238$$

$$E_2 = 0.165 + \frac{0.700^2}{2 * 9.81} = 0.189$$

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 0.238 - 0.189 = 0.049$$

$$\frac{\Delta E}{y_1} = \frac{0.049}{0.053} = 0.925$$

$$\frac{\Delta H}{y_1} = \frac{\left(\frac{0.165}{0.053} - 1\right)^3}{4 \left(\frac{0.165}{0.053}\right)} = 0.758$$

→ **Tercer ensayo** para una altura de compuerta de  $y_g = 97$  mm y una frecuencia de 45 Hz

| $y_0$ [mm] | $y_1$ [mm] | $y_2$ [mm] |
|------------|------------|------------|
| 229        | 69         | 170        |

Tabla 7: de  $y_g = 97$  mm y una frecuencia de 45 Hz

| Pitot entrada |        | Velocidad | Pitot salida |        | Velocidad |
|---------------|--------|-----------|--------------|--------|-----------|
| $h_1$         | $h_2$  | 1.853 m/s | $h_1$        | $h_2$  | 0.642 m/s |
| 425 mm        | 250 mm |           | 736 mm       | 757 mm |           |

Tabla 8: de  $y_g = 97$  mm y una frecuencia de 45 Hz

$$v = \sqrt{2g \left( \frac{h_1 - h_2}{1000} \right)}$$

Ahora, se calcula el valor del número de Froude en aguas arriba y en aguas abajo.

$$Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_1}} = \frac{1.853}{\sqrt{9.81 * 0.069}} = 2.25$$

$$Fr_1 = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{y_2}{y_1} \right) \left( \frac{y_2}{y_1} + 1 \right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{0.170}{0.069} \right) \left( \frac{0.170}{0.069} + 1 \right)} = 2.066$$

Corresponde a un resalto débil, debido a que el número de Froude se encuentra entre los valores 1.7 – 2.5.

$$Fr_2 = \frac{v_2}{\sqrt{gy_2}} = \frac{0.642}{\sqrt{9.81 * 0.170}} = 0.497$$

$$Fr_2 = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{y_1}{y_2} \right) \left( \frac{y_1}{y_2} + 1 \right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{0.069}{0.170} \right) \left( \frac{0.069}{0.170} + 1 \right)} = 0.534$$

| Tercer ensayo | h     | Pitot | velocidad | Fr veloci | Fr calado | error |
|---------------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|
| Y1            | 0.069 | 0.175 | 1.853     | 2.25      | 2.066     | 8.18% |
| Y2            | 0.170 | 0.021 | 0.642     | 0.497     | 0.534     | 6.93% |

Tabla 9: de  $y_g = 97$  mm y una frecuencia de 45 Hz

A continuación, se halla el valor del coeficiente de descarga,

$$C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + C_c \frac{y_g}{y_0}}} = \frac{0.6 * 1.00}{\sqrt{1 + 0.6 \frac{0.097}{0.229}}} = 0.536$$

Calculando los valores de contracción y velocidad,

$$C_v = 0.960 + \frac{0.0979 y_g}{y_0} = 0.960 + \frac{0.0979 * 0.097}{0.229} = 1.00$$

Con los valores anteriores se obtiene el valor del caudal específico,

$$q = C_d y_g \sqrt{2gy_0} = 0.536 * 0.097 * \sqrt{2 * 9.81 * 0.229} = 0.110 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$L = \frac{y_g}{C_c} = \frac{0.097}{0.6} = 0.162 \text{ m}$$

Los coeficientes de este ensayo junto con el caudal específico se muestran en la siguiente tabla,

| $C_c$ | $C_v$ | $C_d$ | L [m] | q [m <sup>2</sup> /s] |
|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| 0.6   | 1.00  | 0.536 | 0.162 | 0.110                 |

Ahora, se hallan los valores de energía

$$E = y + \frac{v^2}{2g}$$

$$E_1 = 0.069 + \frac{1.853^2}{2 * 9.81} = 0.244$$

$$E_2 = 0.170 + \frac{0.642^2}{2 * 9.81} = 0.191$$

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 0.244 - 0.191 = 0.053$$

$$\frac{\Delta E}{y_1} = \frac{0.053}{0.069} = 0.768$$

$$\frac{\Delta H}{y_1} = \frac{\left(\frac{0.170}{0.069} - 1\right)^3}{4 \left(\frac{0.170}{0.069}\right)} = 0.318$$

- **Tabla resumen de resultados.**

| Ensayos          | Fr por v | Fr por calado | $\frac{\Delta E}{y_1}$ | $\frac{\Delta H}{y_1}$ |
|------------------|----------|---------------|------------------------|------------------------|
| <b>Resalto 1</b> | 3        | 2.822         | 1.682                  | 1.139                  |
| <b>Resalto 2</b> | 2.642    | 2.53          | 0.925                  | 0.758                  |
| <b>Resalto 3</b> | 2.25     | 2.066         | 0.768                  | 0.318                  |

Tabla 10: Resumen resultados.

A continuación, se dibuja la gráfica de pérdidas de disipación frente al número de Froude.

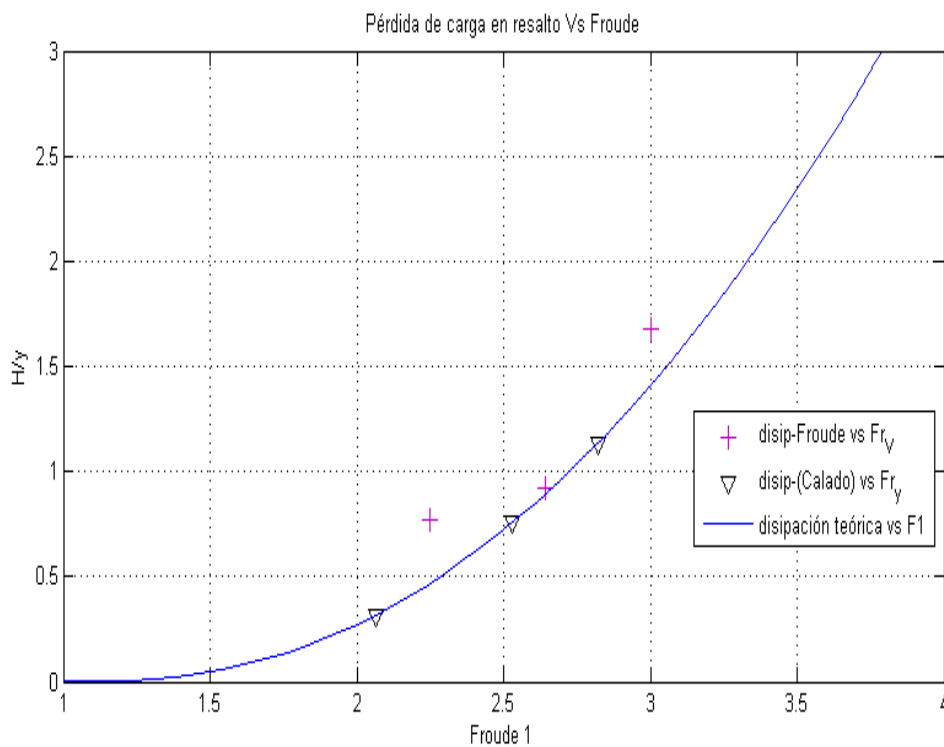


Figura 44: Disipación energía en resalto hidráulico

Como se puede observar, la tendencia que muestra esta gráfica es muy parecida a la gráfica de la figura 40. Variación de  $\Delta h/y_1$  en función del número de Froude. También se observa que las medidas obtenidas en la tabla de resumen de resultados se ajustan a la curva teórica.

## 4.2 ESTRECHAMIENTO (EFECTO VENTURI).

El Efecto Venturi consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor. En ciertas condiciones, cuando el aumento de velocidad es muy grande, se llegan a producir presiones negativas y entonces, si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido de este conducto, que se mezclará con el que circula por el primer conducto.



*Figura 45: Efecto Venturi.*

Un tubo de Venturi es un dispositivo inicialmente diseñado para medir la velocidad de un fluido aprovechando el efecto Venturi. Efectivamente, conociendo la velocidad antes del estrechamiento y midiendo la diferencia de presiones, se halla fácilmente la velocidad en el punto problema.

La aplicación clásica de medida de velocidad de un fluido consiste en un tubo formado por dos secciones cónicas unidas por un tubo estrecho en el que el fluido se desplaza consecuentemente a mayor velocidad. La presión en el tubo Venturi puede medirse por un tubo vertical en forma de U conectando la región ancha y la canalización estrecha. La diferencia de alturas del líquido en el tubo en U permite medir la presión en ambos puntos y consecuentemente la velocidad.

En otros casos utiliza este efecto para acelerar la velocidad de un fluido obligándole a atravesar un tubo estrecho con el extremo en forma de cono. Estos modelos se utilizan en numerosos dispositivos en los que la velocidad de un fluido es importante y constituyen la base de aparatos como el carburador

Cuando se utiliza un tubo de Venturi hay que tener en cuenta un fenómeno que se denomina Cavitación. Este fenómeno ocurre si la presión en alguna sección del tubo es menor que la presión de vapor del fluido. Para este tipo particular de tubo, el riesgo de cavitación se encuentra en la garganta del mismo, ya que aquí, al ser mínima el área y máxima la velocidad, la presión es la menor que se puede encontrar en el tubo.

Cuando ocurre la cavitación, se generan burbujas localmente, que se trasladan a lo largo del tubo. Si estas burbujas llegan a zonas de presión más elevada, pueden colapsar produciendo así picos de presión local con el riesgo potencial de dañar la pared del tubo.

#### 4.2.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este ensayo se colocan dos obstáculos grandes en las paredes de forma vertical en el canal, lo que simula un estrechamiento, es decir, el Efecto Venturi. Para este ensayo, la altura del canal no varía y la energía específica se mantiene constante. El flujo que pasa por el canal va de régimen subcrítico a supercrítico, volviendo después a subcrítico.



*Figura 46: Ensayo Efecto Venturi en el laboratorio.*

La altura de agua en reposo en el canal es de 175 mm y el inicio del obstáculo está a 797 mm.

Para una frecuencia de 35 Hz estos han sido los datos obtenidos, altura de varilla y calado.

| frecuencia = 35 Hz |                   |                |
|--------------------|-------------------|----------------|
| Distancia<br>[mm]  | H varilla<br>[mm] | Calado<br>[mm] |
| 0                  | 100               | 200            |
| 40                 | 101               | 199            |
| 80                 | 103               | 197            |
| 120                | 105               | 195            |
| 160                | 112               | 188            |
| 200                | 120               | 180            |
| 240                | 126               | 174            |
| 280                | 135               | 165            |
| 320                | 144               | 156            |
| 360                | 156               | 144            |
| 400                | 167               | 133            |
| 440                | 181               | 119            |
| 480                | 192               | 108            |
| 520                | 204               | 96             |
| 560                | 214               | 86             |
| 640                | 233               | 67             |
| 680                | 238               | 62             |
| 720                | 243               | 57             |

Tabla 11: Estrechamiento con altura de agua en reposo de 175 mm y 35 Hz.

El calado se ha calculado respecto a la fórmula CALADO (h), mostrada en la siguiente figura,

$$h = A - (D + L) = 800 - (H_{varilla} + 500) = 300 - H_{varilla}$$

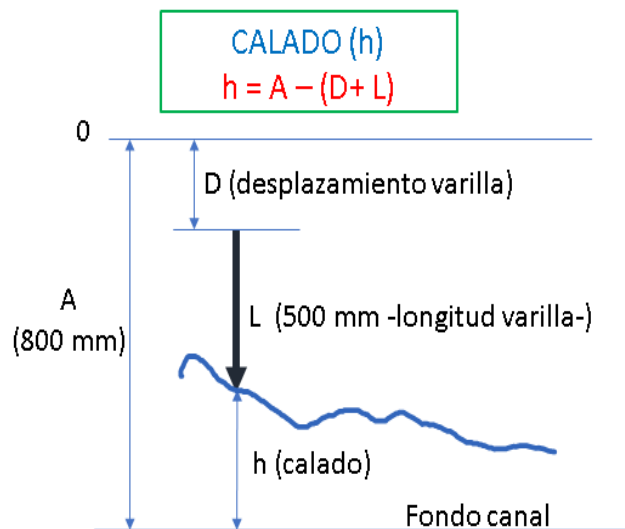


Figura 47: Expresión para el Calado

A continuación, se ha calculado la Velocidad, Energía Específica y Froude a partir de los datos de la tabla anterior, siendo

$$v = \frac{Q}{yb}$$

$$Energía = y + \frac{Q^2}{2gb^2y^2}$$

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gy}}$$

Calculando el caudal como

$$Q = \sqrt{2g\Delta h} b y$$

| Qsub<br>[m <sup>3</sup> /s] | Qestr<br>[m <sup>3</sup> /s] | Qmedio<br>[m <sup>3</sup> /s] |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 0,052                       | 0,018                        | 0.035                         |

Tabla 12: Estrechamiento (Caudales)

| Distancia<br>[mm] | H varilla<br>[mm] | Calado<br>[mm] | E.<br>específica<br>[m] | Velocidad<br>[m/] | Froude |
|-------------------|-------------------|----------------|-------------------------|-------------------|--------|
| 0                 | 100               | 200            | 0,210                   | 0,437             | 0,312  |
| 40                | 101               | 199            | 0,209                   | 0,439             | 0,314  |
| 80                | 103               | 197            | 0,207                   | 0,444             | 0,319  |
| 120               | 105               | 195            | 0,205                   | 0,448             | 0,324  |
| 160               | 112               | 188            | 0,199                   | 0,465             | 0,342  |
| 200               | 120               | 180            | 0,192                   | 0,486             | 0,365  |
| 240               | 126               | 174            | 0,187                   | 0,502             | 0,385  |
| 280               | 135               | 165            | 0,179                   | 0,530             | 0,416  |
| 320               | 144               | 156            | 0,172                   | 0,560             | 0,453  |
| 360               | 156               | 144            | 0,163                   | 0,607             | 0,511  |
| 400               | 167               | 133            | 0,155                   | 0,657             | 0,575  |
| 440               | 181               | 119            | 0,147                   | 0,735             | 0,680  |
| 480               | 192               | 108            | 0,141                   | 0,809             | 0,786  |
| 520               | 204               | 96             | 0,138                   | 0,911             | 0,938  |
| 560               | 214               | 86             | 0,139                   | 1,017             | 1,107  |
| 640               | 233               | 67             | 0,154                   | 1,305             | 1,609  |
| 680               | 238               | 62             | 0,163                   | 1,410             | 1,808  |
| 720               | 243               | 57             | 0,177                   | 1,534             | 2,051  |

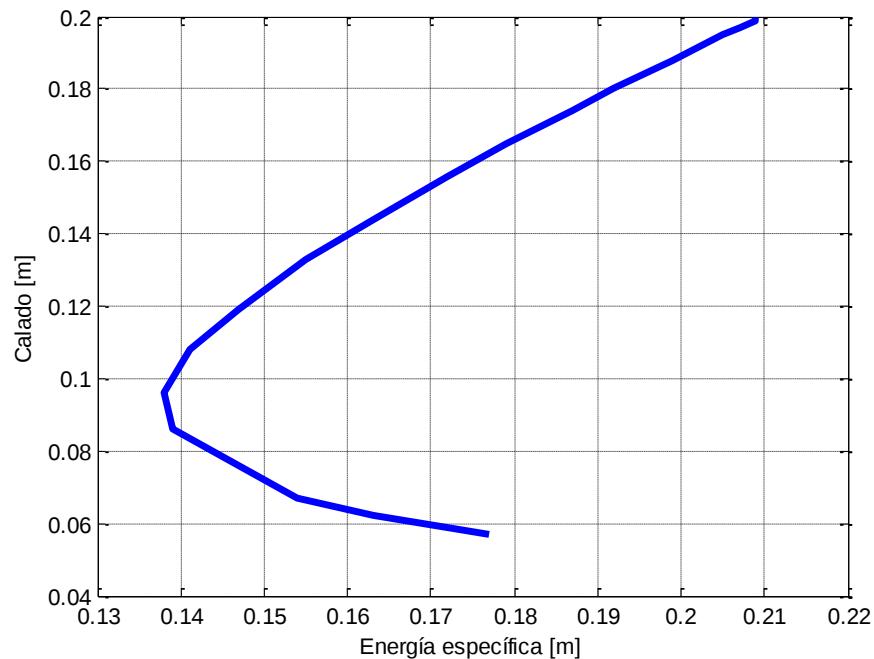
Tabla 13: Valores para el Estrechamiento (Venturi)

#### 4.2.1.1 Gráficas.

Una vez obtenidos los datos de velocidad, energía y número de Froude se procede a la obtención de las gráficas a partir de los datos mencionados.

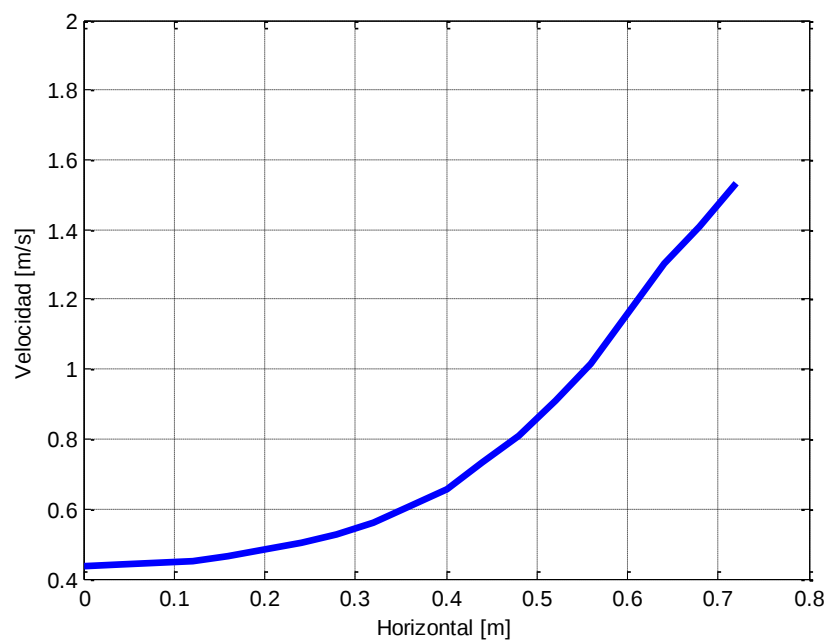
La primera gráfica es el Calado frente a la Energía Específica, en la que la Energía Específica se mantiene constante.

### CALADO FRENTE A ENERGÍA ESPECÍFICA



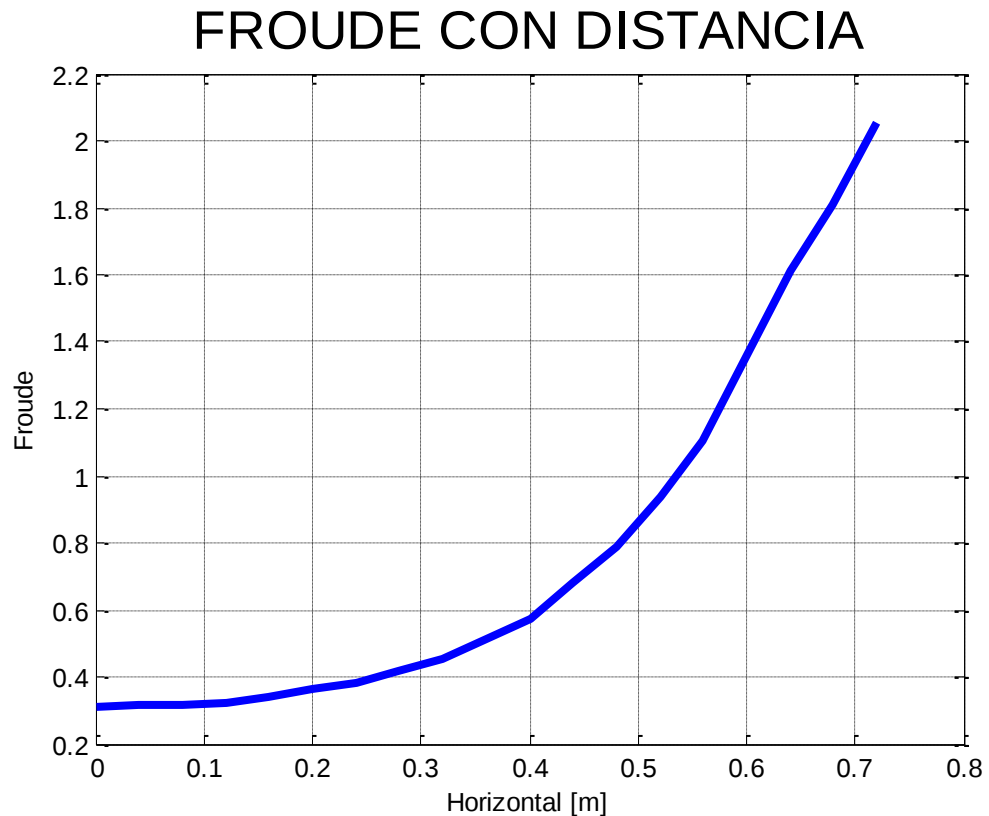
La siguiente gráfica es Velocidad respecto a la Distancia, la velocidad se ha calculado mediante el Tubo de Pitot en dos puntos, aguas arriba y abajo es decir en la parte subcrítica y en la parte del propio estrechamiento.

### VELOCIDAD DE FLUJO CON DISTANCIA



En la gráfica anterior se observa que el flujo circula de izquierda a derecha dando lugar a que en el inicio el flujo va algo frenado y que, en la gráfica, se muestra el paso por el estrechamiento, donde el flujo acelera. Una vez pasado este obstáculo el flujo vuelve a frenar de nuevo.

A continuación, se muestra la gráfica del Número de Froude respecto a la Distancia, donde se calcula el punto en el que el flujo pasa por el punto crítico, siendo  $F_r = 1$ .



#### 4.3 OBSTÁCULOS DE FONDO.

En este apartado se describe el proceso experimental que se ha realizado para el estudio del comportamiento del flujo ante variaciones en la cota de la solera del canal.

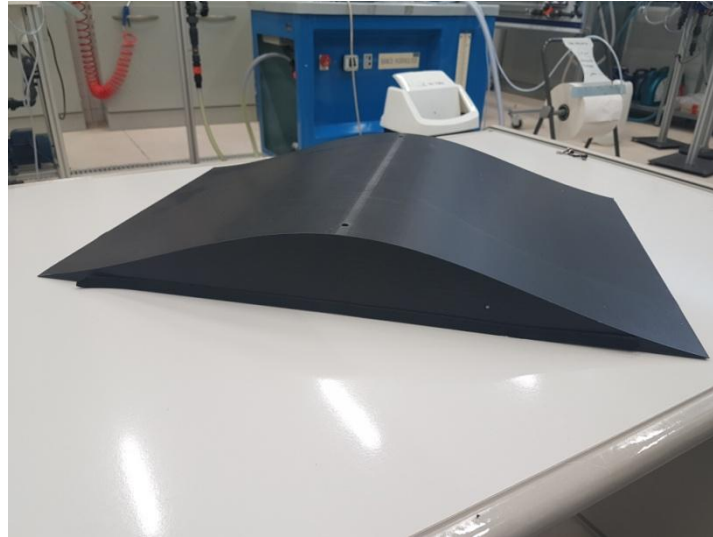
Se hará un estudio del flujo a lo largo del canal modificando la sección transversal de este, donde se utilizarán dos obstáculos.

Para ello, se dan tres situaciones:

- El régimen del agua aguas arriba es subcrítico y la altura máxima del obstáculo es menor que la altura crítica,  $h_c$ . En este caso, el calado disminuye sobre el obstáculo recuperando posteriormente su profundidad inicial.
- El régimen aguas arriba es supercrítico y la altura máxima del obstáculo es menor que la altura crítica,  $h_c$ . En este caso, el calado aumenta sobre el obstáculo recuperando posteriormente su profundidad inicial.

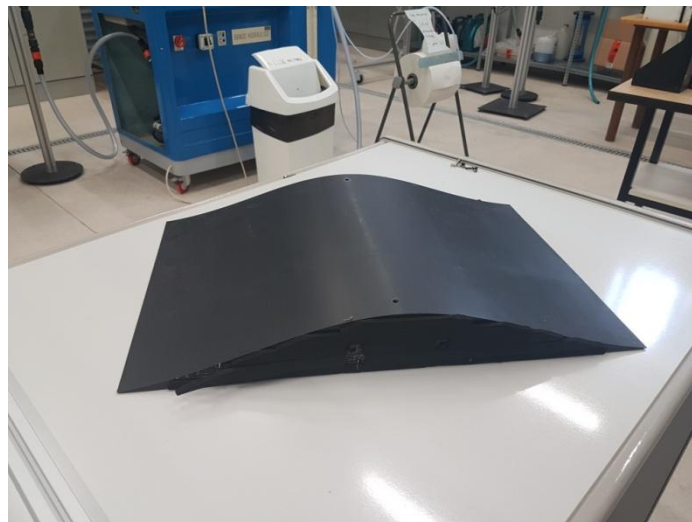
- El régimen del agua aguas arriba es subcrítico y la altura máxima del obstáculo es igual que la altura crítica  $h_c$ . en este caso el calado disminuye sobre el obstáculo hasta el punto de máxima cota donde se alcanzan las condiciones críticas y el régimen pasa a supercrítico. En consecuencia, el calado disminuye hasta completar el paso por el obstáculo.

La anchura del canal empleado sigue siendo de 0.4 m y las medidas de los obstáculos son



*Figura 48: Obstáculo pequeño*

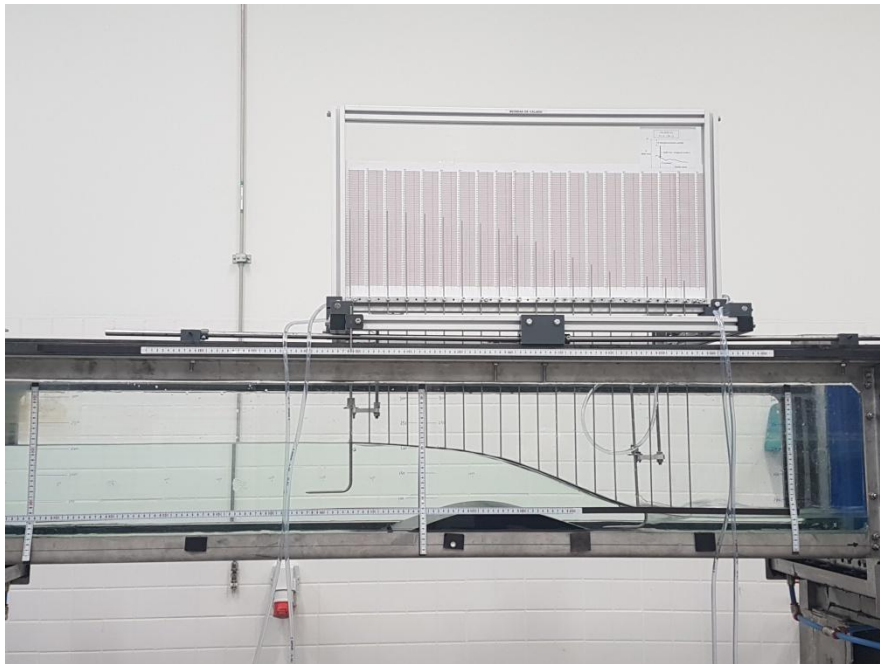
Anchura = 40 cm  
Longitud = 60 cm  
Altura máxima = 5 cm



*Figura 49: Obstáculo grande.*

Anchura = 40 cm  
Longitud = 60 cm  
Altura máxima = 7.5 cm

#### 4.3.1 TRANSICIÓN DE FLUJO SUBCRÍTICO A SUPERCRÍTICO. OBSTÁCULO GRANDE.



*Figura 50: Transición de flujo subcrítico a supercrítico.*

La altura de agua en reposo en el canal es de 175 mm y el inicio del obstáculo está a 750 mm.

Para una frecuencia de 35 Hz estos han sido los datos obtenidos, altura de varilla y calado.

Para la medición de la velocidad del flujo en el canal se ha utilizado el Tubo de Pitot, el cual recoge la presión de remanso y la presión estática del flujo. La diferencia de estas dos presiones es la presión dinámica del flujo.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = \sqrt{2g\Delta h}$$

Para una frecuencia de 35 Hz, en la siguiente tabla se recogen los datos obtenidos del Tubo de Pitot Aguas Arriba y abajo,

Aguas arriba

| Pitot $h_1$ entrada | Pitot $h_2$ salida | $\Delta h$ | Velocidad 1 |
|---------------------|--------------------|------------|-------------|
| 265                 | 278                | 0.013      | 0.505       |

*Tabla 14: Flujo Sub-Sup aguas arriba (35 Hz).*

Aguas abajo

| Pitot $h_1$ | Pitot $h_2$ | $\Delta h$ | Velocidad 2 |
|-------------|-------------|------------|-------------|
| 787         | 634         | 0.153      | 1.733       |

*Tabla 15: Flujo Sub-Sup aguas abajo (35 Hz).*

La medición de calados tanto aguas arriba, abajo como el calado crítico es

| $Y_1$ [mm] | $Y_2$ [mm] |
|------------|------------|
| 0.21       | 0.065      |

*Tabla 16: Calados aguas arriba y abajo en flujo Sub-Sup (35 Hz).*

A partir de estos valores se obtienen los caudales unitarios aguas arriba y abajo

$$q_1 = v_1 Y_0 = 0.505 \cdot 0.21 = 0.106 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$q_2 = v_2 Y_2 = 1.733 \cdot 0.065 = 0.133 \text{ m}^2/\text{s}$$

Como el caudal unitario,  $q$ , se mantiene constante a lo largo de todo el canal se obtiene la media entre los dos caudales obtenidos anteriormente.

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2} = 0.109 \text{ m}^3/\text{s}$$

Una vez obtenido la media del canal unitario se puede calcular el caudal normal

$$Q = qb = 0.044 \text{ m}^3/\text{s}$$

A continuación, se muestra la tabla donde se recogen los datos experimentales como la Horizontal que muestra la longitud entre varillas y la altura de varillas respecto a la superficie libre del flujo.

A partir de la horizontal y la altura de varilla se obtiene el calado como

$$800 - (h_{\text{varilla}} + 500)$$

La velocidad

$$V = \frac{q}{Y}$$

El número de Froude

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gY}}$$

Y la energía específica

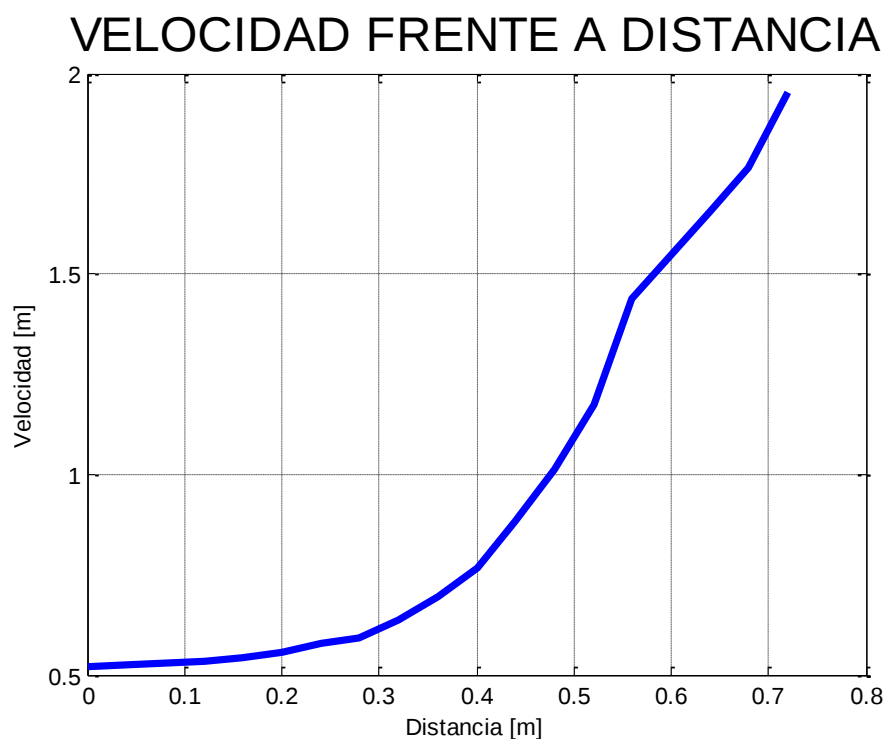
$$E = \frac{q^2}{2gY^2} + Y$$

| Distancia [mm] | h varilla [mm] | Calado [mm] | Velocidad [m/s] | Froude | Energía Esp. [m] |
|----------------|----------------|-------------|-----------------|--------|------------------|
| 0              | 90             | 210         | 0,521           | 0,363  | 0,224            |
| 40             | 92             | 208         | 0,526           | 0,368  | 0,222            |
| 80             | 94             | 206         | 0,531           | 0,373  | 0,220            |
| 120            | 95             | 205         | 0,533           | 0,376  | 0,219            |
| 160            | 98             | 202         | 0,541           | 0,385  | 0,217            |
| 200            | 104            | 196         | 0,558           | 0,402  | 0,212            |
| 240            | 111            | 189         | 0,579           | 0,425  | 0,206            |
| 280            | 116            | 184         | 0,594           | 0,442  | 0,202            |
| 320            | 128            | 172         | 0,636           | 0,489  | 0,193            |
| 360            | 143            | 157         | 0,696           | 0,561  | 0,182            |
| 400            | 157            | 143         | 0,765           | 0,646  | 0,173            |
| 440            | 176            | 124         | 0,882           | 0,799  | 0,164            |
| 480            | 192            | 108         | 1,012           | 0,984  | 0,160            |
| 520            | 207            | 93          | 1,176           | 1,231  | 0,163            |
| 560            | 224            | 76          | 1,439           | 1,666  | 0,181            |
| 640            | 234            | 66          | 1,657           | 2,059  | 0,206            |
| 680            | 238            | 62          | 1,764           | 2,261  | 0,221            |
| 720            | 244            | 56          | 1,952           | 2,634  | 0,250            |

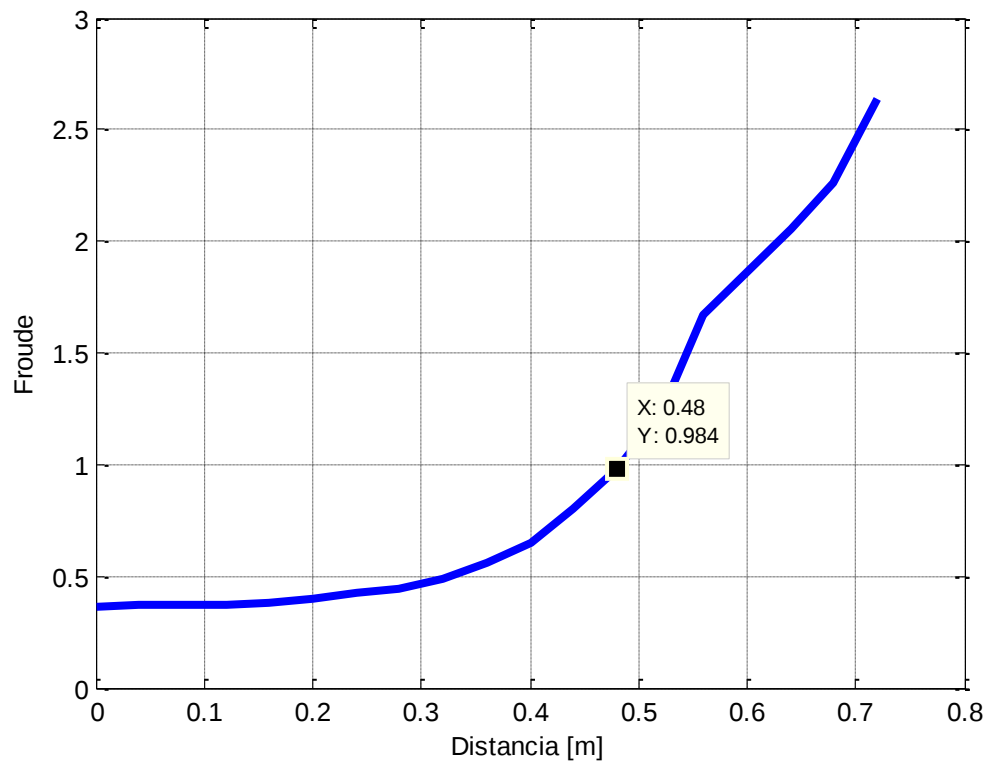
Tabla 17: Valores hallados en transición Sub-Sup (35 Hz).

#### 4.3.1.1 Gráficas.

A partir de los datos de la tabla anterior se obtienen las siguientes gráficas. La primera gráfica es Velocidad frente a Distancia, donde por continuidad, siendo el caudal constante, se obtienen las velocidades en cada punto y a partir de ellas el Número de Froude, que es la siguiente gráfica a la gráfica de velocidad.



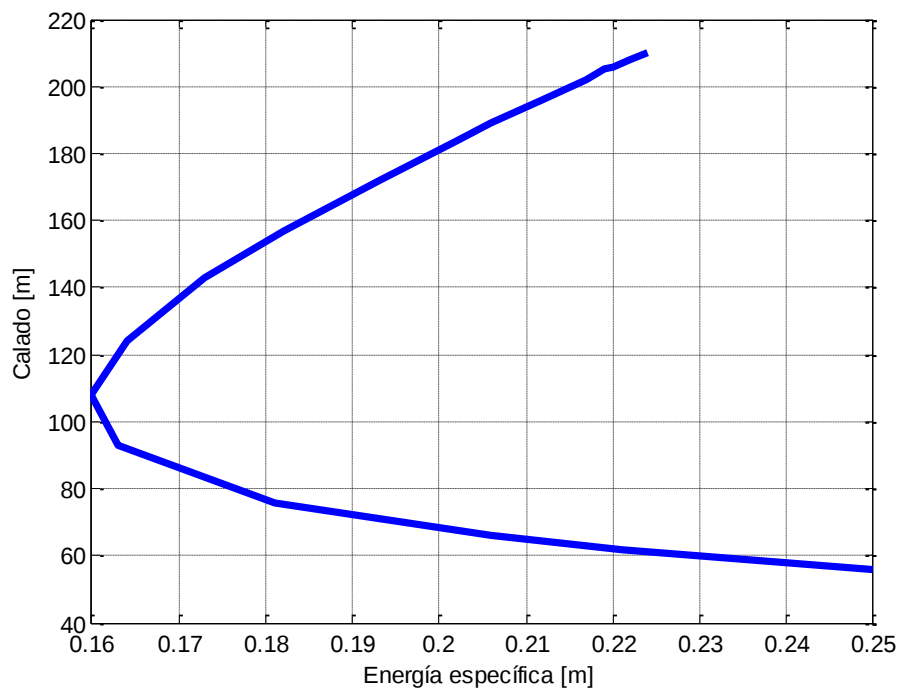
## Número de Froude frente a Distancia



En esta gráfica puede comprobarse que el número de Froude igual a la unidad coincide aproximadamente con la sección sobre la cresta del obstáculo.

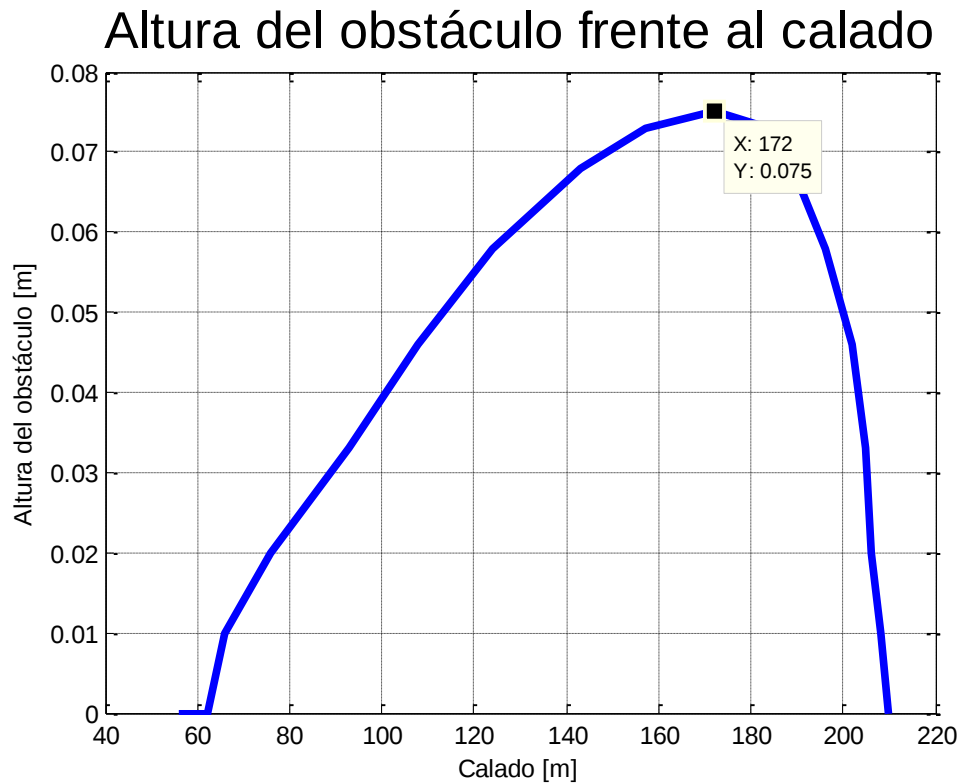
En la siguiente gráfica se representa el calado respecto a la Energía Específica.

## CALADO FRENTE A ENERGÍA ESPECÍFICA

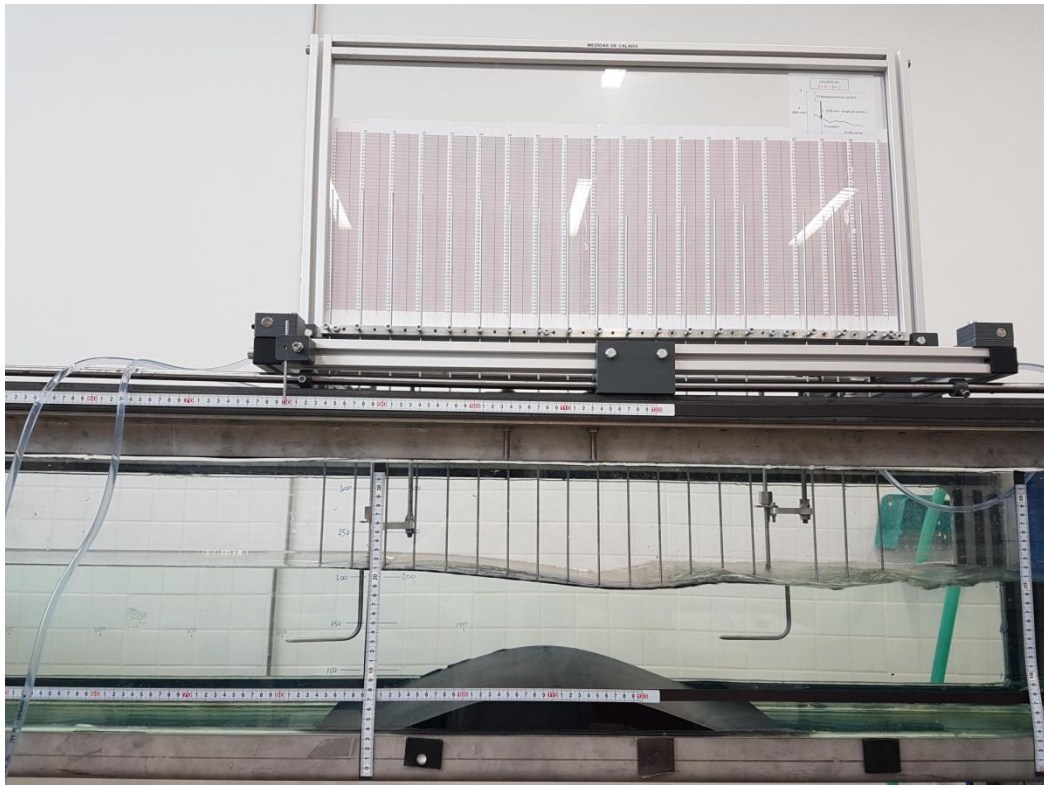


Por último, se obtiene la curva de altura del obstáculo respecto al calado, en la cual se comprueba que para el punto  $x=12$ ,  $y=0.075$  coincide la altura máxima del obstáculo con la altura crítica del flujo.

Si el flujo encontrase un obstáculo mayor a la altura crítica, el flujo no tendría energía suficiente para atravesarlo. En este caso, el fluido debería aumentar su energía inicial como su calado, así también el calado crítico se elevaría.



#### 4.3.2 TRANSICIÓN DE FLUJO SUBCRÍTICO A SUBCRÍTICO.



*Figura 51: Transición de flujo Subcrítico a Subcrítico.*

Para este ensayo se han utilizado dos obstáculos, el pequeño de 50 mm y el grande de 75 mm de altura.

La altura del flujo en reposo en el canal ha sido de 175 mm para ambos obstáculos y el obstáculo pequeño se ha colocado a 590 mm en la horizontal de la solera del canal y el grande a 750 mm.

El sistema de varillas sigue siendo de 18 varillas, como se muestra en la figura anterior.

La frecuencia a la que se ha hecho el ensayo con ambos obstáculos ha sido de 35 Hz.

➔ Primer ensayo, resalto pequeño de 50.

Para la medición de la velocidad del flujo en el canal se ha utilizado el Tubo de Pitot, el cual recoge la presión de remanso y la presión estática del flujo. La diferencia de estas dos presiones es la presión dinámica del flujo.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = \sqrt{2g\Delta h}$$

Para una frecuencia de 35 Hz, en la siguiente tabla se recogen los datos obtenidos del Tubo de Pitot Aguas Arriba y abajo,

| Pitot aguas arriba |          |       |                 |
|--------------------|----------|-------|-----------------|
| h1 Pitot           | h2 Pitot | Ah    | Velocidad [m/s] |
| 295                | 273      | 0,022 | 0,657           |

Tabla 18: Flujo Sub-Sub aguas arriba (resalto de 50 mm y 35 Hz).

| Pitot aguas abajo |          |       |                 |
|-------------------|----------|-------|-----------------|
| h1 Pitot          | h2 Pitot | Ah    | Velocidad [m/s] |
| 780               | 652      | 0,128 | 1,585           |

Tabla 19: Flujo Sub-Sub aguas abajo (resalto de 50 mm y 35 Hz).

La medición de calados tanto aguas arriba, abajo como el calado crítico es

| y0  | y2 |
|-----|----|
| 194 | 87 |

Tabla 20: Calados aguas arriba y abajo en flujo Sub-Sub (resalto de 50 mm y 35 Hz).

A partir de estos valores se obtienen los caudales unitarios aguas arriba y abajo

$$q_1 = v_1 Y_0$$

$$q_2 = v_2 Y_2$$

Como el caudal unitario, q, se mantiene constante a lo largo de todo el canal se obtiene la media entre los dos caudales obtenidos anteriormente.

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}$$

Una vez obtenido la media del canal unitario se puede calcular el caudal normal

$$Q = qb$$

| q1 [m <sup>2</sup> /s] | 0,127 |
|------------------------|-------|
|------------------------|-------|

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>q2 [m<sup>2</sup>/s]</b> | 0,057 |
| <b>q [m<sup>2</sup>/s]</b>  | 0,092 |
| <b>Q [m<sup>3</sup>/s]</b>  | 0,037 |

Tabla 21: Caudales en flujo Sub-Sub (resalto de 50 mm y 35 Hz).

A continuación, se muestra la tabla donde se recogen los datos experimentales como la Horizontal que muestra la longitud entre varillas y la altura de varillas respecto a la superficie libre del flujo.

A partir de la horizontal y la altura de varilla se obtiene el calado como

$$800 - (h_{\text{varilla}} + 500)$$

La velocidad

$$V = \frac{q}{Y}$$

El número de Froude

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gY}}$$

Y la energía específica

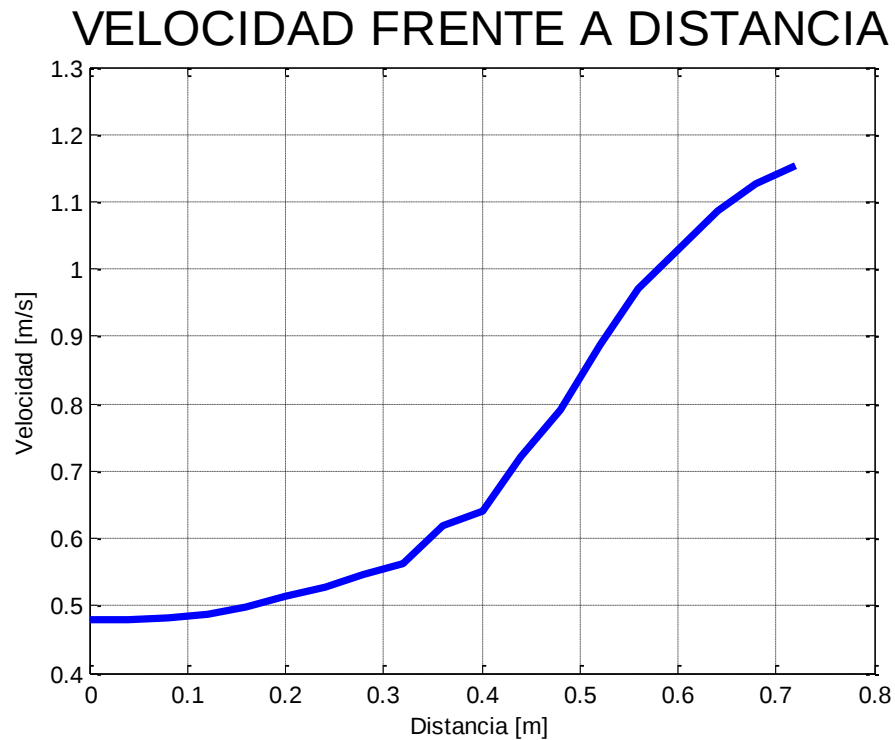
$$E = \frac{q^2}{2gY^2} + Y$$

| <b>Distancia<br/>[m]</b> | <b>h varilla<br/>[m]</b> | <b>Calado<br/>[m]</b> | <b>Velocidad<br/>[m/s]</b> | <b>Froude</b> | <b>Energía<br/>[m]</b> |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|------------------------|
| 0                        | 107                      | 193                   | 0,478                      | 0,348         | 0,205                  |
| 40                       | 107                      | 193                   | 0,478                      | 0,348         | 0,193                  |
| 80                       | 108                      | 192                   | 0,481                      | 0,350         | 0,194                  |
| 120                      | 110                      | 190                   | 0,486                      | 0,356         | 0,190                  |
| 160                      | 115                      | 185                   | 0,499                      | 0,370         | 0,185                  |
| 200                      | 120                      | 180                   | 0,513                      | 0,386         | 0,180                  |
| 240                      | 125                      | 175                   | 0,527                      | 0,403         | 0,175                  |
| 280                      | 131                      | 169                   | 0,546                      | 0,424         | 0,169                  |
| 320                      | 136                      | 164                   | 0,563                      | 0,444         | 0,164                  |
| 360                      | 151                      | 149                   | 0,620                      | 0,512         | 0,149                  |
| 400                      | 156                      | 144                   | 0,641                      | 0,539         | 0,144                  |
| 440                      | 172                      | 128                   | 0,721                      | 0,644         | 0,128                  |
| 480                      | 184                      | 116                   | 0,796                      | 0,746         | 0,116                  |
| 520                      | 196                      | 104                   | 0,888                      | 0,879         | 0,104                  |
| 560                      | 205                      | 95                    | 0,972                      | 1,007         | 0,095                  |
| 640                      | 215                      | 85                    | 1,086                      | 1,189         | 0,085                  |
| 680                      | 218                      | 82                    | 1,126                      | 1,255         | 0,082                  |
| 720                      | 220                      | 80                    | 1,154                      | 1,302         | 0,080                  |

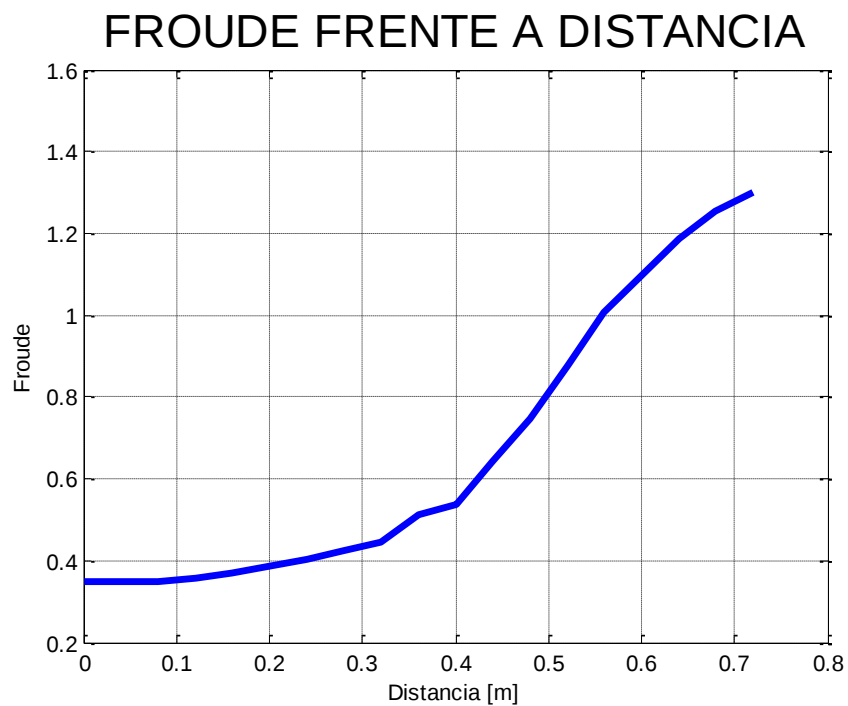
Tabla 22: Valores hallados en transición Sub-Sub (resalto de 50 mm y 35 Hz).

#### 4.3.2.1 Gráficas.

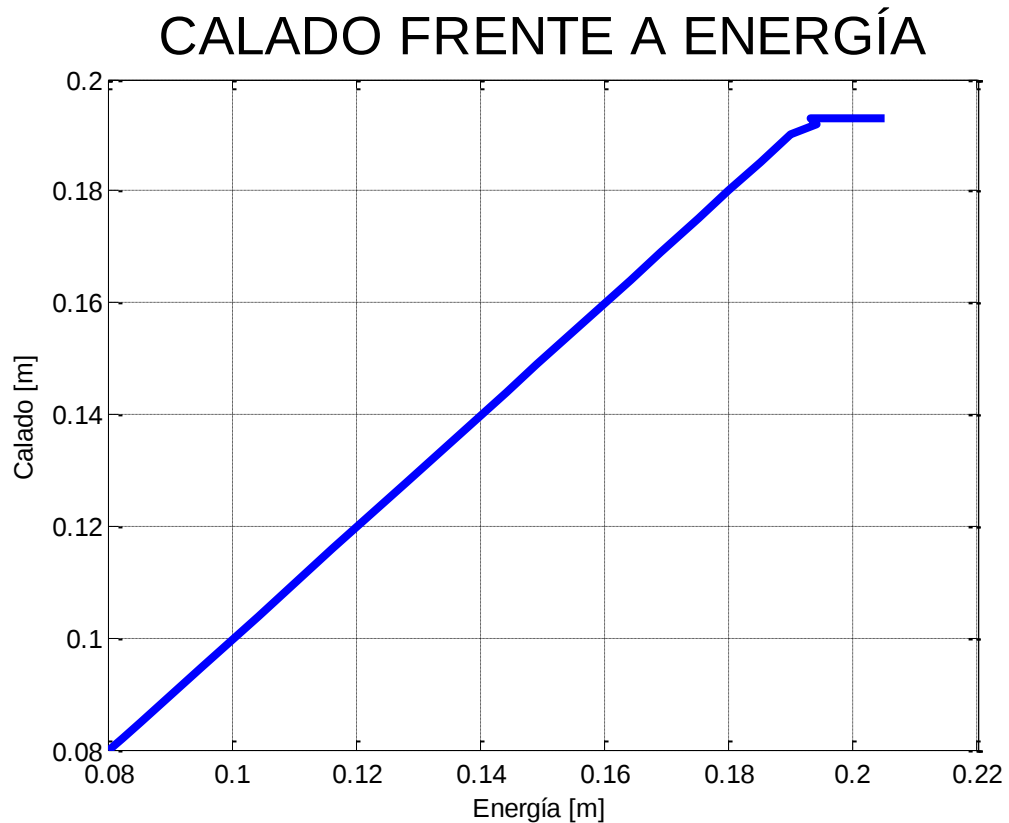
La primera gráfica es Velocidad respecto a la Distancia, donde el caudal se mantiene constante por continuidad. En la siguiente gráfica se puede comprobar que la velocidad aumenta cuando el flujo pasa sobre el obstáculo.



A partir de la velocidad calculada en la gráfica anterior se calcula el número de Froude.



Por último, se representa la curva de calado frente a energía.



➔ Segundo ensayo, resalto grande 75 mm.

Para la medición de la velocidad del flujo en el canal se ha utilizado el Tubo de Pitot, el cual recoge la presión de remanso y la presión estática del flujo. La diferencia de estas dos presiones es la presión dinámica del flujo.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = \sqrt{2g\Delta h}$$

Para una frecuencia de 35 Hz, en la siguiente tabla se recogen los datos obtenidos del Tubo de Pitot Aguas Arriba y abajo,

| Pitot aguas arriba |          |       |           |
|--------------------|----------|-------|-----------|
| h1 Pitot           | h2 Pitot | Ah    | velocidad |
| 265                | 278      | 0.013 | 0,505     |

Tabla 23: Flujo Sub-Sub aguas arriba (resalto de 75 mm y 35 Hz).

| Pitot aguas abajo |          |       |           |
|-------------------|----------|-------|-----------|
| h1 Pitot          | h2 Pitot | Ah    | velocidad |
| 787               | 634      | 0,153 | 1,733     |

Tabla 24: Flujo Sub-Sub aguas abajo (resalto de 75 mm y 35 Hz).

La medición de calados tanto aguas arriba, abajo como el calado crítico es

| $y_1$ [mm] | $y_2$ [mm] |
|------------|------------|
| 210        | 65         |

Tabla 25: Calados aguas arriba y abajo en flujo Sub-Sub (resalto de 75 mm y 35 Hz).

A partir de estos valores se obtienen los caudales unitarios aguas arriba y abajo

$$q_1 = v_1 Y_0$$

$$q_2 = v_2 Y_2$$

Como el caudal unitario,  $q$ , se mantiene constante a lo largo de todo el canal se obtiene la media entre los dos caudales obtenidos anteriormente.

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}$$

Una vez obtenido la media del canal unitario se puede calcular el caudal normal

$$Q = qb$$

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>q1 [m<sup>2</sup>/s]</b> | 0.106 |
| <b>q2 [m<sup>2</sup>/s]</b> | 0.113 |
| <b>q [m<sup>2</sup>/s]</b>  | 0,044 |
| <b>Q [m<sup>3</sup>/s]</b>  | 0,044 |

Tabla 26: Caudales en flujo Sub-Sub (resalto de 75 mm y 35 Hz).

A continuación, se muestra la tabla donde se recogen los datos experimentales como la Horizontal que muestra la longitud entre varillas y la altura de varillas respecto a la superficie libre del flujo.

A partir de la horizontal y la altura de varilla se obtiene el calado como

$$800 - (h_{varilla} + 500)$$

La velocidad

$$V = \frac{q}{Y}$$

El número de Froude

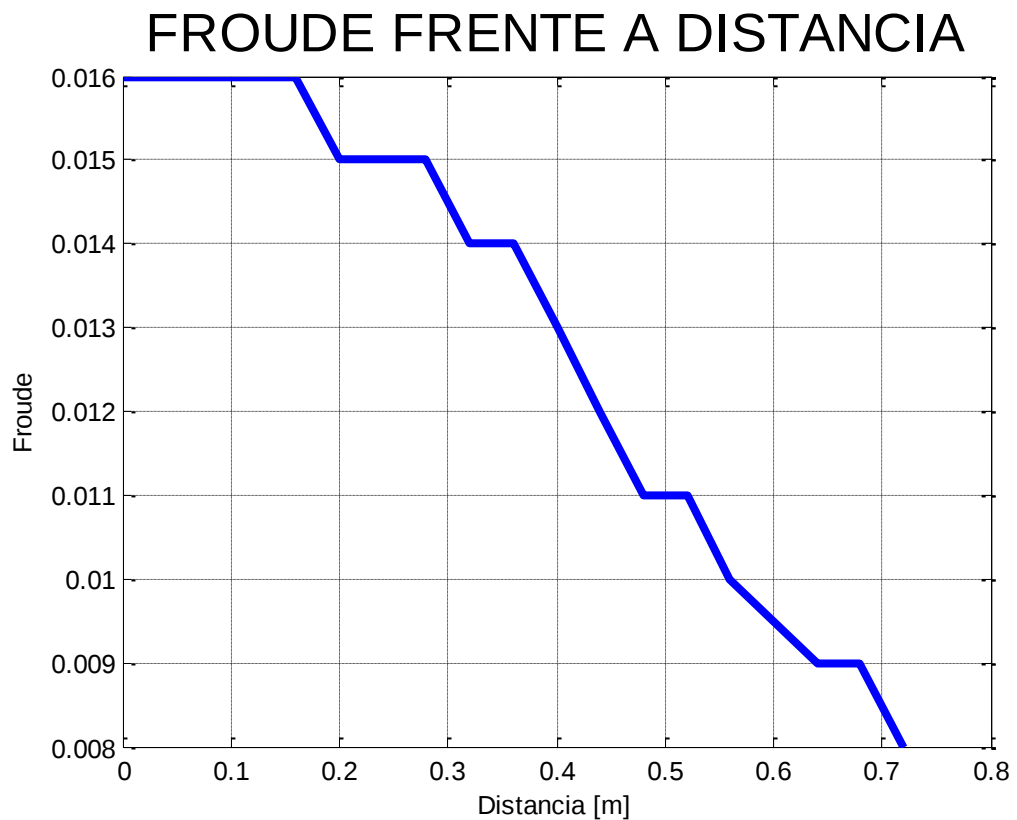
$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gY}}$$

Y la energía específica

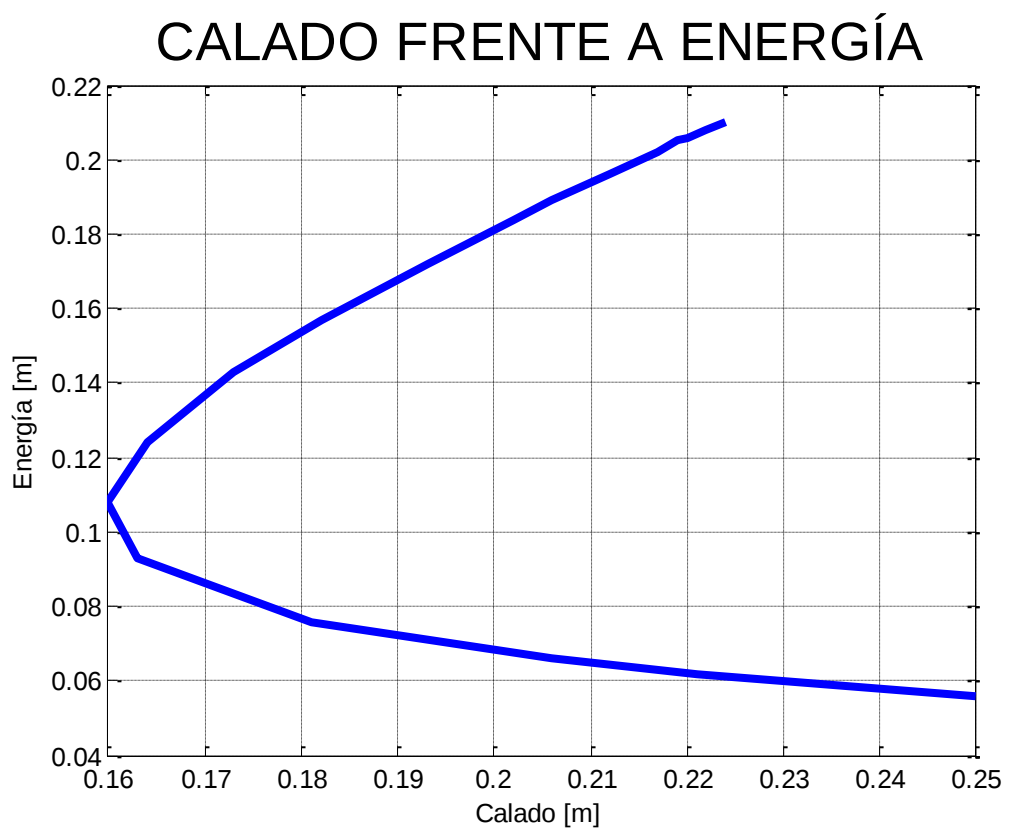
$$E = \frac{q^2}{2gY^2} + Y$$

Tabla 27: Valores hallados en transición Sub-Sub (resalto de 75 mm y 35 Hz).

A partir de la velocidad calculada en la gráfica anterior se calcula el número de Froude.



Por último, se representa la curva de calado frente a energía.



Otro ensayo se ha hecho con una frecuencia de 45 Hz, a la misma altura de flujo en reposo, pero no había variación en las medidas. A continuación, se muestra la tabla con las medidas tomadas.

| Distancia<br>[mm] | h varilla<br>[mm] | Calado<br>[mm] |
|-------------------|-------------------|----------------|
| 0                 | 0                 | 300            |
| 40                | 0                 | 300            |
| 80                | 0                 | 300            |
| 120               | 0                 | 300            |
| 160               | 0                 | 300            |
| 200               | 0                 | 300            |
| 240               | 0                 | 300            |
| 280               | 0                 | 300            |
| 320               | 0                 | 300            |
| 360               | 0                 | 300            |
| 400               | 0                 | 300            |
| 440               | 0                 | 300            |
| 480               | 0                 | 300            |
| 520               | 0                 | 300            |
| 560               | 0                 | 300            |
| 640               | 0                 | 300            |
| 680               | 0                 | 300            |
| 720               | 0                 | 300            |

Tabla 28: Ensayo a 45 Hz con obstáculo de 75 mm.

| Pitot aguas abajo  |          |       |                    |
|--------------------|----------|-------|--------------------|
| h1 Pitot           | h2 Pitot | Ah    | Velocidad<br>[m/s] |
| 280                | 259      | 0,021 | 0,642              |
| Pitot aguas arriba |          |       |                    |
| h1 Pitot           | h2 Pitot | Ah    | Velocidad<br>[m/s] |
| 633                | 789      | 0,156 | 1,749              |

Tabla 29: Ensayo a 45 Hz con obstáculo de 75 mm.

| y0  | y2 |
|-----|----|
| 211 | 65 |

Tabla 30: Ensayo a 45 Hz con obstáculo de 75 mm.

#### 4.3.3 TRANSICIÓN DE FLUJO SUPERCRÍTICO A SUPERCRÍTICO.



*Figura 52: Transición de flujo Supercrítico a Supercrítico.*

El régimen aguas arriba es supercrítico y la altura máxima del obstáculo es menor que la altura crítica,  $h_c$ . en este caso, el calado aumenta sobre el obstáculo y vuelve al estado supercrítico pasado el obstáculo.

A continuación, se muestran dos ensayos con ambos resaltos, grande y pequeño, utilizado en los ensayos anteriores.

- ➔ En el primer ensayo se toma una frecuencia de 33 Hz con el resalto pequeño.

Para la medición de la velocidad del flujo en el canal se ha utilizado el Tubo de Pitot, el cual recoge la presión de remanso y la presión estática del flujo. La diferencia de estas dos presiones es la presión dinámica del flujo.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = \sqrt{2g\Delta h}$$

Para una frecuencia de 33 Hz, en la siguiente tabla se recogen los datos obtenidos del Tubo de Pitot Aguas Arriba y abajo,

| Pitot entrada aguas arriba |     |                 | Pitot salida aguas abajo |     |                 |
|----------------------------|-----|-----------------|--------------------------|-----|-----------------|
| h1                         | h2  | velocidad [m/s] | h1                       | h2  | velocidad [m/s] |
| 441                        | 207 | 2,143           | 619                      | 750 | 1,603           |

Tabla 31: Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 33 Hz).

La medición de calados tanto aguas arriba, abajo como el calado crítico es

| y1 [mm] | y2 [mm] | Yc [mm] |
|---------|---------|---------|
| 39      | 48      | 50      |

Tabla 32: Calados en Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 33 Hz).

A partir de estos valores se obtienen los caudales unitarios aguas arriba y abajo

$$q_1 = v_1 Y_0$$

$$q_2 = v_2 Y_2$$

Como el caudal unitario,  $q$ , se mantiene constante a lo largo de todo el canal se obtiene la media entre los dos caudales obtenidos anteriormente.

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}$$

Una vez obtenido la media del canal unitario se puede calcular el caudal normal

$$Q = qb$$

|                        |       |
|------------------------|-------|
| q1 [m <sup>2</sup> /s] | 0,084 |
| q2 [m <sup>2</sup> /s] | 0,077 |
| q [m <sup>2</sup> /s]  | 0,080 |
| Q [m <sup>3</sup> /s]  | 0,032 |

Tabla 33: Caudales con Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 33 Hz).

A continuación, se muestra la tabla donde se recogen los datos experimentales como la Horizontal que muestra la longitud entre varillas y la altura de varillas respecto a la superficie libre del flujo.

A partir de la horizontal y la altura de varilla se obtiene el calado como

$$800 - (h_{varilla} + 500)$$

La velocidad

$$V = \frac{q}{Y}$$

El número de Froude

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gY}}$$

Y la energía específica

$$E = \frac{q^2}{2gY^2} + Y$$

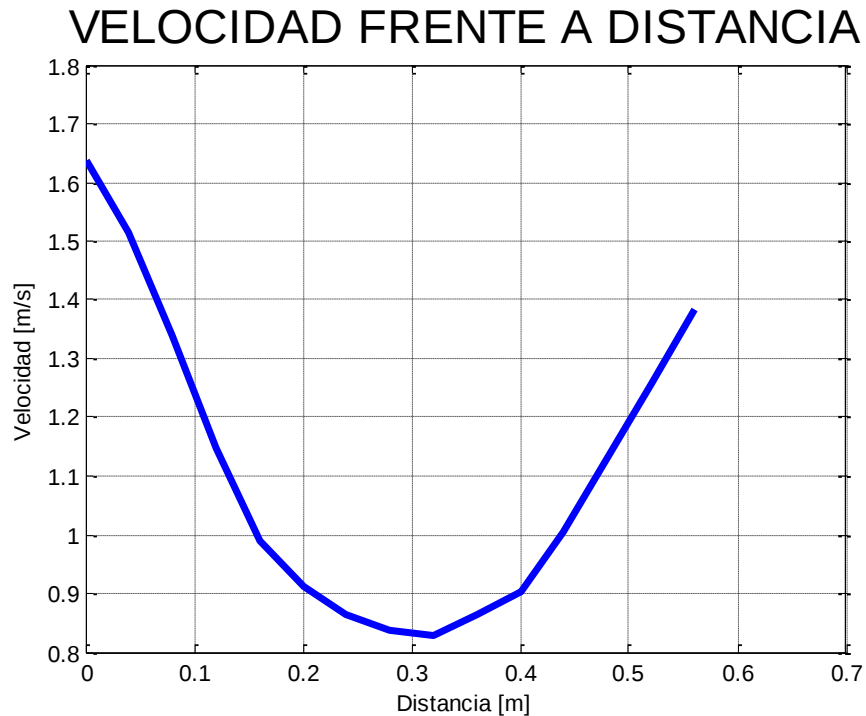
| Varillas | Distancia [mm] | H varilla [mm] | Calado [mm] | Velocidad [m/s] | Froude | Energía [m] |
|----------|----------------|----------------|-------------|-----------------|--------|-------------|
| 1        | 0              | 251            | 49          | 1,68            | 2,362  | 0,185       |
| 2        | 40             | 247            | 53          | 1,514           | 2,100  | 0,169       |
| 3        | 80             | 240            | 60          | 1,338           | 1,743  | 0,151       |
| 4        | 120            | 230            | 70          | 1,146           | 1,383  | 0,137       |
| 5        | 160            | 219            | 81          | 0,990           | 1,111  | 0,131       |
| 6        | 200            | 212            | 88          | 0,912           | 0,981  | 0,130       |
| 7        | 240            | 207            | 93          | 0,862           | 0,903  | 0,130       |
| 8        | 280            | 204            | 96          | 0,836           | 0,861  | 0,131       |
| 9        | 320            | 203            | 97          | 0,827           | 0,848  | 0,131       |
| 10       | 360            | 207            | 93          | 0,862           | 0,903  | 0,130       |
| 11       | 400            | 211            | 89          | 0,901           | 0,965  | 0,130       |
| 12       | 440            | 220            | 80          | 1,003           | 1,132  | 0,131       |
| 13       | 480            | 229            | 71          | 1,130           | 1,354  | 0,136       |
| 14       | 520            | 236            | 64          | 1,254           | 1,582  | 0,144       |
| 15       | 560            | 242            | 58          | 1,383           | 1,834  | 0,155       |
| 16       | 640            |                |             |                 |        |             |
| 17       | 680            |                |             |                 |        |             |
| 18       | 720            |                |             |                 |        |             |

Tabla 34: Valores hallados para Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 33 Hz).

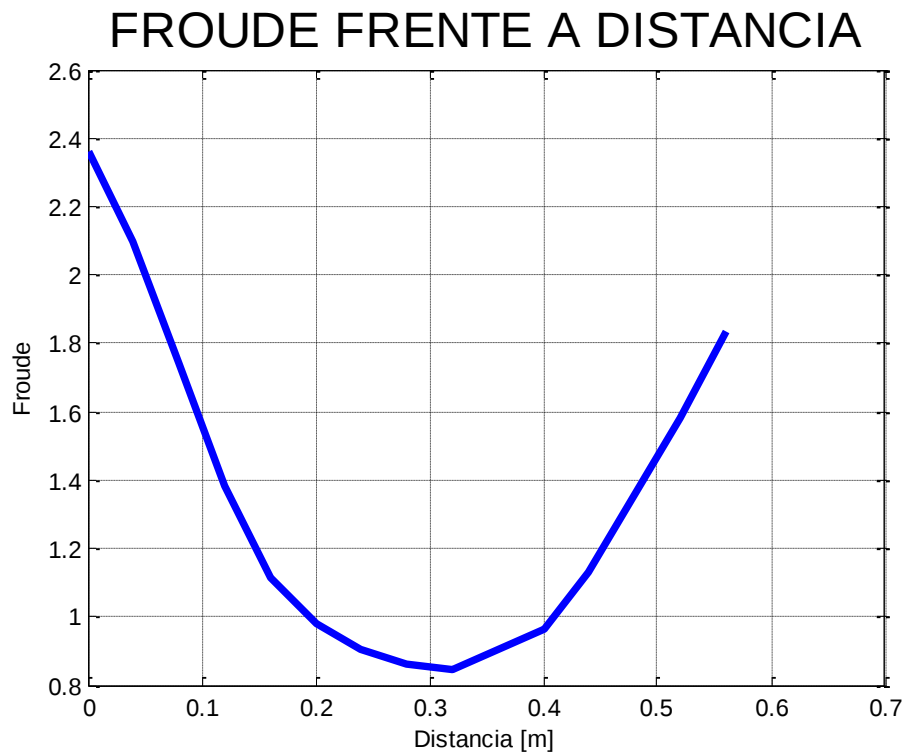
A partir de la varilla 16 no se ha podido calcular la altura y, por tanto, tampoco el calado.

#### 4.3.3.1 Gráficas.

A continuación, se muestra la gráfica de velocidad donde se puede observar como la velocidad al paso por el obstáculo disminuye y después recupera aproximadamente los valores de velocidad antes del obstáculo.

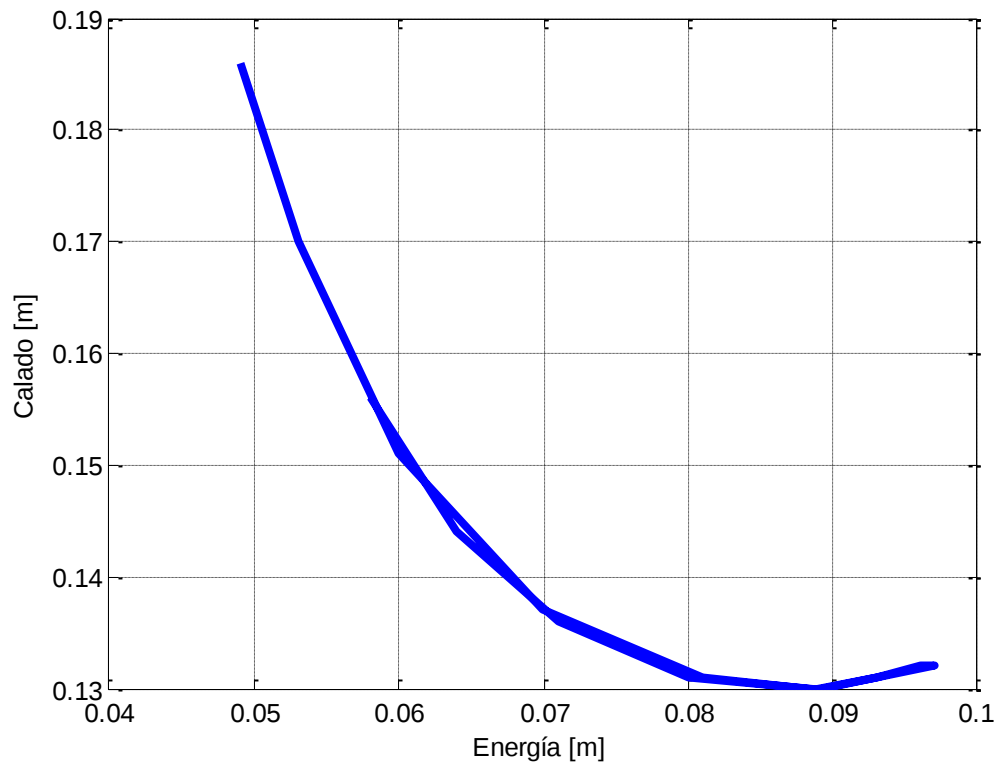


A partir de la gráfica de velocidad se obtiene el número de Froude donde se puede observar el valor crítico cuando el número de Froude es igual a la unidad.

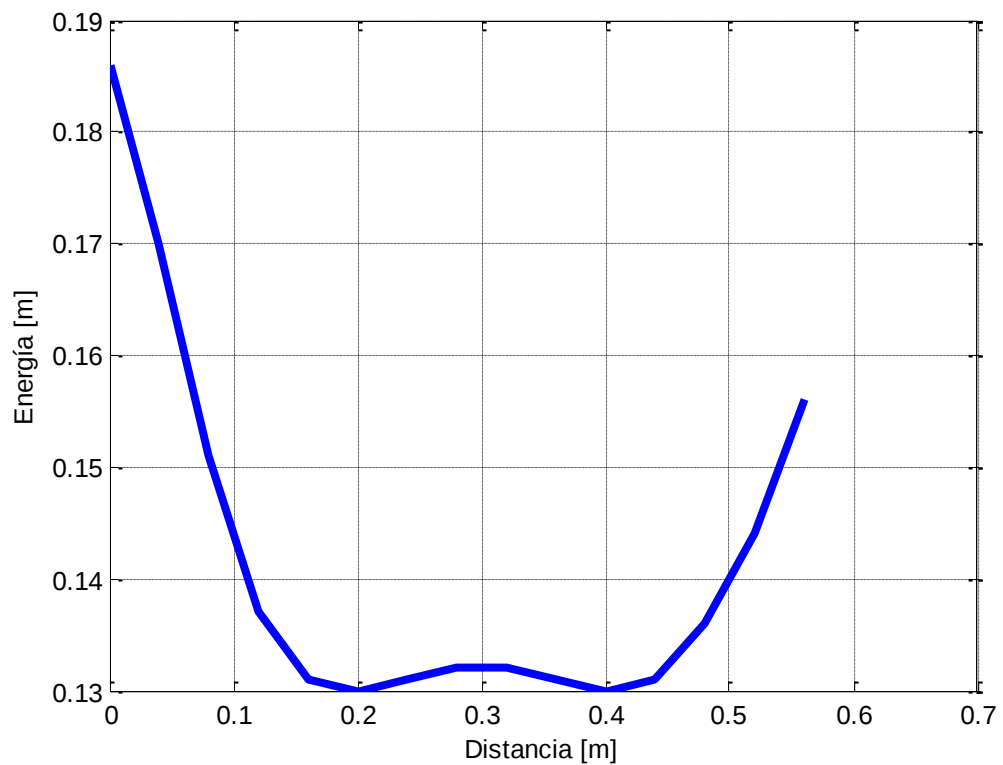


A continuación, se muestran las gráficas de calado frente a energía, energía frente a distancia y calado frente a distancia.

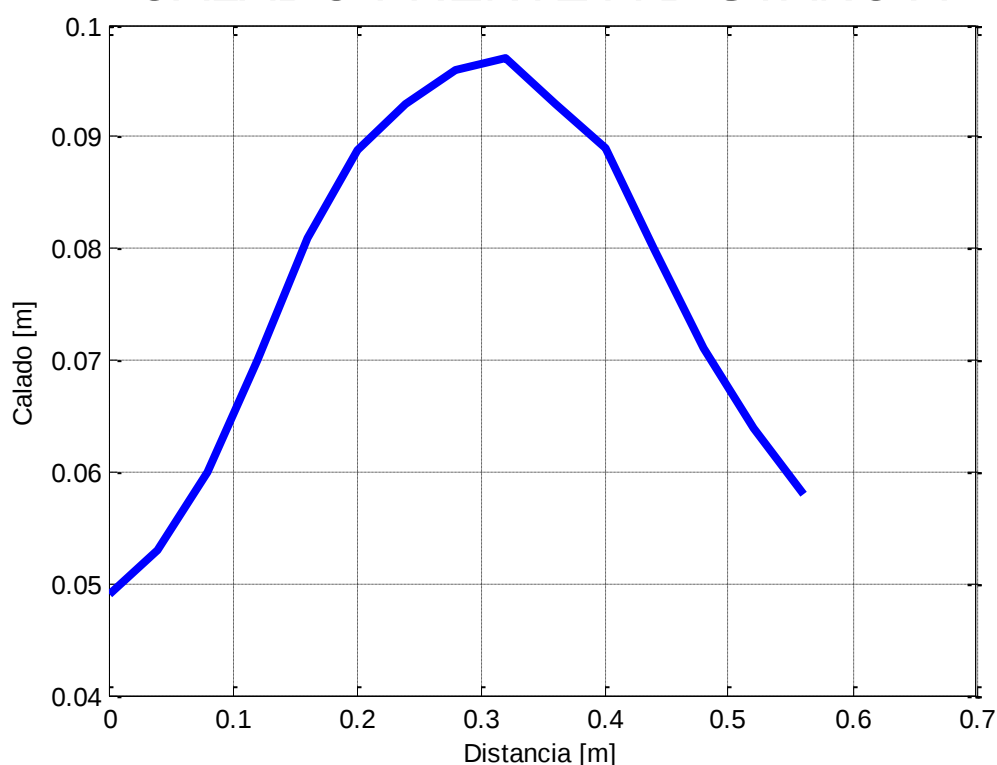
## CALADO FRENTE A ENERGÍA



## ENERGÍA FRENTE A DISTANCIA



## CALADO FRENTE A DISTANCIA



En esta gráfica se puede observar la forma que hace el flujo sobre el obstáculo, es muy aproximado a flujo que se encuentra en la figura 51, foto tomada en el laboratorio de ensayo.

➔ En el segundo ensayo se toma una frecuencia de 40 Hz con el resalto pequeño.

Para la medición de la velocidad del flujo en el canal se ha utilizado el Tubo de Pitot, el cual recoge la presión de remanso y la presión estática del flujo. La diferencia de estas dos presiones es la presión dinámica del flujo.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = \sqrt{2g\Delta h}$$

Para una frecuencia de 40 Hz, en la siguiente tabla se recogen los datos obtenidos del Tubo de Pitot Aguas Arriba y abajo,

| Pitot entrada |     |                 | Pitot salida |     |                 |
|---------------|-----|-----------------|--------------|-----|-----------------|
| h1            | h2  | velocidad [m/s] | h1           | h2  | velocidad [m/s] |
| 452           | 177 | 2,32282156      | 606          | 825 | 2,07286758      |

Tabla 35: Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 40 Hz).

La medición de calados tanto aguas arriba, abajo como el calado crítico es

| $y_1$ [mm] | $y_2$ [mm] | $y_c$ a 1010 [mm] |
|------------|------------|-------------------|
| 32         | 39         | 39                |

Tabla 36: Calados en Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 40 Hz).

A partir de estos valores se obtienen los caudales unitarios aguas arriba y abajo

$$q_1 = v_1 Y_0$$

$$q_2 = v_2 Y_2$$

Como el caudal unitario,  $q$ , se mantiene constante a lo largo de todo el canal se obtiene la media entre los dos caudales obtenidos anteriormente.

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}$$

Una vez obtenido la media del canal unitario se puede calcular el caudal normal

$$Q = qb$$

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| $q_1$ [m <sup>2</sup> /s] | 0,074 |
| $q_2$ [m <sup>2</sup> /s] | 0,081 |
| $q$ [m <sup>2</sup> /s]   | 0,078 |
| $Q$ [m <sup>3</sup> /s]   | 0,031 |

Tabla 37: Caudales con Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 40 Hz).

A continuación, se muestra la tabla donde se recogen los datos experimentales como la Horizontal que muestra la longitud entre varillas y la altura de varillas respecto a la superficie libre del flujo.

A partir de la horizontal y la altura de varilla se obtiene el calado como

$$800 - (h_{varilla} + 500)$$

La velocidad

$$V = \frac{q}{Y}$$

El número de Froude

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gY}}$$

Y la energía específica

$$E = \frac{q^2}{2gY^2} + Y$$

| Distancia<br>[mm] | H varilla [mm]  | Calado<br>[mm] | Velocidad<br>[m/s] | Froude | Energía<br>[m] |
|-------------------|-----------------|----------------|--------------------|--------|----------------|
| 0                 | 261             | 39             | 1,989              | 3,216  | 0,241          |
| 40                | 255             | 45             | 1,724              | 2,595  | 0,197          |
| 80                | 248             | 52             | 1,492              | 2,089  | 0,165          |
| 120               | 239             | 61             | 1,272              | 1,644  | 0,143          |
| 160               | 230             | 70             | 1,108              | 1,338  | 0,133          |
| 200               | 222             | 78             | 0,995              | 1,137  | 0,128          |
| 240               | 215             | 85             | 0,913              | 1,000  | 0,127          |
| 280               | 211             | 89             | 0,872              | 0,933  | 0,128          |
| 320               | 212             | 88             | 0,882              | 0,949  | 0,128          |
| 360               | 214             | 86             | 0,902              | 0,982  | 0,127          |
| 400               | 221             | 79             | 0,982              | 1,116  | 0,128          |
| 440               | 228             | 72             | 1,078              | 1,282  | 0,131          |
| 480               | 236             | 64             | 1,212              | 1,530  | 0,139          |
| 520               | 246             | 54             | 1,437              | 1,974  | 0,159          |
| 560               | 251             | 49             | 1,583              | 2,284  | 0,177          |
| 640               | fuera de medida |                |                    |        |                |
| 680               |                 |                |                    |        |                |
| 720               |                 |                |                    |        |                |

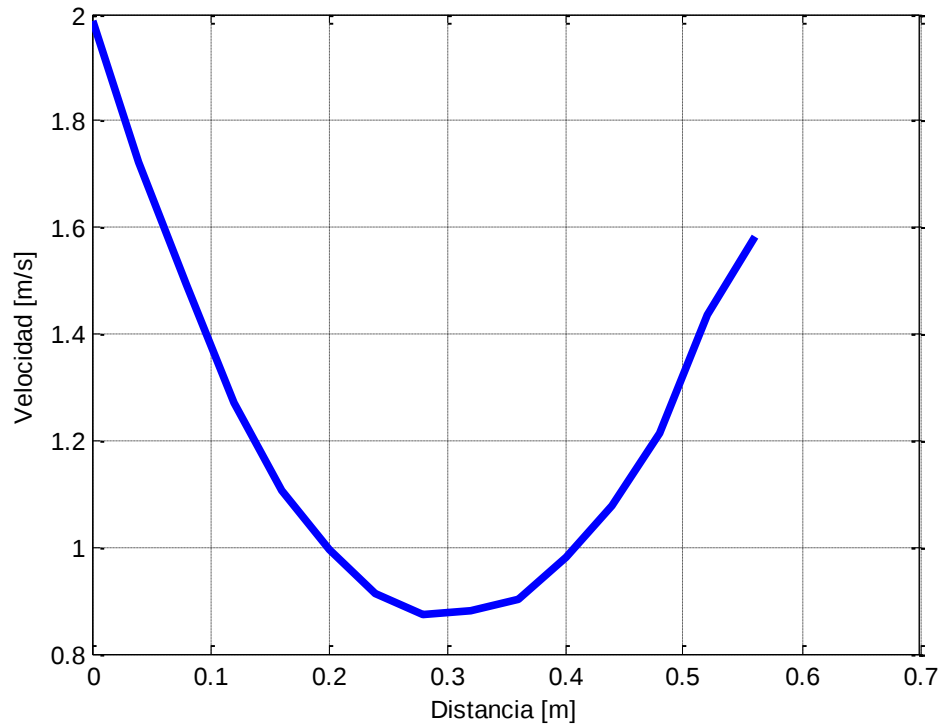
*Tabla 38: Valores hallados para Flujo Sup-Sup (resalto de 50 mm y 40 Hz).*

A partir de la varilla 16, la altura se encuentra fuera de medida por dificultad en la medición.

#### 4.3.3.2. Gráficas.

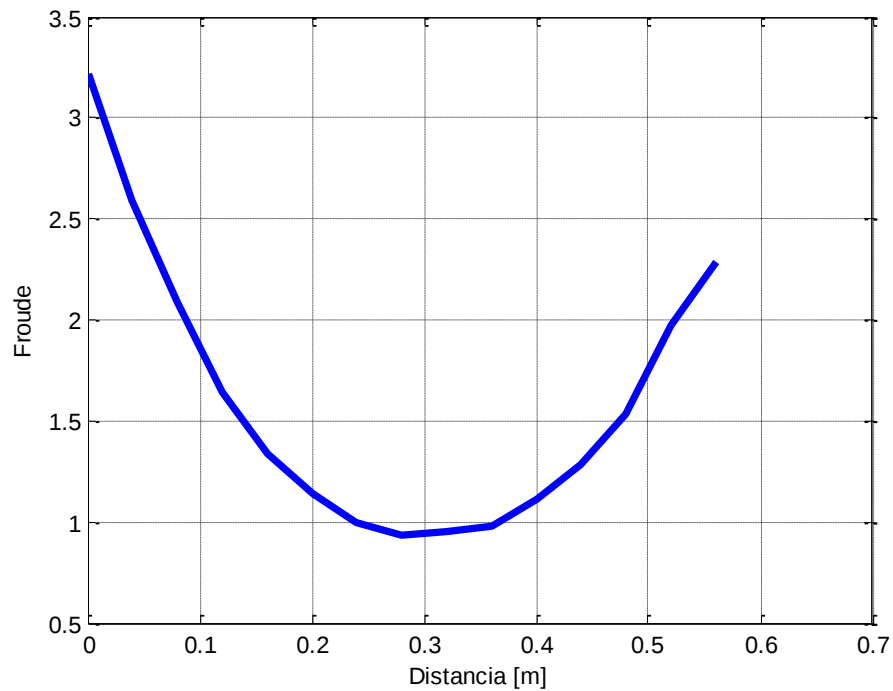
Como en el ensayo anterior se muestra la gráfica de velocidad donde se puede observar como la velocidad al paso por el obstáculo disminuye y después recupera aproximadamente los valores de velocidad antes del obstáculo.

### VELOCIDAD FRENTE A DISTANCIA



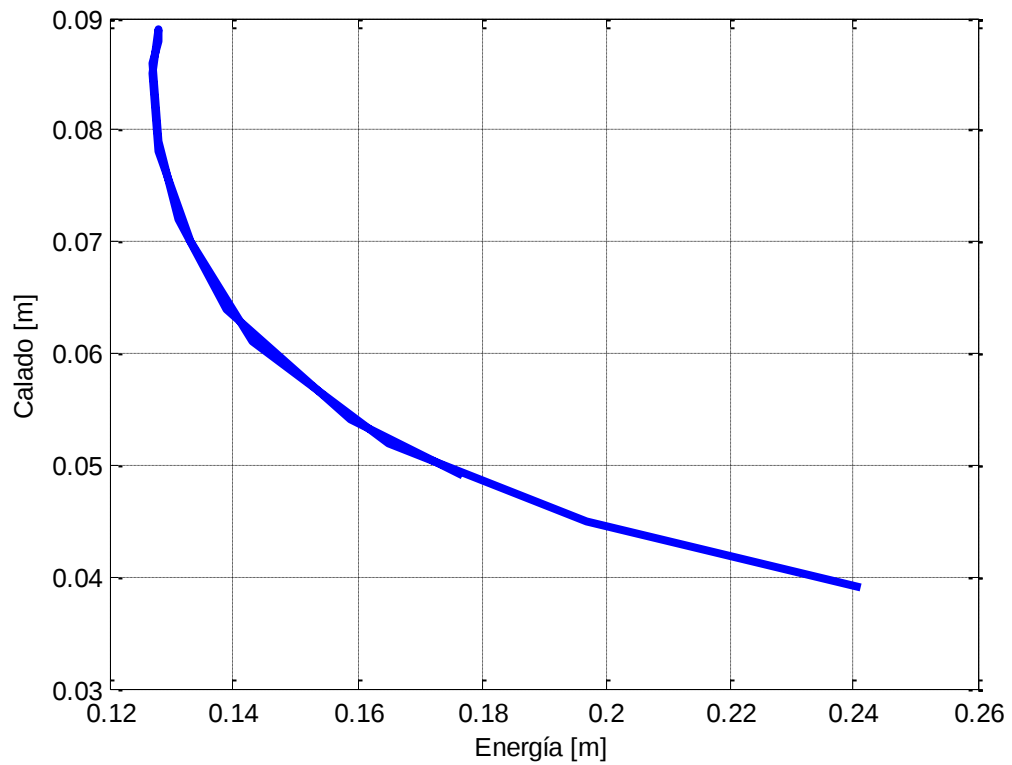
A partir de la velocidad se calcula el número de Froude aproximándose el número de Froude a la unidad como distancia crítica.

### FROUDE FRENTE A DISTANCIA

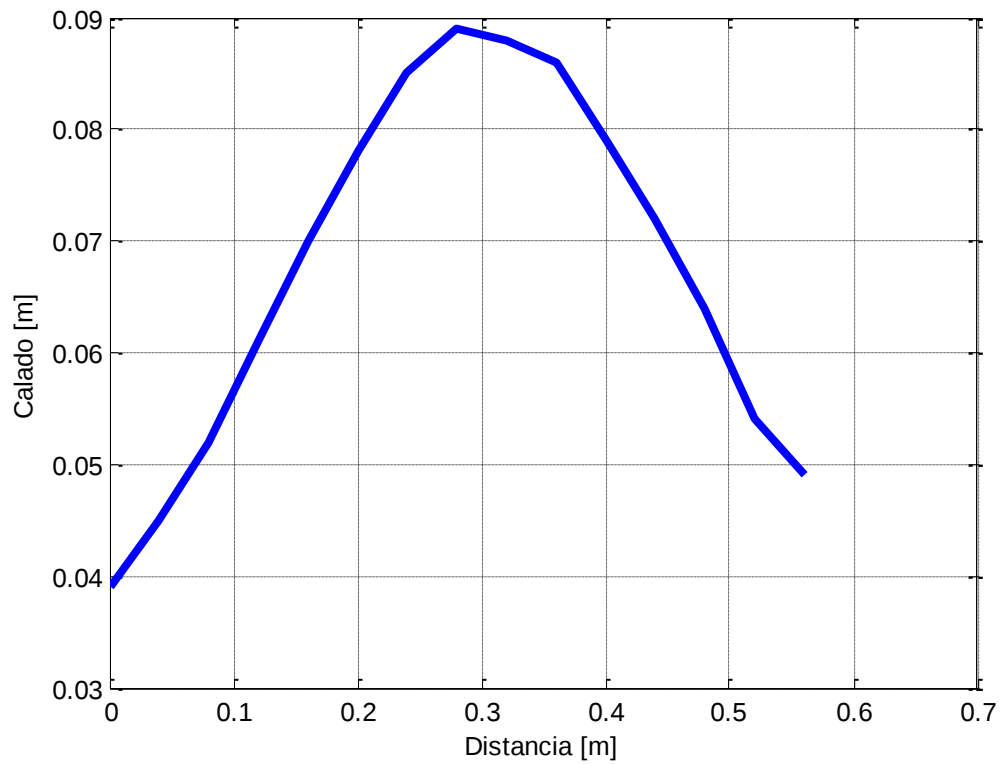


A continuación, se muestran las gráficas de calado frente a energía, energía frente a distancia y calado frente a distancia.

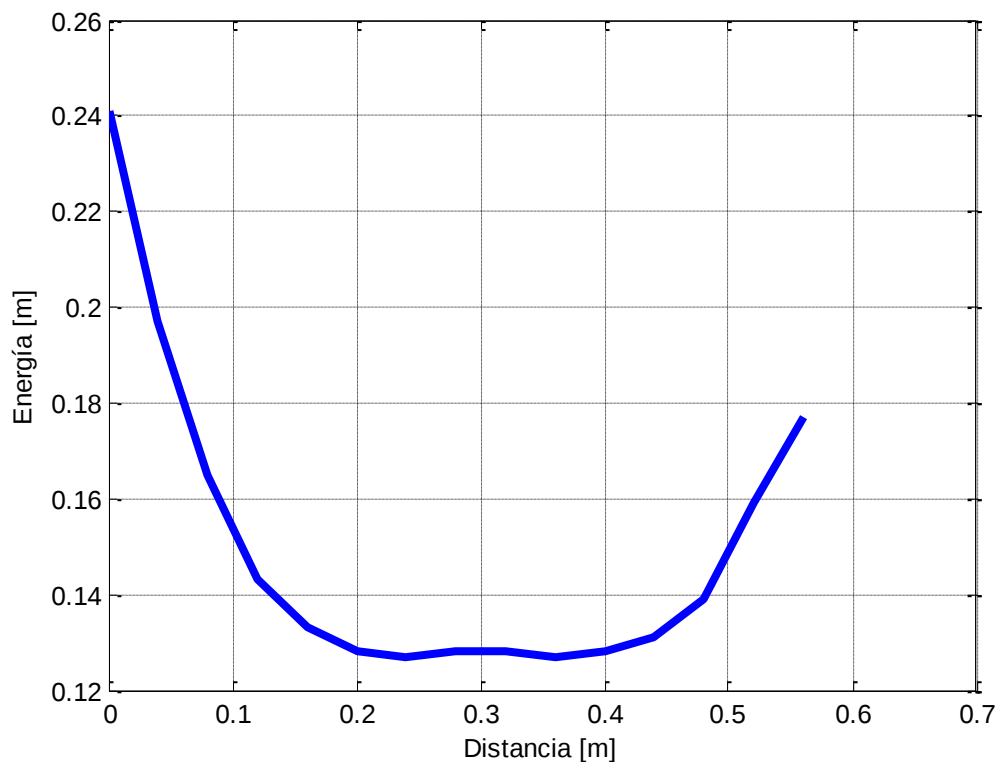
## CALADO FRENTE A ENERGÍA



## CALADO FRENTE A DISTANCIA



## ENERGÍA FRENTE A DISTANCIA



### 4.4 VERTEDEROS.

Un vertedero es un obstáculo a la corriente fluida, la cual pasa alcanzando una altura determinada sobre la pared. El vertedero intercepta la corriente causando una elevación del nivel aguas arriba y se emplea para controlar niveles y para medir caudales.

La superficie más elevada del vertedero en contacto con el agua se denomina cresta. La altura,  $h$ , de la lámina del fluido sobre la cresta, la cual es responsable de la descarga, se le denomina carga del vertedero.

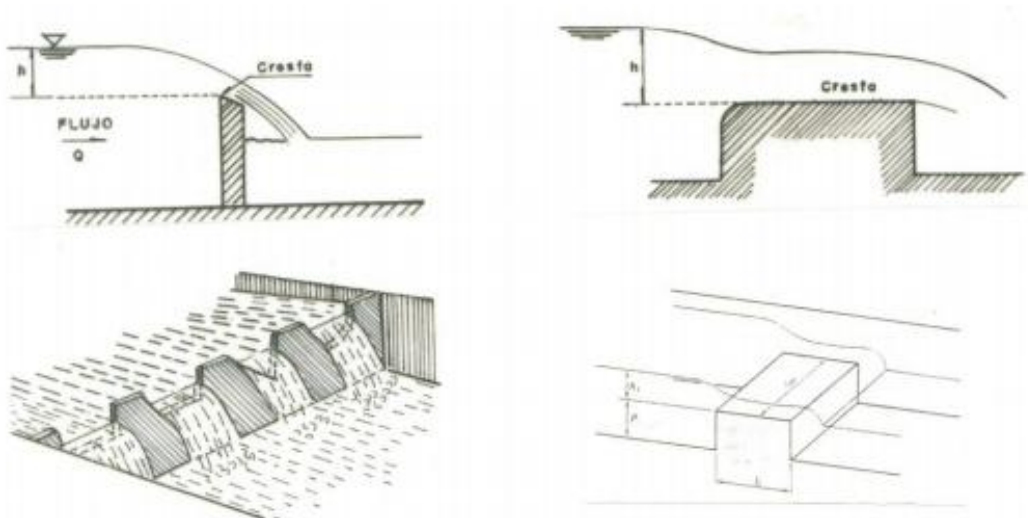


Figura 53: Diferentes vertederos.

#### 4.4.1 TERMINOLOGÍA RELATIVA AL FLUJO DE VERTEDEROS.

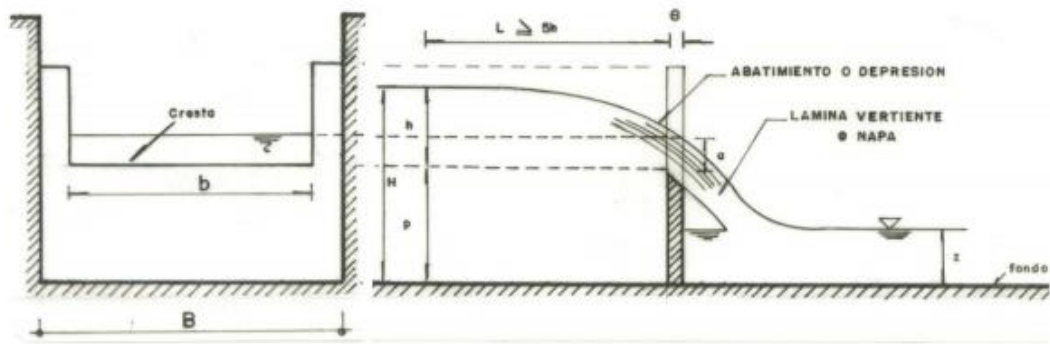


Figura 54: Terminología de vertederos.

- b: Longitud de la cresta o anchura del vertedero
  - B: anchura de canal
  - h: Carga del vertedero. Es el desnivel entre la superficie libre de aguas arriba y la cresta del vertedero.
  - H: Espesor de la lámina de agua, aguas arriba del vertedero.
  - a: Carga sobre la cresta
  - P: Altura del vertedero o cota de la cresta, referida al fondo del canal
  - z: Espesor de la lámina de agua, aguas abajo del vertedero
  - L: Distancia mínima, aguas arriba del vertedero, a la cual se coloca el medidor de niveles  $L > 5h$
  - e: Espesor de la pared del vertedero. Según el tipo de vertedero, si es pared delgada  $e < 3h$ , si es pared gruesa  $e > 3h$
- El chorro de agua descargado a través del vertedero, modelado por la cresta, forma una hoja llamada napa o lámina vertiente.

#### 4.4.2 TIPOS DE LÁMINA VERTIENTE.

Cuando el aire atmosférico rodea externa y completamente a la lámina vertiente y ésta se despegar totalmente de la cara de aguas abajo del vertedero, se denomina lámina libre. Esta forma de lámina corresponde al régimen más estable y, por tanto, es la más deseable en el empleo de los vertederos de pared delgada como medidores de caudal.

En el caso de un vertedero rectangular, sin contracciones laterales, es decir, con longitud de cresta igual al ancho de plantilla del canal de acceso, el espacio situado bajo la lámina de agua estará incomunicado con la atmósfera exterior, y el escurrimiento puede ser:

- Lámina libre: se obtiene mediante la instalación de orificios de ventilación en las paredes del canal, inmediatamente aguas abajo del vertedero, con lo cual se comunica la zona situada bajo la lámina con la atmósfera exterior.
- Lámina abatida: se obtiene cuando la ventilación de la descarga es insuficiente, por lo cual se introduce aire en la parte inferior de dicha lámina, disminuyendo su presión por debajo del valor de la presión atmosférica. En consecuencia, la presión atmosférica que actúa sobre la parte superior de la lámina hace que ésta se adhiera a la placa del vertedero. El agua situada entre el vertedero y la lámina tiende a subir hasta que se rompe ésta, permitiendo la entrada de aire. El régimen vuelve a establecerse sucesivamente. La inestabilidad del régimen, debida a las entradas intermitentes de aire, se presenta para cierto rango de la relación  $h/P$ .
- Lámina adherente: es el caso de menor aireación de la lámina vertiente, es decir, la ventilación por debajo de la lámina vertiente es nula. Se presenta para

pequeñas cargas  $h$ , en cuyo caso la velocidad es insuficiente para despegar la lámina.

- Lámina ahogada inferiormente: se obtiene al aumentar la carga de un vertedero de lámina adherente, sin que el aire pueda entrar debajo del manto inferior de la lámina. El espacio A se llena de agua, constituyendo una zona muerta y turbulenta, sin participar del escurrimiento general.
- Lámina ahogada superiormente: se obtiene cuando el resalto hidráulico se acerca al vertedero cubriendo el pie de la lámina vertiente, al atenuarse la rápida por la disminución de la carga. En este caso, por ser constante el caudal aguas arriba del vertedero, toda variación en el nivel de aguas abajo repercute en el nivel aguas arriba.

Cuando, en un vertedero de lámina libre, la carga es bastante grande, se produce un flujo de gran velocidad al pie de la placa del vertedero, posteriormente, aguas abajo, el flujo adquiere su velocidad normal y, dadas las condiciones de régimen subcrítico aguas abajo, se forma un resalto hidráulico.

Finalmente, cuando la superficie libre, aguas abajo del vertedero, es superior a la elevación de la cresta, se dice que el vertedero está funcionando ahogado.

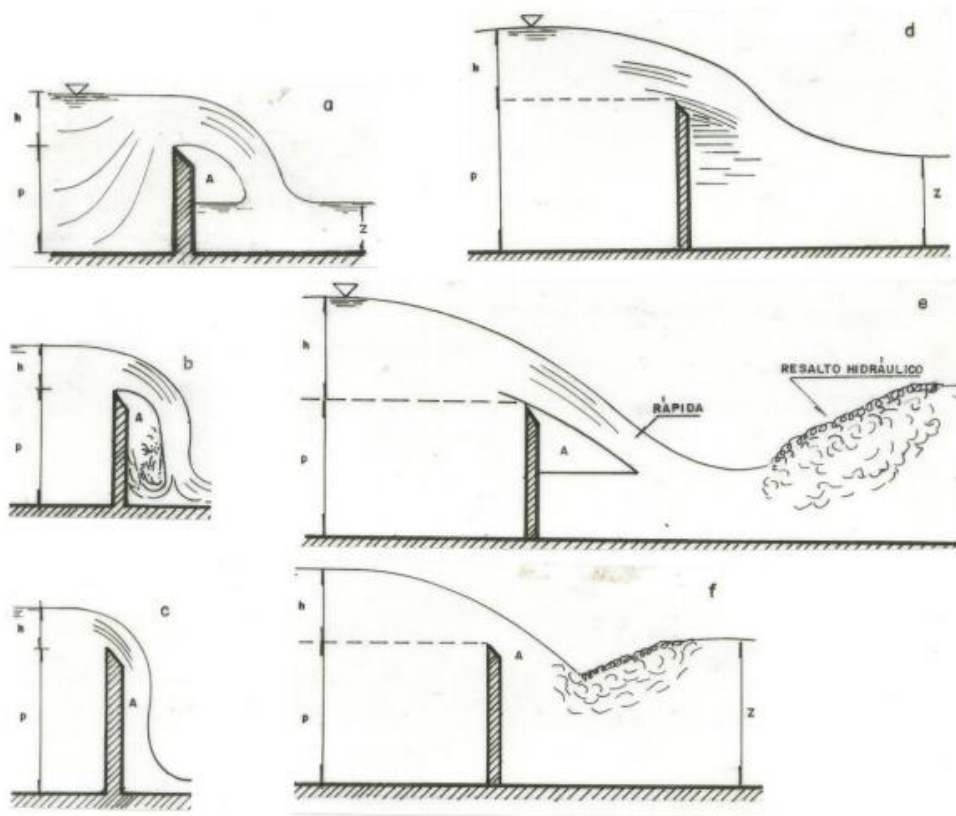
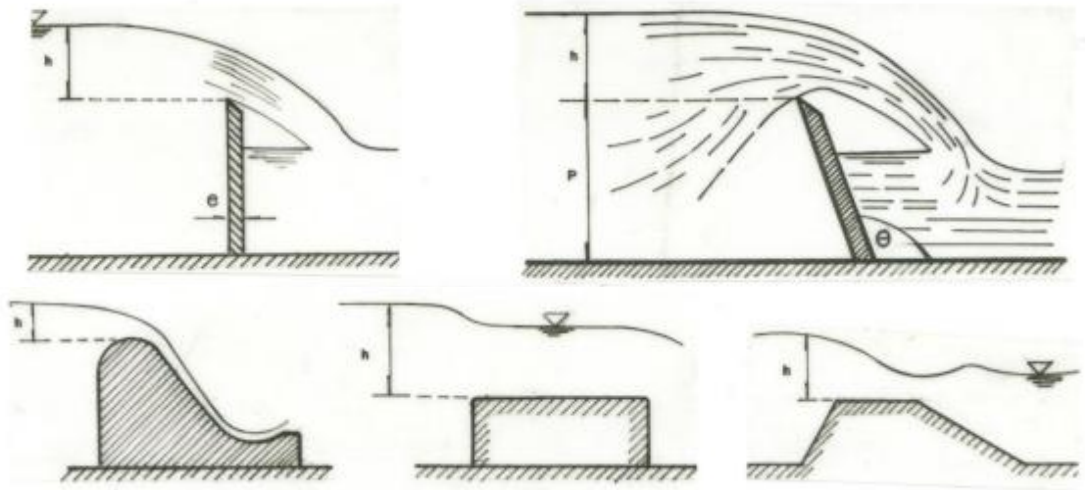


Figura 55: Tipos de lámina vertiente.

#### 4.4.3 CLASIFICACIÓN DE LOS VERTEDEROS.

##### 4.4.3.1 Según el espesor de la pared.

Pueden ser Vertederos de pared delgada y Vertederos de pared gruesa.



*Figura 56: Tipos de vertedero.*

Los vertederos de pared delgada sirven para medir caudales con gran precisión, y los de pared gruesa se utilizan para controlar niveles, aunque también se pueden instrumentar como medidores de caudal.

La exactitud de la medida del caudal exige que el vertedero esté bien ventilado. La ventilación tiene por objeto introducir aire debajo de la lámina vertiente, gracias a un tubo de ventilación, para que, por ambas caras de la lámina, actúe la misma presión (atmosférica). La lámina adherida en un vertedero no ventilado crea succión, y es causal de errores en la determinación de caudales.

##### 4.4.3.2 Según su forma geométrica.

- Vertederos de pared delgada.
  - Rectangulares
  - Triangulares
  - Trapezoidales
  - Circulares
  - Semicirculares
  - Parabólicos
  - Simétricos
  - Asimétricos
  - Exponenciales

- Vertederos de pared gruesa.
  - Rectangulares de arista viva
  - De cresta redondeada y talud vertical
  - Cresta redondeada y talud inclinado hacia aguas abajo
  - De cresta elíptica y talud inclinado hacia aguas abajo
  - Vertedero Cimacio o de Creager

El más importante de los vertederos de pared gruesa es aquel cuyo perfil coincide con la forma del perfil inferior de la lámina vertiente, perfectamente ventilada, sobre un vertedero hipotético de pared delgada. A este tipo se le conoce con el nombre de cimacio y fue W.P. Creager el primero en idearlo.

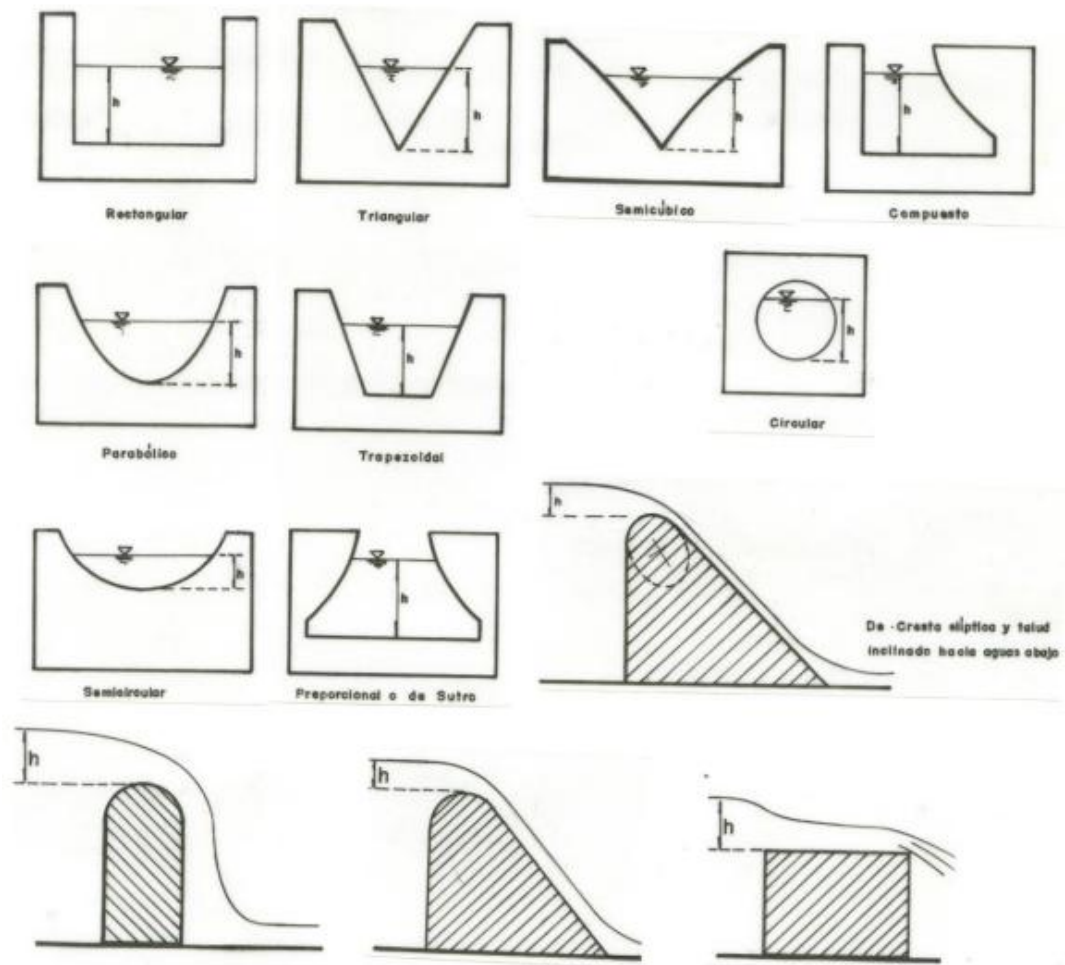


Figura 57: Vertederos según su forma geométrica.

#### 4.4.3.3 Según la altura de la lámina de agua, aguas abajo.

- Vertederos de descarga libre
- Vertederos sumergidos o ahogados.

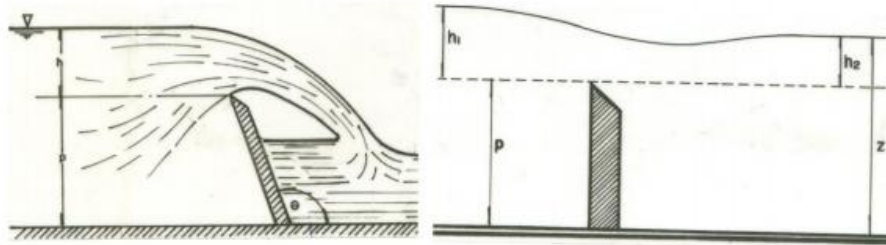


Figura 58: Vertederos según la altura de lámina.

#### 4.4.3.4 Según la longitud de la cresta.

- Vertederos si contracción laterales  $b = B$
- Vertederos con contracción laterales  $b < B$

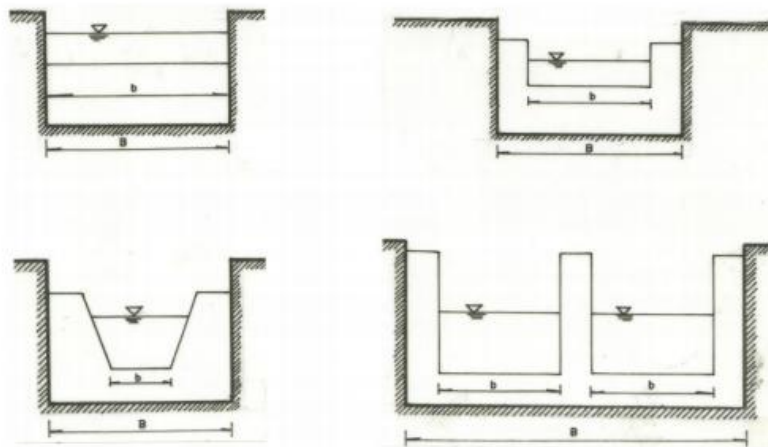


Figura 59: Vertederos según longitud de cresta.

#### 4.4.3.5 Según la posición del plano del vertedero con respecto a la dirección del la corriente.

- Vertederos transversales o normales
- Vertederos laterales o aliviaderos
- Vertederos oblicuos
- Vertederos de aducción radial o de pozo

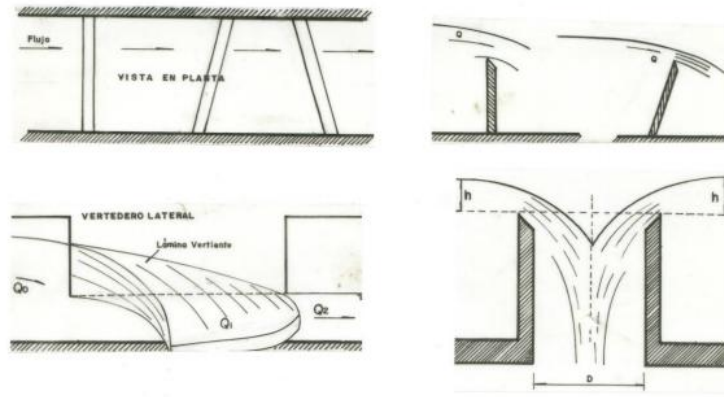


Figura 60: Vertederos según la posición del plano.

#### 4.4.4 FÓRMULAS PARA EL CAUDAL A TRAVÉS DE VERTEDEROS.

##### 4.4.4.1 Vertederos de pared delgada.

A continuación, se deducen las expresiones que permiten calcular el caudal de flujo a través de vertederos de pared delgada.

Hipótesis a tener en cuenta:

- Aguas arriba del vertedero, el flujo es uniforme y la presión varía linealmente con la profundidad, de acuerdo con la ley hidrostática de presiones.
- La superficie libre es paralela al fondo del canal, lo suficientemente lejos del plano del vertedero, aguas arriba, y todas las partículas que fluyen sobre el vertedero, se mueven horizontalmente (en realidad, la superficie libre se abate en la vecindad del vertedero).
- La presión externa a la lámina vertiente es la atmosférica.
- Los efectos debidos a la viscosidad y tensión superficial del líquido son despreciables.

##### 4.4.4.1.1 Expresión para el caudal en vertederos rectangulares.

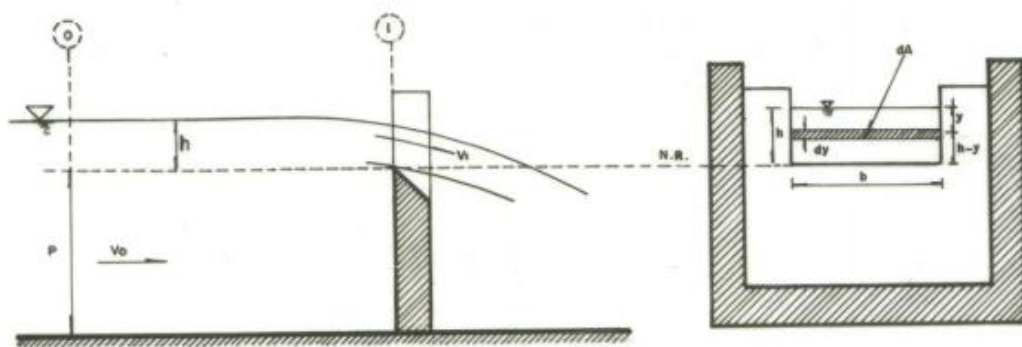


Figura 61: Vertedero rectangular.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre las secciones 0 y 1, y despreciando las pérdidas de carga, se obtiene:

$$P_0 + \rho g z_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 = P_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

Dónde  $P_0 = P_1 = P_{\text{atm}}$  y  $v_0$  es la velocidad de aproximación de flujo, medida en una sección lo suficientemente lejos, aguas arriba del vertedero.

Desarrollando la ecuación anterior,

$$\rho g(P + h) + \rho \frac{v_0^2}{2} = \rho g(P + h - Y_1) + \rho \frac{v_1^2}{2}$$

Por tanto, despejando la velocidad del flujo en la sección 1, encima de la cresta, se obtiene,

$$v_1 = \sqrt{2g \left( Y + \frac{v_0^2}{2g} \right)} = \sqrt{2gY + v_0^2}$$

Por otro lado, aplicando la ecuación de la conservación de la masa, se obtiene el caudal teórico que fluye a través del área diferencial,  $dA = b \, dy$ , sobre la cresta,

$$dQ_t = v_1 dA = \sqrt{2gY + v_0^2} b \, dy$$

$$Q_t = \int dQ_t = \int_0^h \left( \sqrt{2gY + v_0^2} \right) b \, dy$$

El caudal real descargado por el vertedero se obtiene introduciendo un coeficiente de descarga  $C_d$  que sirve para corregir el error de despreciar las pérdidas de carga del flujo y tiene en cuenta el efecto de la contracción de las líneas de corriente en la proximidad del vertedero y de la lámina vertiente sobre la cresta del mismo.

El coeficiente de descarga  $C_d$  es adimensional y menor que 1, y también es función de la viscosidad y tensión superficial del flujo, de la rugosidad de las paredes del vertedero y del canal de acceso, de la relación  $h/P$  y de la forma geométrica del vertedero.

Por tanto, el caudal real a través de vertedero será:

$$Q = C_d Q_t = C_d b \int_0^h \left( \sqrt{2gY + v_0^2} \right) dy$$

A continuación, se calcula la expresión final del caudal real,

$$u = 2gy + v_0^2 \rightarrow du = 2gy \rightarrow dy = \frac{du}{2g}$$

$$Q = C_d b \int_{v_0^2}^{2gh+v_0^2} \left( \frac{u^{1/2}}{2g} \right) du = C_d \left( \frac{b}{2g} \right) \left[ \frac{u^{3/2}}{3/2} \right]_{v_0^2}^{2gh+v_0^2} = \frac{2}{3} C_d \frac{b}{2g} \left[ \sqrt{(2gh + v_0^2)^3} - \sqrt{(v_0^2)^3} \right]$$

Ahora, multiplicando y dividiendo por  $2g$ , se obtiene

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \left[ \sqrt{\left(h + \frac{v_0^2}{2g}\right)^3} - \sqrt{\left(\frac{v_0^2}{2g}\right)^3} \right]$$

Como la velocidad de aproximación  $v_0$  a menudo es muy pequeña se puede despreciar en la anterior ecuación, por tanto, el caudal real queda,

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} h^{3/2}$$

siendo  $P \gg H \rightarrow h \gg \frac{v_0^2}{2g}$

#### 4.4.4.1.2 Expresión para el caudal en vertederos triangulares.

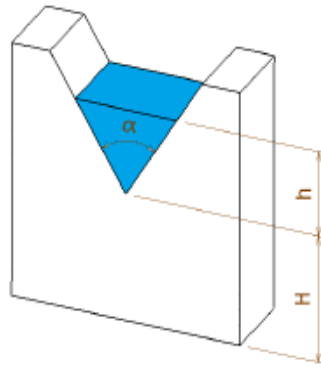


Figura 62: Vertedero triangular.

$$w(y) = 2(h - y) \tan\left(\frac{\vartheta}{2}\right)$$

Si  $\frac{v_1^2}{2g} \ll h$ , entonces

$$Q = C_t \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\vartheta}{2}\right) \sqrt{2g} h^{5/2}$$

$C_t$  tomando los valores entre 0.58 y 0.62

- Vertedero rectangular  $Q \sim h^{3/2}$
- Vertedero triangular  $Q \sim h^{5/2}$

El vertedero triangular es recomendable para medidas de caudal en un amplio rango de valores. Al disminuir  $Q$ ,  $h$  disminuye, pero la sección de paso también disminuye, es decir, los vertederos triangulares son más precisos que los rectangulares a bajos caudales.

#### 4.4.5 OTRAS CURVAS HIDRÁULICAS.



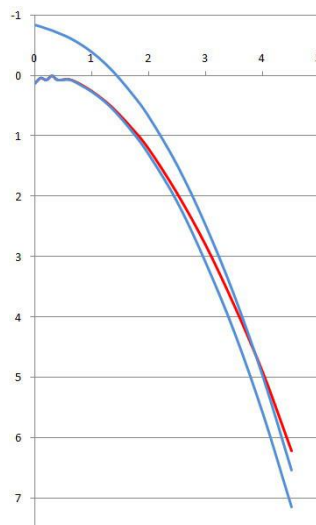
*Figura 63: Vertedero que muestra el perfil de Creager.*

##### 4.4.5.1 Perfil de Creager.

El perfil de Creager tiene como objetivo acompañar el agua que rebosa y desagua por los aliviaderos, de manera que se reduzca al máximo los efectos negativos que una salida descontrolada podría ejercer sobre los paramentos de la estructura ya que entonces se producirían oscilaciones de presión sobre los paramentos que o bien los erosionan (si las presiones son positivas) o los desconchan (si son negativas)

Con la presencia del perfil de Creager el agua se desliza suavemente por la superficie del aliviadero, ya que este sigue la trayectoria de la curva que trazaría la lámina de agua cayendo a lámina libre, consiguiendo una presión sobre el parámetro ligeramente positiva, pero muy pequeña, ...

Para la representación de este perfil, la curva intenta seguir la napa de agua que, con un espesor de un metro en cabeza, se produciría en caída libre, pero de manera que se desarrolla desde la rasante inferior hacia la rasante superior, con lo que se asegura que nunca haya presiones negativas. La representación gráfica de este perfil es el siguiente:



*Figura 64: Representación gráfica de Perfil de Creager.*

Numéricamente, la curva puede obtenerse a partir de los siguientes parámetros adimensionales, para una franja de agua de 1 m de espesor, con lo que sólo hay que efectuar los escalados necesarios para adaptarlos a otros espesores de lámina de agua en cabeza del perfil.

| X   | Y         |                |               |
|-----|-----------|----------------|---------------|
|     | Paramento | Chorro teórico |               |
|     |           | Cara superior  | Cara inferior |
| 0   | 0.126     | -0.831         | 0.126         |
| 0.1 | 0.036     | -0.803         | 0.036         |
| 0.2 | 0.07      | -0.772         | 0.07          |
| 0.3 | 0         | -0.74          | 0             |
| 0.4 | 0.07      | -0.702         | 0.07          |
| 0.6 | 0.06      | -0.62          | 0.063         |
| 0.8 | 0.142     | -0.511         | 0.153         |
| 1   | 0.257     | -0.38          | 0.267         |
| 1.2 | 0.397     | -0.219         | 0.41          |
| 1.4 | 0.565     | -0.03          | 0.59          |
| 1.7 | 0.87      | 0.305          | 0.92          |
| 2   | 1.22      | 0.693          | 1.31          |
| 2.5 | 1.96      | 1.5            | 2.1           |
| 3   | 2.82      | 2.5            | 3.11          |
| 3.5 | 3.82      | 3.66           | 4.26          |
| 4   | 4.93      | 5              | 5.61          |
| 4.5 | 6.22      | 6.54           | 7.15          |

*Figura 65: Parámetros adimensionales del Perfil de Creager.*

#### **4.4.5.2 Perfil de Bradley.**

Este perfil es una simplificación del perfil Creager, desarrollado por la US Bureau of Reclamation. Se trata de un perfil obtenido mediante arcos de circunferencia.

La idea es la misma que para el Perfil Creager, pero en este caso la curva hidráulica resultante es mucho más tendida, con lo que para una misma caída de agua se necesita mucha más distancia de desarrollo. Con todo se trata también de una curva muy empleada en aliviaderos de presas.

Para definirla, aunque se trate de una “simplificación”, no se obtiene de manera inmediata... ya que se trata de una sucesión de curvas cuyos radios son proporcionales a la altura de lámina de agua en la cabeza del perfil, desde 0'021 veces la altura hasta 12 veces ya en descarga. A continuación, se muestra esta curva en la siguiente figura,

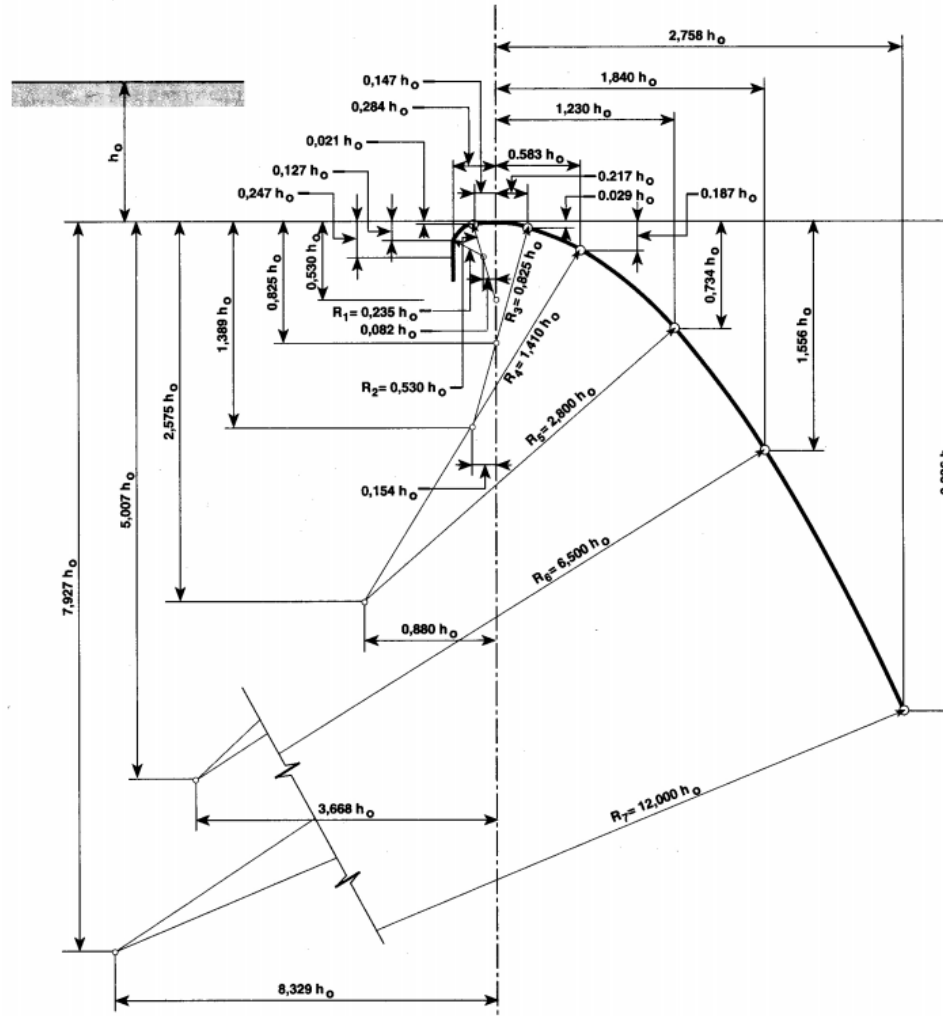


Figura 66: Representación de la curva del perfil de Bradley.

#### 4.4.6 VERTEDEROS DE PARED GRUESA.

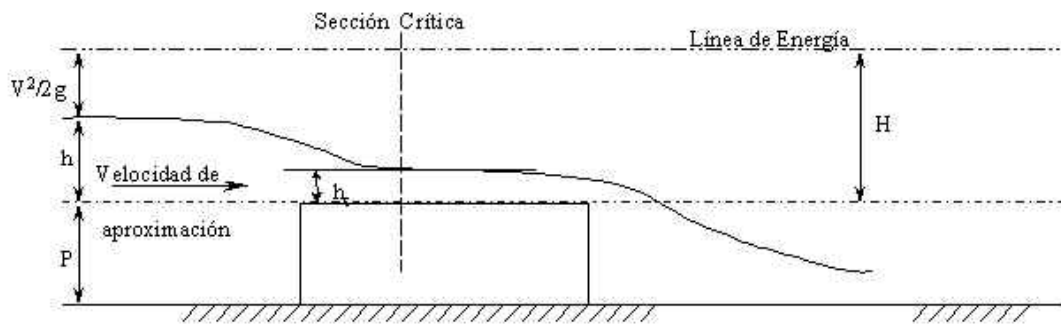


Figura 67: crítico sobre vertederos de pared gruesa.

$$L > 3h$$

$$\text{Normalmente } 0.08 < \frac{H}{L} < 0.5$$

$$Y_1 + \frac{u_1^2}{2g} = H + Y_2 + \frac{u_2^2}{2g} = \frac{3}{2}Y_2 + H$$

$$H + h + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{3}{2}Y_2 + H$$

$$Y_2 = \frac{2}{3} \left( h + \frac{u_1^2}{2g} \right) \sim \frac{2}{3}h$$

$$Q = wY_2v_2 = wY_2\sqrt{gY_2} = w\sqrt{g}Y_2^{3/2} = w\sqrt{g}\left(\frac{2}{3}\right)^{3/2}h^{3/2}$$

$$Q = C_g w \sqrt{g} \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} h^{3/2}$$

$$\text{siendo } C_g = \frac{0.65}{\left(1 + \frac{h}{H}\right)^{1/2}}$$

#### 4.4.7 RESULTADOS DE ENSAYOS.

##### 4.4.7.1 Vertedero de pared delgada rectangular.

Los datos iniciales tomados en el laboratorio son

Altura en reposo = 0.218 m  
H (V. Contracc) = 0.224 m  
B (ancho del canal) = 0.400 m  
b (ancho del vertedero) = 0.250 m  
L (longitud de varilla) = 0.350 m

Los datos tomados en la Sección 1: aguas arriba en altura de carga se muestran en la siguiente tabla

| Frecuencia [Hz] | $h_1$ [mm] | $h_2$ [mm] | $\Delta h_1$ [m] | $D_1$ [mm] | $Y_1$ [m] | $V_1$ [m/s] | $Q_1$ [m <sup>3</sup> /s] |
|-----------------|------------|------------|------------------|------------|-----------|-------------|---------------------------|
| 20              | 180        | 179        | 0.001            | 141        | 0.309     | 0.140       | 0.017                     |
| 25              | 179        | 177        | 0.002            | 140        | 0.31      | 0.198       | 0.025                     |
| 30              | 176        | 175        | 0.001            | 135        | 0.315     | 0.140       | 0.018                     |
| 35              | 173        | 172        | 0.001            | 136        | 0.314     | 0.140       | 0.018                     |
| 40              | 172        | 174        | 0.002            | 136        | 0.314     | 0.198       | 0.025                     |
| 45              | 171        | 173        | 0.002            | 136        | 0.314     | 0.198       | 0.025                     |
| 50              | 173        | 172        | 0.001            | 136        | 0.314     | 0.140       | 0.018                     |

Tabla 39: Datos para Vertedero rectangular (Ensayo 1).

Para todos los valores de frecuencia dados  $Y_2 = 0.226$  m

Siendo D la longitud de varilla, Y el calado, v la velocidad y Q el caudal experimental

A continuación, se calcula la altura de carga h para todos los valores calculados a partir de todas las frecuencias,

$$h = y_1 - H$$

| Altura de carga [m] |
|---------------------|
| 0.085               |
| 0.086               |
| 0.091               |
| 0.09                |
| 0.09                |
| 0.09                |
| 0.09                |

Tabla 40: Altura de carga vertedero rectangular (Ensayo 1).

Haciendo uso de la fórmula para el cálculo del caudal teórico

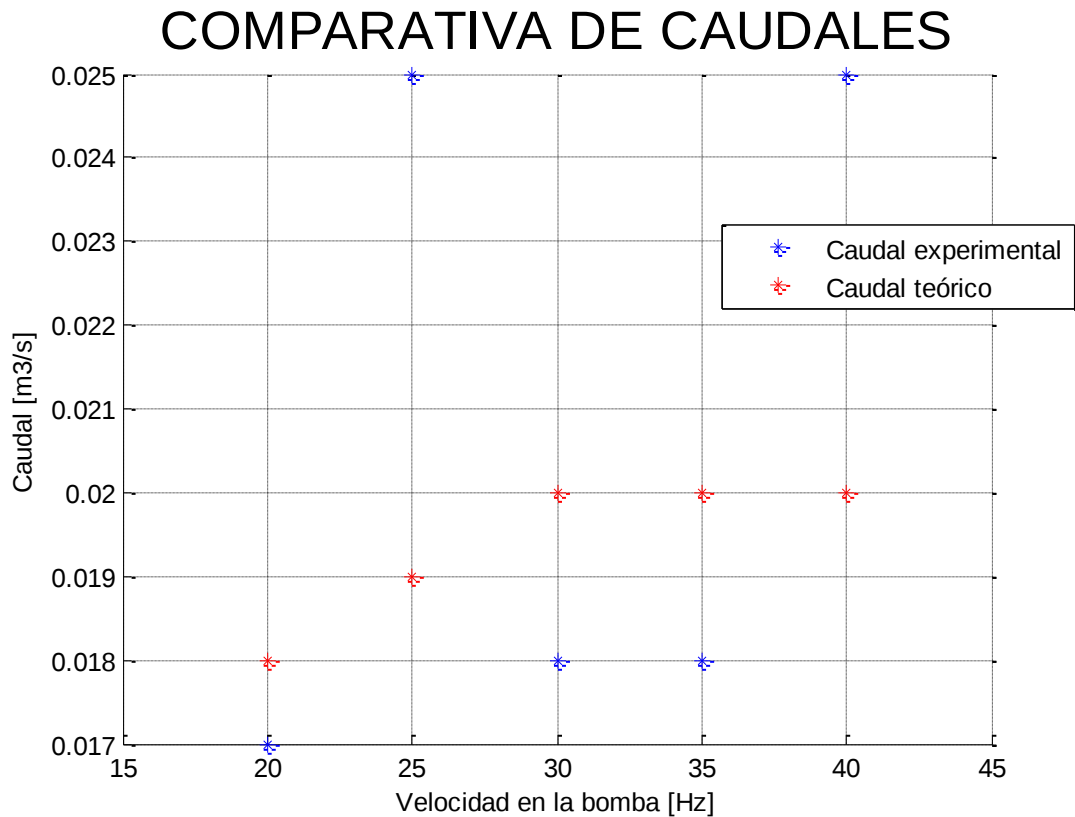
$$Q_t = C_d \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\sigma}{2}\right) \sqrt{2gh}^{5/2}$$

$$C_d = 0.593$$

| $Q_{\text{teórico}}$ [m <sup>3</sup> /s] | $C_d$ experimental | $C_d$ teórico |
|------------------------------------------|--------------------|---------------|
| 0.018                                    | 0.946              | 0.663         |
| 0.663                                    | 1.319              | 0.663         |
| 0.020                                    | 0.871              | 0.662         |
| 0.019                                    | 0.883              | 0.662         |
| 0.019                                    | 0.125              | 0.662         |

Tabla 41: Caudales y Coeficientes para vertedero rectangular (Ensayo 1).

A continuación, se muestra una gráfica comparativa de caudales, tanto caudal teórico como caudal experimental, en la que se reflejan los puntos como valores de caudal obtenidos.



En esta gráfica se puede observar que los valores del caudal experimental desvarían. Esto puede ser debido a que en ocasiones la bomba presentaba un comportamiento inestable.

➔ Un segundo ensayo se hizo en el que se obtuvieron los siguientes datos,  
Los datos iniciales tomados en el segundo ensayo en el laboratorio son

Altura en reposo = 0.218 m  
 H (V. Contracc) = 0.224 m  
 B (ancho del canal) = 0.400 m  
 b (ancho del vertedero) = 0.250 m  
 L (longitud de varilla) = 0.350 m

Los datos tomados en la Sección 1: aguas arriba en altura de carga se muestran en la siguiente tabla

| Frecuencia | h1 Pitot [mm] | h2 Pitot [mm] | $\Delta h1$ (Pitot) [m] | D1 (varilla) [mm] | calado y1 [m] | V1 [m/s] | Q1 exper [m <sup>3</sup> /s] |
|------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------|---------------|----------|------------------------------|
| 20         | 220           | 221           | 0,001                   | 41                | 0,409         | 0,140    | 0,023                        |
| 25         | 215           | 213           | 0,002                   | 33                | 0,417         | 0,198    | 0,033                        |
| 30         | 216           | 217           | 0,001                   | 29                | 0,421         | 0,140    | 0,024                        |
| 35         | 209           | 210           | 0,001                   | 27                | 0,423         | 0,140    | 0,024                        |
| 40         | 209           | 208           | 0,001                   | 24                | 0,426         | 0,140    | 0,024                        |
| 45         | 207           | 208           | 0,001                   | 23                | 0,427         | 0,140    | 0,024                        |
| 50         | 206           | 207           | 0,001                   | 22                | 0,428         | 0,140    | 0,024                        |

Tabla 42: Datos para Vertedero rectangular (Ensayo 2).

Para todos los valores de frecuencia dados  $Y_2 = 0.226$  m

Siendo D la longitud de varilla, Y el calado, v la velocidad y Q el caudal experimental

A continuación, se calcula la altura de carga h para todos los valores calculados a partir de todas las frecuencias,

$$h = y_1 - H$$

| h (altura carga)[m] |
|---------------------|
| h = y1 - H          |
| 0,185               |
| 0,193               |
| 0,197               |
| 0,199               |
| 0,202               |
| 0,203               |
| 0,204               |
| 0,226               |

Tabla 43: Altura de carga vertedero rectangular (Ensayo 2).

Haciendo uso de la fórmula para el cálculo del caudal teórico

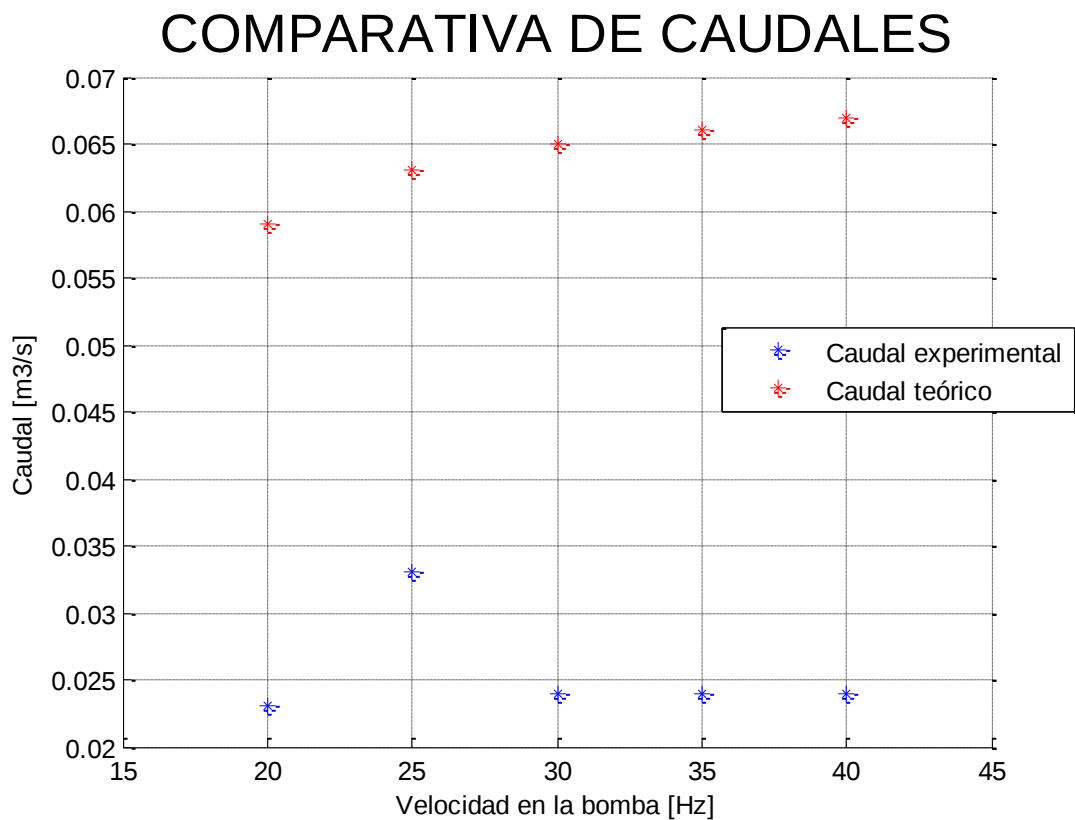
$$Q_t = C_d \frac{8}{15} \tan\left(\frac{\sigma}{2}\right) \sqrt{2gh}^{5/2}$$

$$C_d = 0.593$$

| Q teóric [m <sup>3</sup> /s] | Cd experiment. | Cd teórico  |
|------------------------------|----------------|-------------|
| 0,0587                       | 0,390100904    | 0,656639077 |
| 0,0626                       | 0,52786921     | 0,65623912  |
| 0,0646                       | 0,365421418    | 0,656037632 |
| 0,0655                       | 0,361636281    | 0,655936504 |
| 0,0670                       | 0,356117886    | 0,655784334 |

Tabla 44: Caudales y Coeficientes para vertedero rectangular (Ensayo 2).

A continuación, se muestra una gráfica comparativa de caudales, tanto caudal teórico como caudal experimental, en la que se reflejan los puntos como valores de caudal obtenidos.



#### 4.4.7.2 Vertedero de pared delgada triangular.

Los datos iniciales tomados en el laboratorio son,

Altura en reposo = 0.218 m  
 H (V. Triangular) = 0.108 m  
 B (ancho del canal) = 0.400 m  
 b (ancho del vertedero) = 0.250 m  
 Alfa vertiente triangular = 0.785 grados  
 L (longitud de varilla) = 0.350 m

Los datos tomados en la Sección 1: aguas arriba en altura de carga se muestran en la siguiente tabla

| h1 Pitot [mm] | h2 Pitot [mm] | $\Delta h1$ (Pitot) [m] | D1 (varilla) [mm] | calado y1 [m] | V1 [m/s] | Q1 exper [m <sup>3</sup> /s] |
|---------------|---------------|-------------------------|-------------------|---------------|----------|------------------------------|
| 181           | 184           | 0,003                   | 145               | 0,305         | 0,243    | 0,029                        |
| 176           | 178           | 0,002                   | 139               | 0,311         | 0,198    | 0,025                        |
| 179           | 175           | 0,004                   | 135               | 0,315         | 0,280    | 0,035                        |
| 170           | 172           | 0,002                   | 134               | 0,316         | 0,198    | 0,025                        |
| 170           | 171           | 0,001                   | 135               | 0,315         | 0,140    | 0,018                        |
| 170           | 171           | 0,001                   | 135               | 0,315         | 0,140    | 0,018                        |
| 169           | 171           | 0,002                   | 135               | 0,315         | 0,198    | 0,025                        |

Tabla 45: Datos para Vertedero triangular (Ensayo 1).

A continuación, se muestra los datos tomados en la Sección 2: cresta del vertedero.

En la sección 2, lo que llamamos calado  $y_2$  realmente es la altura del triángulo, que será utilizada para determinar la sección del triángulo de salida, que junto con la velocidad en dicha sección nos permite obtener el caudal en la sección 2.

Para todos los valores de frecuencia dados  $Y_2 = 0.342$  m

Siendo D la longitud de varilla, Y el calado, v la velocidad y Q el caudal experimental

A continuación, se calcula la altura de carga h para todos los valores calculados a partir de todas las frecuencias,

$$h = y_1 - H$$

| h = y1 - H |
|------------|
| 0,197      |
| 0,203      |
| 0,207      |
| 0,208      |
| 0,207      |

Tabla 46: Altura de carga vertedero triangular (Ensayo 1).

Haciendo uso de la formula anterior para el cálculo del caudal teórico

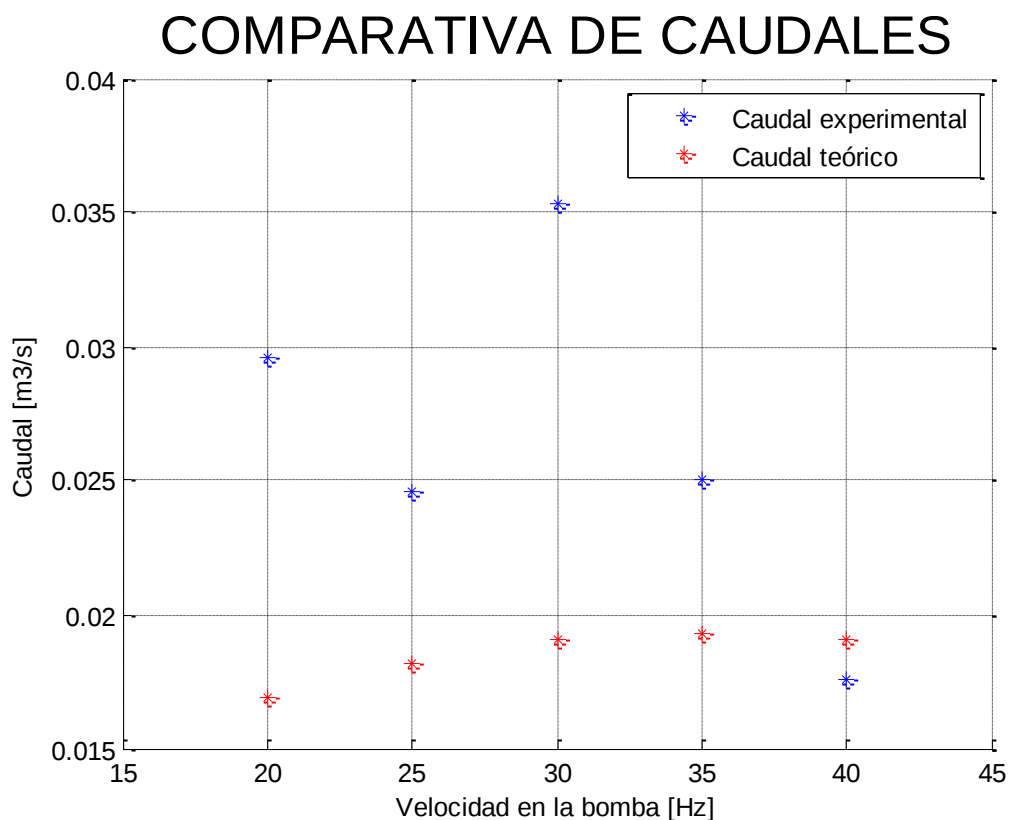
$$Q_t = C_d \frac{8}{15} b \sqrt{2g} h^{5/2} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$C_d = 0.593$$

| Q teóric<br>[m <sup>3</sup> /s] | Cd<br>experiment. | Cd teórico |
|---------------------------------|-------------------|------------|
| 0,0169                          | 1,756029672       | 0,593      |
| 0,0182                          | 1,356351465       | 0,593      |
| 0,0191                          | 1,850340414       | 0,593      |
| 0,0193                          | 1,296822962       | 0,593      |
| 0,0191                          | 0,925170207       | 0,593      |

Tabla 47: Caudales y Coeficientes para vertedero triangular (Ensayo 1).

A continuación, se muestra una gráfica comparativa de caudales, tanto caudal teórico como caudal experimental, en la que se reflejan los puntos como valores de caudal obtenidos.



Al igual que en la gráfica del apartado anterior, vertedero rectangular, los puntos presentan cierta desviación.

➔ Un segundo ensayo se hizo en el que se obtuvieron los siguientes datos,

Los datos iniciales tomados en el laboratorio son

Altura en reposo = 0.218 m  
 H (V. Triangular) = 0.108 m  
 B (ancho del canal) = 0.400 m  
 b (ancho del vertedero) = 0.250 m  
 Alfa vertiente triangular = 0.785 grados  
 L (longitud de varilla) = 0.350 m

Los datos tomados en la Sección 1: aguas arriba en altura de carga se muestran en la siguiente tabla

| h1 Pitot (mm) | h2 Pitot (mm) | $\Delta h1$ (Pitot) (m) | D1 (varilla) (mm) | calado y1 (m) | V1 (m/s) | Q1 exper (m3/s) |
|---------------|---------------|-------------------------|-------------------|---------------|----------|-----------------|
| 230           | 231           | 0,001                   | 48                | 0,402         | 0,140    | 0,023           |
| 225           | 226           | 0,001                   | 40                | 0,41          | 0,140    | 0,023           |
| 218           | 217           | 0,001                   | 32                | 0,418         | 0,140    | 0,023           |
| 215           | 216           | 0,001                   | 30                | 0,42          | 0,140    | 0,024           |
| 212           | 213           | 0,001                   | 27                | 0,423         | 0,140    | 0,024           |
| 211           | 212           | 0,001                   | 26                | 0,424         | 0,140    | 0,024           |
| 211           | 212           | 0,001                   | 26                | 0,424         | 0,140    | 0,024           |

Tabla 48: Datos para Vertedero triangular (Ensayo 2).

A continuación, se muestra los datos tomados en la Sección 2: cresta del vertedero.

En la sección 2, lo que llamamos calado  $y_2$  realmente es la altura del triángulo, que será utilizada para determinar la sección del triángulo de salida, que junto con la velocidad en dicha sección nos permite obtener el caudal en la sección 2.

Para todos los valores de frecuencia dados  $Y_2 = 0.342$  m

Siendo D la longitud de varilla, Y el calado, v la velocidad y Q el caudal experimental.

A continuación, se calcula la altura de carga h para todos los valores calculados a partir de todas las frecuencias,

$$h = y_1 - H$$

| <b>h = y1 - H</b> |
|-------------------|
| 0,294             |
| 0,302             |
| 0,31              |
| 0,312             |
| 0,315             |

Tabla 49: Altura de carga vertedero triangular (Ensayo 2).

Haciendo uso de la formula anterior para el cálculo del caudal teórico

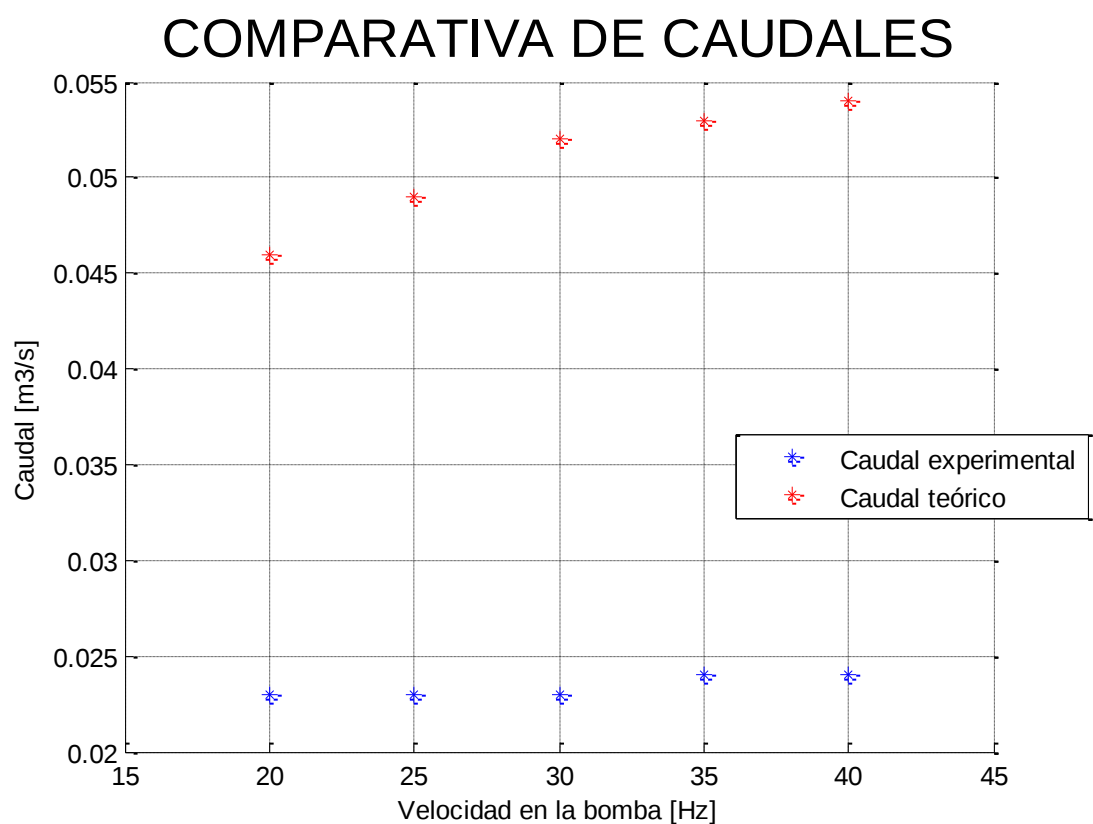
$$Q_t = C_d \frac{8}{15} b \sqrt{2g} h^{5/2} \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$C_d = 0.593$$

| Q teóric [m3/s] | Cd experiment. | Cd teórico |
|-----------------|----------------|------------|
| 0,0459          | 0,491          | 0,593      |
| 0,0490          | 0,468          | 0,593      |
| 0,0524          | 0,447          | 0,593      |
| 0,0532          | 0,442          | 0,593      |
| 0,0545          | 0,435          | 0,593      |

Tabla 50: Caudales y Coeficientes para vertedero triangular (Ensayo 2).

A continuación, se muestra una gráfica comparativa de caudales, tanto caudal teórico como caudal experimental, en la que se reflejan los puntos como valores de caudal obtenidos.



#### 4.4.7.3 Vertedero de pared gruesa.

Los datos iniciales tomados en el laboratorio son

Altura en reposo = 0.218 m  
 H (V. Grueso) = 0.15 m  
 B (ancho del canal) = 0.400 m  
 b (ancho del vertedero) = 0.250 m  
 L (longitud de varilla) = 0.350 m

Los datos tomados en la Sección 1: aguas arriba en altura de carga se muestran en la siguiente tabla

| h1 Pitot [mm] | h2 Pitot [mm] | $\Delta h1$ (Pitot) [m] | D1 (varilla) [mm] | calado y1 [m] | V1 [m/s] | Q1 exper [m <sup>3</sup> /s] |
|---------------|---------------|-------------------------|-------------------|---------------|----------|------------------------------|
| 236           | 239           | 0,003                   | 200               | 0,25          | 0,243    | 0,024                        |
| 219           | 225           | 0,006                   | 186               | 0,264         | 0,343    | 0,036                        |
| 210           | 214           | 0,004                   | 176               | 0,274         | 0,280    | 0,031                        |
| 206           | 212           | 0,006                   | 178               | 0,272         | 0,343    | 0,037                        |
| 204           | 213           | 0,009                   | 175               | 0,275         | 0,420    | 0,046                        |
| 206           | 214           | 0,008                   | 176               | 0,274         | 0,396    | 0,043                        |

Tabla 51: Datos para Vertedero Grueso (Ensayo 1).

Para todos los valores de frecuencia dados  $Y_2 = 0.300$  m

Siendo D la longitud de varilla, Y el calado, v la velocidad y Q el caudal experimental.

A continuación, se calcula la altura de carga h para todos los valores calculados a partir de todas las frecuencias,

$$h = y_1 - H$$

| <b>h = y1 - H</b> |
|-------------------|
| 0,1               |
| 0,114             |
| 0,124             |
| 0,122             |
| 0,125             |

Tabla 52: Altura de carga vertedero grueso (Ensayo 1).

Haciendo uso de la fórmula para el cálculo del caudal teórico

$$Q_t = C_d \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{2}{3} \sqrt{2gb} h^{3/2} = C_d 0.577 \frac{2}{3} \sqrt{2gb} h^{3/2}$$

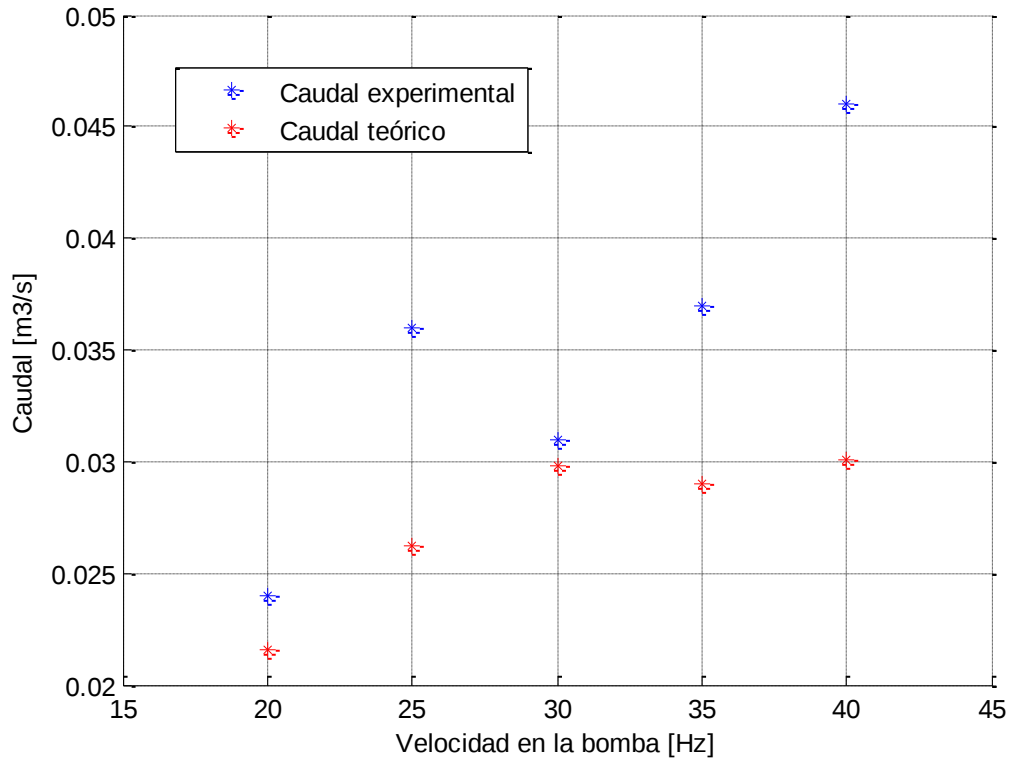
$$C_d = \frac{0.65}{\sqrt{1 + \frac{h}{H}}}$$

| Q teóric (m3/s) | Cd experiment. | Cd teórico |
|-----------------|----------------|------------|
| 0,0216          | 1,126          | 0,503      |
| 0,0262          | 1,381          | 0,489      |
| 0,0298          | 1,032          | 0,481      |
| 0,0290          | 1,285          | 0,483      |
| 0,0301          | 1,535          | 0,480      |

Tabla 53: Caudales y Coeficientes para vertedero grueso (Ensayo 1).

A continuación, se muestra una gráfica comparativa de caudales, tanto caudal teórico como caudal experimental, en la que se reflejan los puntos como valores de caudal obtenidos.

## COMPARATIVA DE CAUDALES



Como en la gráfica anterior, problemas de la bomba.

➔ Un segundo ensayo se hizo en el que se obtuvieron los siguientes datos,  
Los datos iniciales tomados en el laboratorio son

Altura en reposo = 0.125 m  
 H (V. Grueso) = 0.15 m  
 B (ancho del canal) = 0.400 m  
 b (ancho del vertedero) = 0.250 m  
 L (longitud de varilla) = 0.350 m

Los datos tomados en la Sección 1: aguas arriba en altura de carga se muestran en

| h1 Pitot [mm] | h2 Pitot [mm] | $\Delta h1$ (Pitot) [m] | D1 (varilla) [mm] | calado y1 [m] | V1 [m/s]    | Q1 exper [m <sup>3</sup> /s] |
|---------------|---------------|-------------------------|-------------------|---------------|-------------|------------------------------|
| 303           | 304           | 0,001                   | 119               | 0,181         | 0,14007141  | 0,01014117                   |
| 295           | 297           | 0,002                   | 111               | 0,189         | 0,198090888 | 0,014975671                  |
| 290           | 292           | 0,002                   | 107               | 0,193         | 0,198090888 | 0,015292617                  |
| 289           | 290           | 0,001                   | 104               | 0,196         | 0,14007141  | 0,010981599                  |
| 287           | 288           | 0,001                   | 103               | 0,197         | 0,14007141  | 0,011037627                  |
| 287           | 288           | 0,001                   | 101               | 0,199         | 0,14007141  | 0,011149684                  |
| 286           | 288           | 0,002                   | 102               | 0,198         | 0,198090888 | 0,015688798                  |

Tabla 54: Datos para Vertedero Grueso (Ensayo 2).

Para todos los valores de frecuencia dados  $Y_2 = 0.300$  m

Siendo D la longitud de varilla, Y el calado, v la velocidad y Q el caudal experimental.

A continuación, se calcula la altura de carga h para todos los valores calculados a partir de todas las frecuencias,

$$h = y_1 - H$$

| <b>h = y1 - H</b> |
|-------------------|
| 0,031             |
| 0,039             |
| 0,043             |
| 0,046             |
| 0,047             |

Tabla 55: Altura de carga vertedero grueso (Ensayo 2).

Haciendo uso de la fórmula para el cálculo del caudal teórico

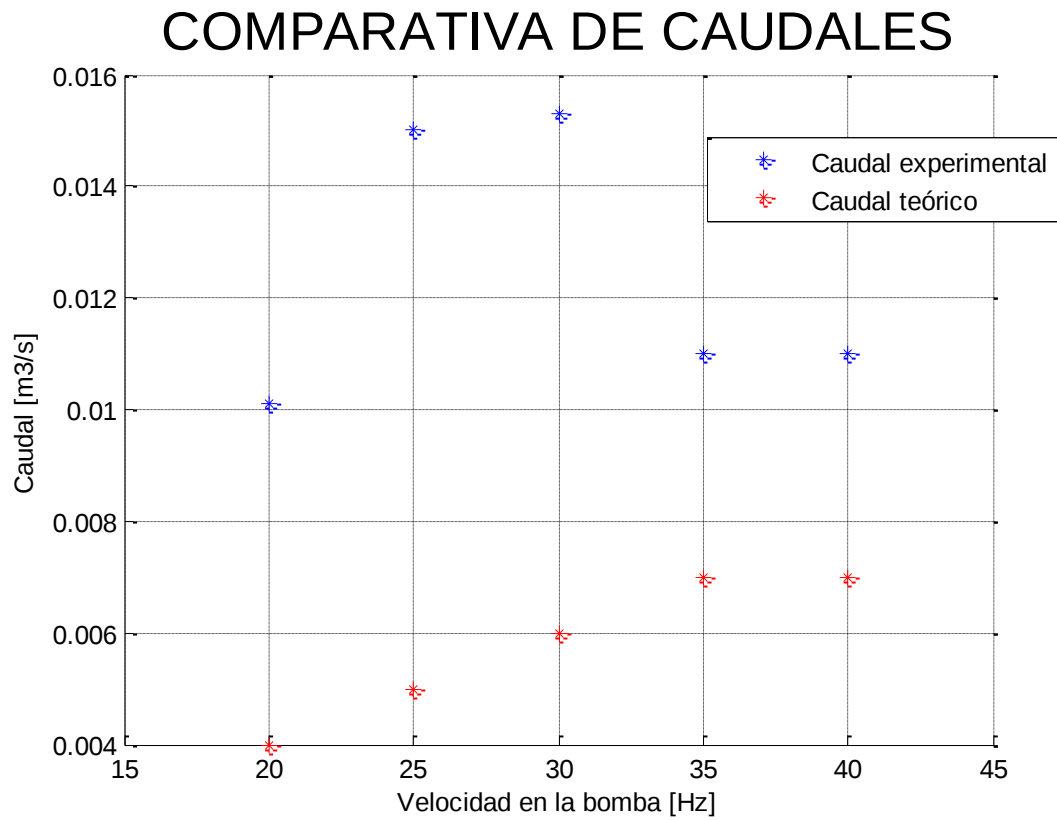
$$Q_t = C_d \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{2}{3} \sqrt{2gb} h^{3/2} = C_d 0.577 \frac{2}{3} \sqrt{2gb} h^{3/2}$$

$$C_d = \frac{0.65}{\sqrt{1 + \frac{h}{H}}}$$

| Q teóric [m <sup>3</sup> /s] | Cd experiment. | Cd teórico |
|------------------------------|----------------|------------|
| 0,0037                       | 2,7261         | 0,592      |
| 0,0052                       | 2,853          | 0,579      |
| 0,0061                       | 2,516          | 0,573      |
| 0,0067                       | 1,633          | 0,569      |
| 0,0069                       | 1,589          | 0,567      |

Tabla 56: Caudales y Coeficientes para vertedero grueso (Ensayo 2).

A continuación, se muestra una gráfica comparativa de caudales, tanto caudal teórico como caudal experimental, en la que se reflejan los puntos como valores de caudal obtenidos.



## CAPÍTULO 5

### 5 CONCLUSIONES

Durante este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado un estudio teórico - experimental para la caracterización de un flujo a lo largo de un canal hidrodinámico. Como indican los objetivos se ha hecho al principio de este trabajo un estudio de la teoría sobre el flujo en canales abiertos para después proceder a la realización del estudio de la velocidad del flujo en canales abierto y el análisis de los elementos que permiten variar la sección transversal del canal, como obstáculos y estrechamientos. A parte, se ha estudiado también el comportamiento del flujo en un resalto de forma teórica y experimental.

- El estudio del resalto hidráulico, correspondiente al punto 4.1, se ha caracterizado por una introducción teórica en la cual se han desarrollado los parámetros y ecuaciones a tener en cuenta para después obtener una tabla de resultados donde se ha obtenido una gráfica de variación de  $\Delta h/y_1$  en función del número de Froude, aguas arriba, en la cual se ha observado que los resultados experimentales tienen cierta tendencia a ajustarse a la curva teórica.
- En el estudio del Efecto Venturi se observa como el flujo se acelera rápidamente al pasar por el estrechamiento y después vuelve a decelerar, calculando así el punto crítico cuando la velocidad es máxima y el  $F_r = 1$ .
- En cuanto a resaltos de fondo, puede comprobarse que los resultados teóricos y experimentales se alejan más cuando la velocidad es mayor o la variación de la sección transversal con la distancia, por ello hay gráficos como los del apartado subcrítico subcrítico que no se corresponden con la teoría, es decir, las pérdidas por fricción despreciables son válidas para una aproximación de perfil de la superficie libre y de la distribución de energía a lo largo del flujo de forma teórica.
- En el apartado de vertederos se ha calculado el caudal que pasa a través del canal, así como la velocidad y otros parámetros. Finalmente se han hallado unas gráficas en las cuales se comparan los resultados teórico y experimental de los caudales. En estas gráficas algunos puntos se desvían de su trayectoria, esto puede ser debido al problema que presentaba la bomba de inestabilidad en ciertas ocasiones.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

En la bibliografía de este Trabajo de fin de Grado se han utilizado varias páginas web en la que se ha seleccionado la información más relevante de cada una de ellas.

- CAPÍTULO 1

- <http://www.enier.com/la-historia-de-la-ingenieria-hidraulica-en-pocas-palabras/>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Canal\\_\(ingenier%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Canal_(ingenier%C3%ADa))
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%A1ulica>
- <https://civilgeeks.com/2010/11/10/clasificacion-del-flujo-en-canales-abiertos/>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Estado\\_de\\_flujo\\_hidr%C3%A1ulico](https://es.wikipedia.org/wiki/Estado_de_flujo_hidr%C3%A1ulico)
- <https://es.wikibooks.org/wiki/Hidrosistemas/Hidr%C3%A1ulica>
- <https://www.cuevadelcivil.com/2011/02/energia-del-flujo-en-canales-abiertos.html>
- [http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/41245/mecanica\\_fluidos\\_cap03.pdf?sequence=9](http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/41245/mecanica_fluidos_cap03.pdf?sequence=9)

- CAPÍTULO 2

- <http://www.flowmeters.com/ultrasonic-technology>
- <https://hernanleon1002.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/segundo-corte/marco-teorico/tubo-Pitot/>

- CAPÍTULO 3

- [http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/2.0\\_propiedades\\_seccion\\_transversal.pdf](http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/2.0_propiedades_seccion_transversal.pdf)
- [https://www.fing.edu.uy/imfia/imfiaweb/sites/default/files/Teo5\\_10\\_b.pdf](https://www.fing.edu.uy/imfia/imfiaweb/sites/default/files/Teo5_10_b.pdf)

Manual de Instrucciones “Canal hidráulico (Túnel Hidrodinámico)”, Vázquez y Torres S.L.

- CAPÍTULO 4

- <http://www.hidrojing.com/unas-curvas-hidraulicamente-favorecedoras/>