

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL**



“DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE VELOCIDAD DE CORIOLIS (α) Y BOUSSINESQ (β) PARA FLUJO SUBCRITICO, CRITICO Y SUPERCRITICO EN CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO”

**TESIS
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

Línea de Investigación : Hidráulica

AUTORES:

BACH. MARIO ALEJANDRO CASTILLO BUSTAMANTE

BACH. DAN HUMBERTO VELASQUEZ ROSALES

ASESOR:

DR. SAGASTEGUI PLASENCIA FIDEL GERMAN

TRUJILLO – PERÚ

2017

N° REGISTRO _____

MIEMBROS DEL JURADO CALIFICADOR

Tesis : “DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE VELOCIDAD DE CORIOLIS (α) Y BOUSSINESQ (β) PARA FLUJO SUBCRITICO,CRITICO Y SUPERCRITICO EN CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONOR ORREGO .”

Presentada por:

BACH. MARIO ALEJANDRO CASTILLO BUSTAMANTE

BACH. DAN HUMBERTO VELASQUEZ ROSALES

Aprobado por el jurado:

Ms. MANUEL GARCIA- NARANJO BUSTOS
PRESIDENTE

Ms. JOSE LUIS SERRANO HERNANDEZ
SECRETARIO:

Ms. RICARDO ANDRES NARVAEZ ARANDA
VOCAL

Dr. FIDEL GERMAN SAGASTEGUI PLASENCIA
ASESOR

DEDICATORIA

**A mis queridos Padres: Angel Humberto y Belin Araceli
Quienes me apoyaron e inculcaron Valores y
que han hecho en mí ; una persona integral.**

**A mi hermana Lizbeth Araceli, que sea
un ejemplo, para seguir con el ánimo y
perseverancia hasta culminar su meta.**

DAN HUMBERTO

DEDICATORIA

A mis queridos Padres: Edgar David y Adriana Amelia
Quienes me apoyaron e inculcaron Valores y
que han hecho en mí ; una persona integral
y para Culminar mi meta trazada.

A mi hermano Gabriel Alonso, que sea
un ejemplo, para seguir con el ánimo y
perseverancia hasta culminar su meta.

MARIO ALEJANDRO

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro agradecimiento a todos los Docentes de la Carrera Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Privada Antenor Orrego, y en especial a nuestro Asesor de Tesis Dr. Fidel German Sagastegui Plasencia, quien con mucha tolerancia y predisposición en todo momento, nos brindó el asesoramiento oportuno para culminar nuestra Tesis.

Así mismo debemos agradecer a los técnicos del laboratorio de Hidráulica de nuestra Universidad y en especial al Sr. Homero Santiago Calvo Reyes; por su apoyo valioso, para realizar nuestro trabajo de investigación en el Canal de Pendiente Variable del laboratorio de Hidráulica y en el canal Triangular, accesorio de 2 metros, el cual dejamos para el Laboratorio de Hidráulica para el uso y aprendizaje académico de los estudiantes de Ingeniería Civil.

Los Autores

PRESENTACION

SEÑORES MIEMBROS DEL JURADO:

Dando cumplimiento al Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego, es grato poner a vuestra consideración, la presente Tesis titulada : **“DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE VELOCIDAD DE CORIOLIS (α) Y BOUSSINESQ (β) PARA FLUJO SUBCRITICO,CRITICO Y SUPERCRITICO EN CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO “** ; con el propósito de obtener nuestro Título Profesional de Ingeniero Civil.

Los Autores

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I : INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema:.....	3
1.2 Formulación del problema.	6
1.3 Alcance	6
1.4 Justificación.....	8
1.5 Hipótesis	9
1.6 Objetivos	10
1.6.1 General.....	10
1.6.2 Específicos	10
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	11
2.1 Antecedentes de la investigación	11
2.2 Fundamentación teórica de la investigación	15
2.2.1 Definiciones.	15
2.2.1.1. Flujo de canales abiertos	15
2.2.1.2 Distribucion de velocidades en una seccion de canal	17
2.2.1.3 Numero de Froude	18
2.2.1.4 Flujo Permanente y Uniforme.....	19
2.2.1.5 Numero de Reynolds	20
2.2.1.6 Distribucion de velocidades en una seccion transv. y Long.....	23
2.2.1.7 Relaciones para la Velocidad Media	26
2.2.1.8 Distribucion de Velocidades en canal abierto.	27
2.2.1.9 Coeficiente de Coriolis	27
2.2.1.10 Coeficiente de Boussinesq	28
2.2.1.11 Regimen Subcritico	30
2.2.1.12 Regimen Supercritico	30
2.2.1.13 Ecuaciones Generalkes de los Flujos	31
2.2.1.14 Energia Especifica de Canales	35
2.2.1.15 Tirante Critico para canales Rectangulares	38
2.3 Variables	40
2.3.1 Variable Independiente.	40
2.3.2 Variable Dependiente.	40
CAPÍTULO III : METODOLOGÍA	41
3.1 Población y Muestra.....	41
3.1.1 Población.....	41
3.1.2 Muestra.....	42
3.2 Modalidad Básica de la Investigación.....	43
3.3 Nivel o Tipo de Investigación.....	43
3.4 Operacionalización de las Variables.....	45
3.4.1 Variable Independiente.	45
3.4.2 Variable Dependiente.	46
3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	47
3.6 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	47

CAPÍTULO IV: RESULTADOS	51
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	82
CAPÍTULO VI : CONCLUSIONES	84
CAPITULO VII: RECOMENDACIONES	86
CAPÍTULO VIII : REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	87
ANEXO.....	89

RESUMEN

Para estimar el valor de los coeficientes de corrección de velocidad de Coriolis (α) y Boussinesq (β) para flujo subcrítico, crítico y supercrítico en canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la universidad privada Antenor Orrego de Trujillo, se realizó una revisión de las diferentes expresiones presentadas desde los años 50's hasta la información más actualizada sobre el tema.

A partir de esta consulta del estado y revisión de la información, se verificó el correcto funcionamiento de los equipos de toma de datos del canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, donde se tomaron datos de velocidades puntuales en el centro y cerca de las paredes de la sección del canal para diferentes caudales.

Con estos resultados se determinó la forma de distribución de velocidad para el canal Rectangular y para el canal Triangular, la influencia de la rugosidad del fondo del canal y se estimaron matemáticamente los coeficientes de corrección de velocidad de Coriolis (α) y Boussinesq (β) para flujo subcrítico, crítico y supercrítico en canal rectangular de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, y canal Triangular para las ecuaciones de energía y momentum, comparándolos con los valores calculados con las fórmulas presentadas en la presente Tesis.

Entre los valores encontrados de los coeficientes de corrección de velocidad de Coriolis (α) y Boussinesq (β) para flujo suscritico, crítico y supercrítico para el canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, y los valores calculados utilizando las formulas que se presentan en la presente tesis, se evidenció una diferencia en los promedios de los valores calculados por diferentes autores.

Palabras Claves:

Coefficientes de coriolis (α) y boussinesq (β)

Canal de pendiente variable de la UPAO

ABSTRACT

In order to estimate the value of Coriolis (α) and Boussinesq (β) velocity correction coefficients for subcritical, critical and supercritical flow in the variable slope channel of the hydropower laboratory of the private university Antenor Orrego de Trujillo, a review was performed Of the different expressions presented from the 50's to the most up-to-date information on the subject.

From this consultation of the state and revision of the information, the data acquisition equipment of the variable slope channel of the hydraulic laboratory of the Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo was verified, where point velocity data were taken in the center and near the walls of the channel section for different flows.

With these results the velocity distribution form for the Rectangular channel and for the Triangular channel were determined, the influence of the channel bottom roughness and the Coriolis (α) and Boussinesq (β) velocity correction coefficients were mathematically estimated For subcritical, critical and supercritical flow in rectangular channel of variable slope of the Hydraulic Laboratory of the Private University Antenor Orrego of Trujillo, and triangular channel for the equations of energy and momentum, comparing them with the values calculated with the formulas presented in the present thesis .

Among the values of Coriolis (α) and Boussinesq (β) velocity correction coefficients for subcritical, critical and supercritical flow for the variable slope channel of the hydraulic laboratory of the Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, and values Calculated using the formulas presented in this thesis, There is a difference in the averages of the values calculated by different authors.

Keywords:

Coefficients of coriolis (α) and boussinesq (β)

UPAO variable slope channel

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

En un canal abierto la distribución de velocidades se ve afectada por el efecto del esfuerzo de cizalladura que ejerce el fluido en circulación con las paredes del canal, así como con la superficie del aire que lo rodea. Esto origina, que no sea uniforme la forma de la distribución de velocidades y se presente una variación vertical y transversal de las velocidades puntuales a través de la sección.

Desde los estudios de Henri Bazin, se ha encontrado que en canales de laboratorio la distribución de la velocidad en la vertical “por fuera de la zona del perfil donde la fricción del fondo no tiene influencia” puede representarse adecuadamente mediante funciones de tipo potencial o logarítmica.

El cálculo práctico del flujo de masa en términos del caudal (Q) no utiliza la integración en el área de la distribución de velocidad, sino una velocidad media representativa de las velocidades puntuales. Por ésta razón, las magnitudes del flujo de energía y de momentum varían ligeramente tras considerar una distribución de la velocidad o por el contrario toman un valor constante, con lo cual se genera la necesidad de considerar valores de ajuste para los flujos de energía y de momentum. Se determinan mediante los denominados coeficientes de corrección de energía cinética, α (Coriolis) y momentum β (Boussinesq).

“Algunos autores han propuesto el uso del coeficiente de momentum para reemplazar el coeficiente de energía aún en cálculos basados en el principio de energía. Esto no es correcto. El coeficiente de energía o coeficiente de momentum sea utilizado depende de que si se está aplicando el principio de energía o se está aplicando el principio de momentum.

Los dos coeficientes se deducen independientemente de diferentes principios básicos. Ninguno de ellos es errado ni ninguno puede reemplazarse por el otro. Ambos deben utilizarse en el sentido correcto.” (Chow, V.T.1982).

Los dos coeficientes de distribución de velocidades son siempre un poco mayores que el valor límite de la unidad, para el cual la distribución de velocidades es estrictamente uniforme a través de la sección del canal.

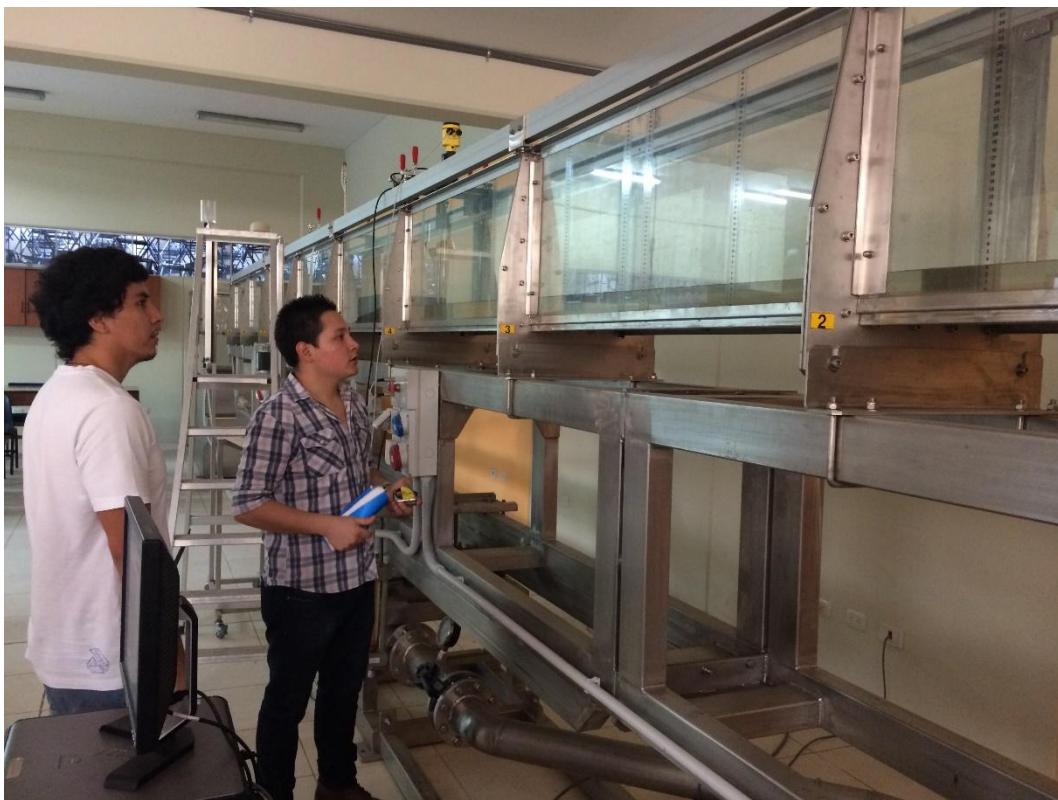
Para canales de sección transversal regular y alineamiento más o menos recto, el efecto de la distribución no uniforme de velocidades en el cálculo de la altura de velocidad y el momentum es pequeño, especialmente en comparación con otras incertidumbres involucradas en el cálculo.

Para el canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO), es significativo y muy importante determinar el valor de los coeficientes de corrección de energía cinética, α (Coriolis) y momentum β (Boussinesq), para fines académicos y de investigación, dado que hasta la fecha no se ha determinado.



Fotografía N° 1: Vista de Canal Abierto de pendiente variable computarizado, longitud 10 mts; del Laboratorio de Hidráulica de la UPAO.

Los profesores del área de Hidráulica y los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Privada Antenor Orrego, podrán contar con valores de los coeficientes de Coriolis y Boussinesq que permitirán reemplazar en los cálculos teóricos de la Velocidad a las mediciones experimentales; y así mejorar los resultados de los cálculos que impliquen el uso de los coeficientes de corrección de velocidad α y β en cualquier proyecto de investigación o práctica que requiera utilizar carga cinética o momentum.



Fotografía N° 02 : Vista del canal de Pendiente variable del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, y los Tesistas tomando datos para la investigación.

1.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

Los ensayos experimentales muestran, que el Coeficiente de Coriolis (α) , varía entre 1.03 y 1.36, y que el coeficiente de Boussinesq (β) varía entre 1.01 y 1.12 para los canales prismáticos y después se expresa que en muchos casos se justifica $\alpha = 1$ y $\beta = 1$; pero se conoce que alfa y Beta

es mayor que 1, por definición de acuerdo a las tablas de Kulopaila. (Chow) y de Jhonson. (King), por lo que se requiere calcular el valor de los coeficientes de Coriolis (α) y de Boussinesq (β), porque de lo contrario siempre existirá incertidumbre en los resultados y un porcentaje de error.

El Coeficiente de Coriolis (α); como resultado de la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal, la altura de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor calculado de acuerdo con la expresión $V^2 / 2g$ donde V es la velocidad media. Cuando se utiliza el principio de energía en cálculos, la altura de la velocidad real puede expresarse como $\alpha (V^2 / 2g)$.

El Coeficiente de Boussinesq (β); la distribución no uniforme de velocidades también afecta el cálculo del momentum en flujo de canales abiertos. A partir del principio de mecánica, el momentum de un fluido que pasa a través de la sección de canal por unidad de tiempo se expresa por $\beta \cdot \delta \cdot Q \cdot V$, donde β es conocido como coeficiente de momentum o coeficiente de Boussinesq, en honor a quien lo propuso por primera vez; δ es la densidad del agua; Q es el caudal; V es la velocidad media. Se ha encontrado que el valor de β para canales prismáticos aproximadamente rectos varía desde 1.01 hasta 1.12

Debido a la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal (Figura N° 01), la carga de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor calculado a partir de la expresión $V^2/2g$, por lo que es conveniente afectarla por un coeficiente α conocido como coeficiente de energía. En flujo en canales abiertos, la distribución no uniforme de velocidades también afecta el cálculo del momentum, de ahí la importancia de familiarizarse con los coeficientes y con las ecuaciones para calcularlos.

Coeficiente de energía o coeficiente de Coriolis. Cuando se utiliza el principio de energía en cálculos, la carga de velocidad real puede

expresarse como $\alpha (V^2/2g)$, siendo α coeficiente de energía o coeficiente de coriolis, en honor a G. Coriolis. El valor de α para canales prismáticos relativamente rectos, varía desde 1.03 hasta 1.36, donde el valor alto se asocia con canales pequeños y el valor bajo con corrientes grandes y de profundidad considerable. Coeficiente de momentum o coeficiente de Boussinesq.

A partir del principio de mecánica, el momentum de un fluido que pasa a través de una sección de canal por unidad de tiempo se expresa por $\beta\gamma QV/g$, donde β es conocido como coeficiente de momentum o coeficiente de Boussinesq, en honor a J. Boussinesq quien lo propuso por primera vez; γ es el peso unitario del agua, V es la velocidad media del agua y Q el caudal. Experimentalmente se ha encontrado que β para canales artificiales aproximadamente rectos, varía desde 1.01 hasta 1.12.

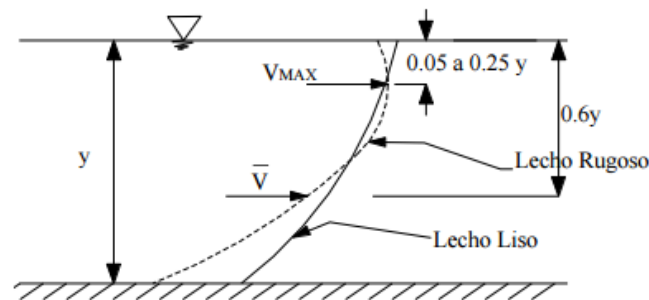


Figura N° 01 : Perfil de distribución de velocidad en un canal abierto

Fuente : Ing. Estrada Gutierrez G.

Si se relacionan las fuerzas de inercia con las fuerzas gravitacionales se obtiene un parámetro adimensional conocido como número de Froude (Fr), el cual permite clasificar al flujo como subcrítico, crítico y supercrítico.

El número de Froude se escribe :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

Donde

V = velocidad media del flujo, m/s

g = aceleración de la gravedad, m/s²

D = profundidad hidráulica, m

Dependiendo de la magnitud de la proporción de las fuerzas de gravedad e inercia, el régimen del flujo es clasificado como:

- Subcrítico $Fr < 1$
- Crítico $Fr = 1$
- Supercrítico $Fr > 1$

Dependiendo de la magnitud de la proporción de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas de viscosidad número de Reynolds, Re , el estado del flujo para canales a superficie libre, se clasifica como:

- Laminar $Re \leq 500$
- Transitorio $500 \leq Re \leq 12500$
- Turbulento $12500 \leq Re$

Por eso es importante realizar la investigación con la finalidad de determinar los valores experimentales de los coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y momentum de Boussinesq (β), para flujo Subcrítico, Crítico y Supercrítico en el canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego y en un accesorio de canal de madera y de forma triangular de 2 metros de longitud.

1.2. Formulación del problema.

¿Cuáles son los valores experimentales de los coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y momentum de Boussinesq (β), para flujo Subcrítico, Crítico y Supercrítico en el canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego?

1.3. Alcance

La labor experimental que se desarrollará en este proyecto consistirá en la medición de los perfiles de velocidad en distintos fenómenos producidos en el canal abierto de pendiente variable de longitud 10 metros, existente en

el laboratorio de hidráulica de la UPAO y los producidos en el accesorio de canal de forma triangular.

El canal abierto de pendiente variable, está compuesto por :

- Cuerpo de vidrio templado, sección 300 mm x 450 mm; longitud 10 metros.
- Tanque de descarga en acero inoxidable, capacidad 0.6 m³
- Estructura de soporte en acero inoxidable.
- Vertedero para descarga en aluminio anodizado, cuya altura puede regularse mecánicamente.
- Sistema con motor eléctrico para regulación de la pendiente del canal.
- Medidor de caudal de lectura directa, con diafragma calibrado.
- Electrobomba centrífuga: caudal máximo 150 m³/h, altura elevación máxima 9 metros.
- Cuadro de mando que comprende: Interruptor general, dispositivos de seguridad, mandos de la bomba y del sistema de regulación de la pendiente.
- Kid de traductores electrónicos.
- Software de adquisición y análisis de datos para Windows.
- Además se dispone de distintos elementos de control, como compuertas planas o vertederos, que permiten el estudio del comportamiento del flujo en un canal abierto, para la determinación experimental de los valores de los coeficientes de distribución de velocidad de Energía de Coriolis (α) y Momentum de Boussinesq (β) para el canal de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego.



Fotografía N° 03 : Vista del canal de Pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica de la UPAO

1.4.JUSTIFICACIÓN

1.4.1.Justificación académica:

El proyecto de tesis se justifica académicamente porque permitirá aplicar procedimientos y metodologías para realizar la determinación experimental de los coeficientes de velocidad de coriolis (α) y Boussinesq (β) para flujo Subcrítico, Crítico y Supercrítico en canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego y en un accesorio de canal de forma triangular y de dos metros de longitud.

1.4.2.Justificación Técnica:

El presente proyecto está orientado a determinar El coeficiente de Coriolis α y Boussinesq (β) que aparece en la expresión de la energía cinética y que representa la relación que existe, para una sección dada, entre la energía real y la que se obtendría considerando una distribución uniforme de velocidades. La distribución no uniforme de velocidades también afecta el cálculo del momentum en flujo de canales abiertos. Por lo que al determinarlo dichos coeficientes será un gran aporte académico e investigación.

1.4.3. Justificación social:

El proyecto se justifica socialmente porque proporcionará una alternativa más exacta de los coeficientes de Coriolis (α) y Boussinesq (β) en canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego, y en un accesorio de canal de forma triangular de 2 metros de longitud, para los experimentos académicos para los alumnos y para aplicación en trabajos de investigación.

Por lo expuesto nuestro trabajo consiste en el aporte del conocimiento profesional para la elaboración del proyecto **“DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE VELOCIDAD DE CORIOLIS (α) Y BOUSSINESQ (β) PARA FLUJO SUBCRITICO, CRITICO Y SUPERCRITICO EN CANAL DE PENDIENTE VARIABLE DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO”**.

Referente al tema de estudio y especialmente en la Universidad Antenor Orrego para el proyecto de tesis no hemos encontrado información, por lo que será de mucha utilidad la cristalización del indicado proyecto dado que permitirá conocer en forma exacta los coeficientes de coriolis (α) y boussinesq (β) en canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego, para los experimentos académicos para los alumnos y para aplicación en trabajos de investigación.

1.5. Hipótesis

Realizar la determinación experimental de los coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y momentum de Boussinesq (β), para flujo Subcrítico, crítico y supercrítico en canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego.

1.6.Objetivos

1.6.1.General.

Determinar experimentalmente los valores de los coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y momentum de Boussinesq (β), para el canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego.

1.6.2.Específicos

- Recopilar la información existente sobre la determinación experimental de los coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y de momentum de Boussinesq (β) en diferentes canales de irrigación.
- Determinar las distribuciones de velocidad para diferentes caudales en el canal rectangular y triangular de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego; para flujos subcríticos, críticos y supercríticos.
- Comparar los valores de los coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y de momentum de Boussinesq (β), a partir de la medición directa de las velocidades; con los obtenidos mediante expresiones teóricas y de otras investigaciones.
- Calcular por medio del correntómetro la velocidad en diferentes profundidades en el canal rectangular y triangular de pendiente variable del laboratorio de Hidráulica de la UPAO.
- Proyectar un accesorio longitudinal que permita simular una sección triangular en un tramo de estudio del canal de corriente del laboratorio y determinar los coeficientes de coriolis y de Boussinesq, para dicha sección triangular.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

El estudio de velocidades en una sección de canal ha sido tratado con un gran interés a lo largo de la historia. Entre los autores y estudios relacionados sobre el tema se destacan:

Leonardo da Vinci (Italia, 1452 – 1519): observó una diferencia de velocidad del agua en los alineamientos de los ríos, siendo más veloz mientras más lejos estuviera de las paredes, deduciendo que era debido al rozamiento que efectuaban las paredes al agua. También estudió la velocidad del agua en el fondo y en la superficie del río, llegando a la conclusión que el agua tiene más alta velocidad en la superficie que en el fondo debido a que en la superficie la resistencia del aire es más pequeña que la resistencia que ofrece la tierra que es mucho más pesada.

Zendrini: Se le atribuye ser el primer investigador que intentó resolver experimentalmente el problema de las velocidades en una sección de canal; mediante mediciones directas. Para ello utilizó un cuadrante, llegando a la conclusión que la velocidad del agua aumentaba con la profundidad.

Edme Mariotte: Realizó un experimento utilizando un doble cable flotador con una esfera de superficie y otra de profundidad, observó que el flotador superior desarrollaba una velocidad mayor que el flotador que estaba a una mayor profundidad.

Henry de Pitot: Creador del tubo Pitot que sirve para calcular la presión total, suma de la presión estática y de la presión dinámica. Consiste en una sonda con una abertura en el extremo situado contra la corriente, en esta abertura se forma un punto de remanso donde la presión final es nula y la velocidad también es nula. A partir de este invento la distribución de velocidades fue estudiada de una manera completa. Pitot observó que la

zona de máxima velocidad está situada inmediatamente debajo de la superficie y que las capas contiguas al fondo son las más lentas.

Pierre Louis Georges Du Buat: A partir de experimentos en canales pequeños pudo deducir un aumento uniforme de la velocidad teniendo en consideración valores V_s en el fondo, hasta un valor V_o en la superficie.

R.Wotman: Inventó el famoso molinete de Woltman que consiste en un molinete que gira en función de la velocidad del agua. El dedujo que la ley de distribución de velocidades puede ser representada por una parábola de eje vertical, cuyo vértice corresponde a la zona de velocidad nula.

Henry Philibert Gaspard Darcy y Henri Emile Bazin: de ellos se consideran los trabajos más importantes en esta materia, sobresaliendo de los investigadores anteriores.

Estos investigadores determinaron la distribución de velocidades sobre secciones mediante tubos de Pitot y uniendo los puntos de igual velocidad se obtuvieron curvas llamadas Isotacas, cuya forma demuestra la influencia predominante de las paredes y fondo sobre dicha distribución.

Bazin estudió la distribución de velocidad en cauces de ancho ilimitado y limitado, estableciendo en este último que la velocidad máxima no se encontraba en la superficie sino por debajo de ella.

Bazin fue el primero que dio el parámetro de las parábolas y afirmó una distribución de velocidades según parábolas de eje horizontal.

Se suceden luego una gran cantidad de investigadores que desarrollan ecuaciones de distribución de velocidades de diverso orden.

Se debe destacar que desde la primera mitad del siglo XIX aparecen trabajos importantes sobre coeficientes de distribución de velocidades, resaltando la escuela de Francia: Ecole des Ponts et Chaussées de donde vendrán los trabajos más relevantes, siendo en la actualidad aún utilizados.

Gaspard Gustave de Coriolis: Su trabajo buscaba corregir las ecuaciones de remanso, para ello se basó en el principio Trabajo – Energía, su ecuación difiere de las ecuaciones de Belanger y Vouthier en la forma del último término, el cual manifiesta su ponencia de que la distribución de velocidades a través de una sección tenía que tomarse en cuenta dentro de esa cantidad.

Es así que existen estudios e investigaciones referentes a la determinación de Energía Cinética y a la cantidad de movimiento en una sección dada, las cuales nos permitirá conocer los valores de los coeficientes de Velocidad de Coriolis y conocer los coeficientes de la velocidad de Boussinesq, para flujo suscritico, crítico y supercrítico en un canal de pendiente variable del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego; por lo que es importante y conveniente realizar la presente investigación .

A.- INVESTIGACIONES EXTRANJERAS

1.- “EVALUACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE VELOCIDAD α Y β DEL CANAL DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA UNIVERSIDAD EAFIT “.

AUTORES: FRANKLIN HERNANDO GUTIÉRREZ ACEVEDO

INSTITUCION: UNIVERSIDAD EAFIT. Medellín . Colombia

AÑO: 2011

RESUMEN

Para estimar el valor de los coeficientes de corrección de energía y momentum del canal del laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, se realizó una revisión de las diferentes expresiones presentadas desde los años 50's hasta la información más pertinente y actual sobre el tema. A partir de esta consulta del estado del arte, se pusieron a punto los equipos de traslación y toma de datos del canal de laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, donde se tomaron datos de velocidades puntuales en diferentes puntos de la sección del canal para diferentes caudales. Utilizando la aplicación computacional MATLAB, mediante el comando contourf, se interpolaron los datos y diagramaron los gráficos de las Isotacas que corresponden a las líneas de igual

velocidad, con el objeto de conocer la distribución de velocidad en el canal para los caudales presentados en éste trabajo. Con estos resultados se determinó la forma de distribución de velocidad para el canal, la influencia de la rugosidad del fondo del canal y se estimaron matemáticamente los coeficientes de corrección de velocidad para las ecuaciones de energía y momentum, comparándolos con los valores calculados con las fórmulas presentadas en la literatura. Entre los valores encontrados de los coeficientes de corrección de velocidad para el canal de hidráulica de la Universidad EAFIT, y los valores calculados utilizando expresiones de la literatura, se evidenció una diferencia de 2% en promedio

2.- DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE DISTRIBUCIONES DE VELOCIDAD E ÍNDICES TURBULENTOS DE ALGUNOS TIPOS DE RESALTOS HIDRÁULICOS

AUTOR : JOSÉ MARÍA CARRILLO SÁNCHEZ

INSTITUCION: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

AÑO: 2004

RESUMEN

En la realización del proyecto, los puntos más importantes han sido: *f* Puesta a punto del canal. Inicialmente hubo que realizar una corrección del caudal medido por el caudalímetro analógico suministrado con el canal ya que los resultados de anteriores proyectos originaban serias dudas sobre su fiabilidad. Por estos motivos se realizó un aforo volumétrico para obtener el caudal realmente trasegado por la bomba. Además de esto, se debe considerar la deflexión que sufre el canal en ambos lados provocada por el peso del agua contenida en los depósitos de cabecera y final del mismo. Para evitar la deflexión se buscaron los sitios del canal donde su aparición era inapreciable, marcando los puntos de las campañas de muestreo en ellos. Antes de poner en funcionamiento el instrumental de medición, tuvieron que resolverse los distintos problemas de logística que fueron apareciendo, ya que el ordenador inicial no fue compatible para realizar las mediciones con el ADV. Tras el análisis de los datos obtenidos en las diversas campañas de muestreos y la comparación con distintos

trabajos experimentales, se obtuvieron perfiles similares a los teóricamente esperables. Los muestreos se realizaron en resaltos estables y sumergidos aguas abajo de una compuerta y tras un aliviadero WES. A continuación se muestran las fotografías de los resaltos, acompañadas por los perfiles de velocidad obtenidas en cada caso para el máximo caudal.

- FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. DEFINICIONES.

FLUJO EN CANALES ABIERTOS

Se entiende por canal abierto un conducto por el cual fluye el agua con una superficie libre.

Los canales abiertos pueden ser naturales o artificiales dependiendo de la participación del ser humano a la hora de la creación del mismo. Por tanto, los canales naturales son aquellos creados de una forma natural como son los ríos y arroyos, mientras que los canales artificiales son creados por los seres humanos.

Se han realizado estudios que han demostrado que en canales muy anchos, la distribución de velocidades en la distribución central es la misma que existiría en un canal rectangular de ancho infinito. Es decir, que en canales muy anchos las paredes del canal no tienen ninguna influencia y por tanto el flujo en esta región central puede considerarse bidimensional.

Se han de tener en cuenta las siguientes propiedades y conceptos de los canales abiertos con el fin de aproximarse a un mayor conocimiento:

Geometría del canal: los canales según su geometría se clasifican en prismáticos, cuando son construidos con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante y en no prismáticos que son todos los demás.

Los canales artificiales se diseñan con modelos de formas geométricas como trapecios, rectángulos y triángulos dependiendo de las necesidades del canal y del espacio donde estará ubicado.

El trapecio es la forma más común para canales sin recubrimiento, dado que ofrecen las pendientes necesarias para garantizar la estabilidad de los taludes.

El rectángulo es utilizando normalmente cuando los canales son construidos con materiales estables.

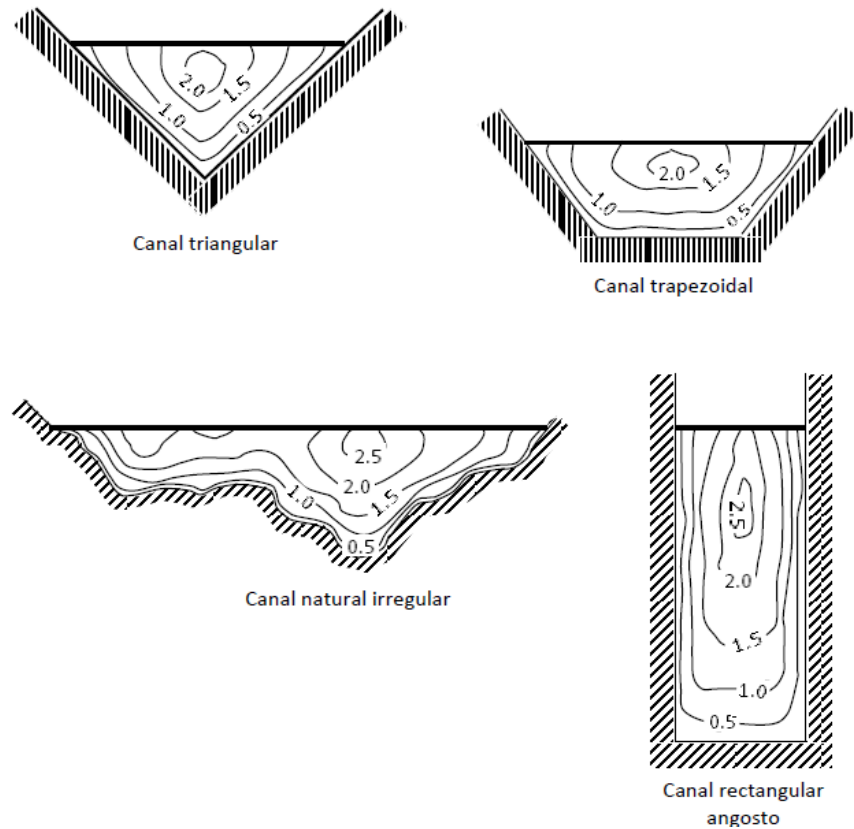


Figura N° 02: Isotacas en canales abiertos de diferentes secciones transversales
Fuente : Chow V. T.

Todos los canales están sometidos a elementos que conforman propiedades geométricas de los mismos, estos elementos son importantes a la hora de realizar un cálculo de flujo.

A continuación se tratan las definiciones de los elementos de un canal antes mencionados:

Profundidad de flujo: se entiende por profundidad de flujo la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección de canal hasta la superficie.

Nivel: es la elevación desde un nivel de referencia hasta la superficie libre.

Ancho superficial T: es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

Área mojada: es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.

Perímetro mojado: es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plazo transversal perpendicular a la dirección de flujo.

Radio hidráulico RH: es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.

$$RH = \frac{A}{P}$$

Profundidad hidráulica D: es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.

$$D = \frac{A}{T}$$

DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN UNA SECCIÓN DE CANAL

En un canal las velocidades no son uniformes debido a la presencia de superficie libre y de las paredes del canal que modifican la velocidad del mismo. Dentro del flujo de un canal se encuentra diferentes velocidades que a continuación se desglosan.

Velocidad máxima: La velocidad máxima de un canal normalmente se da entre 0,05 y 0,25 veces la profundidad de la superficie, no obstante, esta velocidad máxima puede variar por factores como la rugosidad y la presencia de curvas dentro del canal.

Por el contrario, factores como el viento tiene muy poco impacto en la velocidad del agua, porque el aire tiene las moléculas muy separadas en comparación con un líquido y en consecuencia ofrece un esfuerzo de cizalladura pequeño con el agua.

Velocidad media: Para calcular la velocidad media en una sección transversal, el canal se divide en una serie de líneas verticales. Las velocidades medias en las verticales se determinan midiendo la velocidad a 0,6 de la profundidad en cada vertical o midiendo a 0,2 y 0,8 para tomar un promedio de los valores más confiables.

Por tanto la velocidad media de toda la sección es igual al caudal total dividido por el área completa.

Velocidad mínima: La velocidad mínima de un canal generalmente se obtiene en las proximidades de las paredes y en el fondo del canal.

Las paredes ejercen una fricción sobre el fluido lo cual reduce su velocidad. El agua que está en contacto directo con el fondo del canal se mueve con mucha más lentitud que el resto, llegando a terminar la curva de velocidad en cero.

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.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}}$$

Donde:

- V = velocidad media
- g = gravedad
- D = profundidad hidráulica

De acuerdo al valor del número de Froude, se puede clasificar al flujo en:

Flujo lento	————>	Fr < 1.0	————>	flujo subcrítico (y > y _c)
Flujo crítico	————>	Fr = 1.0	————>	flujo crítico (y = y _c)
Flujo rápido	————>	Fr > 1.0	————>	flujo supercrítico (y < y _c)

El flujo se clasifica como:

Fr < 1, Flujo subcrítico o tranquilo, tiene una velocidad relativa baja y la profundidad es relativamente grande, prevalece la energía potencial. Corresponde a un régimen de llanura.

Fr = 1, Flujo crítico, es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes subcrítico y **supercrítico**.

Fr > 1, Flujo supercrítico o rápido, tiene una velocidad relativamente alta y poca profundidad prevalece la energía cinética. Propios de cauces de gran pendiente o ríos de montaña.

FLUJO PERMANENTE Y UNIFORME

El flujo uniforme permanente es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos. La profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración. En el caso especial de flujo uniforme y permanente, la línea de alturas totales, la línea de altura piezométricas y la solera del canal son todas paralelas, es decir, son todas iguales sus pendientes.

La característica principal de un flujo permanente y uniforme en canales abiertos es que la superficie del fluido es paralela a la pendiente del canal, es decir, $dy/dx = 0$ o la profundidad del canal es constante, cuando la pendiente final (S_f) es igual a la pendiente inicial (S_o) del canal. Estas condiciones se dan comúnmente en canales largos y rectos con una pendiente, sección transversal y un revestimiento de las superficies del canal homogéneo, caso típico en regadíos. En el diseño de canales es muy deseable tener este tipo de flujo ya que significa tener un canal con altura constante lo cual hace más fácil diseñar y construir.

Las condiciones de flujo permanente y uniforme solo se pueden dar en canales de sección transversal prismáticas, es decir, cuadrada, triangular, trapezoidal, circular, etc. Si el área no es uniforme tampoco lo será el flujo. La aproximación de flujo uniforme implica que la velocidad es uniforme es igual a la velocidad media del flujo y que la distribución de esfuerzos de corte en las paredes del canal es constante.

Bajo las condiciones anteriores se pueden obtener las siguientes relaciones, denominadas relaciones de Chezy–Manning, para la velocidad V y el caudal Q :

$$V = \frac{k}{n} R_H^{2/3} S_0^{1/2},$$

$$Q = \frac{k}{n} A R_H^{2/3} S_0^{1/2},$$

Donde:

K: Valor constante según las unidades a utilizar.

Ac: Área de la sección del Canal.

Rh: Radio hidráulico de la sección.

So: Pendiente del Fondo del Canal.

n: Coeficiente de Mannig

NÚMERO DE REYNOLDS (Re):

Osborne Reynolds (1842-1912) publicó en 1883 su clásico experimento mediante el que estableció que el paso de régimen laminar a turbulento, que varía al modificar la velocidad y/o la viscosidad, quedaba condicionado a un valor adimensional, hoy llamado Número de Reynolds (Re). El número crítico de Reynolds (Re) c, es decir, el valor de Re que marcaría el paso del régimen laminar al turbulento, para tuberías vale 2300 (2320 exactamente según algunos autores).

Para encontrar significado a su número, Reynolds comprobó experimentalmente el paso del flujo laminar al turbulento cuando $Re > 2300$ al aumentar la velocidad. No obstante, en condiciones de laboratorio, Reynolds obtuvo el valor $Re = 12000$ antes de que empezara la turbulencia.

Posteriormente, otros investigadores llegaron a obtener valores de $Re = 75000$ antes de que se produjeran turbulencias. Estos valores conseguidos en laboratorio y bajo condiciones especiales no tienen ningún interés práctico, ya que las tuberías comerciales presentan irregularidades en su superficie interna que producen flujos turbulentos para valores de Re mucho más bajos.

Aunque $Re = 2300$, lo cierto es que para valores de Re comprendidos entre 2000 y 4000 la situación es bastante imprecisa. A efectos de cálculo de tuberías interesa saber que para Re menores de 2000 el régimen es laminar, y aunque este régimen se rompa accidentalmente, vuelve a restablecerse por sí solo.

En definitiva:

$Re \leq 2000$: Régimen laminar.

$2000 < Re < 4000$: Zona crítica o de transición.

$Re > 4000$: Régimen turbulento.

Matemáticamente, el Re es un parámetro adimensional que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad o de fricción en el interior de una corriente, que se expresa para una tubería de sección circular, de la siguiente forma:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

El número de Reynolds, es un número adimensional en el cual se relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo. Este número permite saber si un flujo se puede considerar laminar o turbulento.

$$Re = \frac{\rho v R_h}{\gamma}$$

donde:

ρ = densidad del fluido kg/m^3

v = velocidad media en la sección en m/s .

R_h = radio hidráulico de la sección en m .

γ = viscosidad cinemática del agua en m^2/s .

En canales se han comprobado resultados semejantes a los de los conductos a presión, para fines prácticos se tiene: $Re < 500$ flujo laminar $Re > 12500$ flujo turbulento $500 < Re < 12500$ flujo en transición

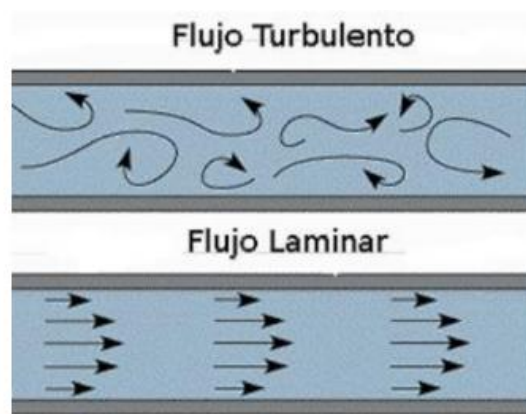


Figura N° 03 : Representación del Flujo laminar y Flujo Turbulento

Fuente : Mónica Jarrín Coral

Tabla N° 01 : Viscosidad Cinemática, en función a la temperatura del agua en °C

Fuente : Mecánica de Fluidos e Hidráulica, serie Schawm.

Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /s)
5	1.520 * 10 ⁻⁶
10	1.308 * 10 ⁻⁶
15	1.142 * 10 ⁻⁶
20	1.007 * 10 ⁻⁶
25	0.897 * 10 ⁻⁶
30	0.804 * 10 ⁻⁶
35	0.727 * 10 ⁻⁶
40	0.661 * 10 ⁻⁶
50	0.556 * 10 ⁻⁶
65	0.442 * 10 ⁻⁶

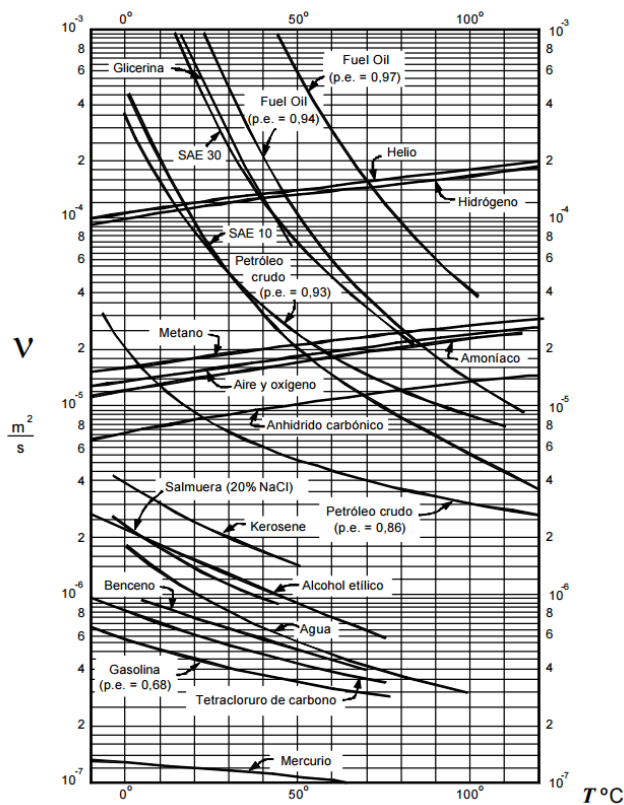


Figura N° 04 : Viscosidad cinemática en función de la temperatura para varios fluidos (p.e. es el peso específico relativo).

Fuente : Mecánica de Fluidos e Hidráulica, serie Schawm.

DISTRIBUCION DE VELOCIDADES EN UNA SECCIÓN TRANSVERSAL Y EN UNA SECCION LONGITUDINAL DE CANAL

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades no están uniformemente distribuidas en su sección.

Para el estudio de la distribución de las velocidades se consideran dos secciones:

a) Sección Transversal: La resistencia ofrecida por las paredes y por el fondo del canal, reduce la velocidad. En la superficie libre, la resistencia ofrecida por la atmósfera y por el viento (aunque este último tiene muy poco efecto) también influye sobre la velocidad. La Figura N° 05; ilustra el aspecto general de la distribución de velocidades en la sección transversal típica de un río natural.

Dicha distribución se presenta en base a las curvas que unen puntos de igual velocidad, estas curvas normalmente se interpolan a partir de los datos de mediciones con molinetes, obtenidas en diferentes puntos de la sección transversal.

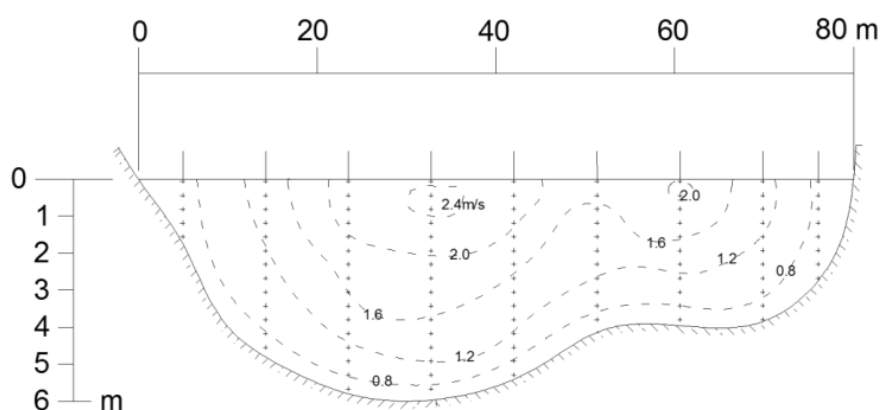


Figura N° 05 : Distribución de velocidades en la sección transversal de un río.

Fuente : Mónica Jarrín Coral

Podemos observar en la figura que la velocidad mínima ocurre en la proximidad de la pared y que existe un incremento de la velocidad hacia la superficie libre.

El punto de velocidad máxima queda ligeramente debajo de la superficie libre, lo cual se atribuye al movimiento circulatorio secundario inducido por la proximidad de los lados. Por ello podría considerarse que en canales anchos y de poco tirante, la velocidad máxima se localiza al nivel de la superficie libre.

Podemos observar también que la zona donde ocurre la máxima velocidad se localiza prácticamente sobre la vertical que tiene mayor profundidad y a una distancia de 0.05 a 0.25 del tirante desde la superficie libre hacia abajo.

b) Sección Longitudinal: En la Figura N° 06; se ilustra la forma de la distribución sobre una vertical y en ella se observa que la velocidad media se localiza a una profundidad aproximada de 0.6 del tirante y es aproximadamente el promedio de la velocidad a 0.2 y 0.8 del tirante o bien entre 0.8 y 0.95 de la velocidad superficial.

En un canal ancho, con gran velocidad y poco tirante o bien en un canal liso, la velocidad máxima se puede encontrar con frecuencia sobre la superficie libre.

La rugosidad de un canal aumenta la curvatura de la curva de distribución de velocidades sobre una vertical y la máxima se presente debajo de la superficie libre.

En una curva aumenta bastante la velocidad en el lado exterior por la acción de la fuerza centrífuga.

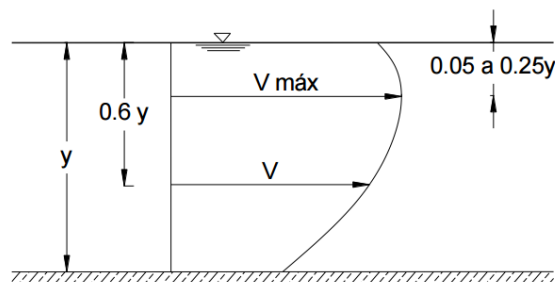


Figura N° 06 : Variación de la velocidad en la sección longitudinal de un canal.

Fuente : Mónica Jarrín Coral

Considerándose la velocidad media en determinada sección como igual a 1, se puede trazar el diagrama de variación de la velocidad con la profundidad, como se ilustra en la Figura N° 07 .

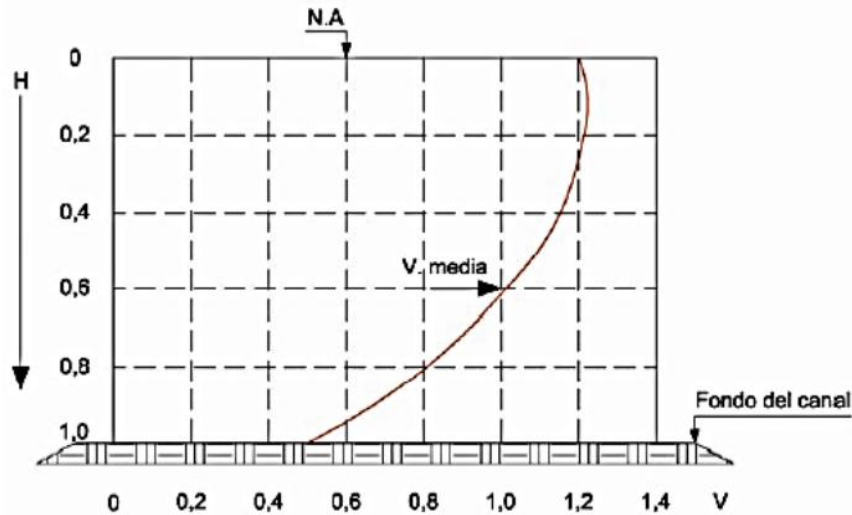


Figura N° 07 : Variación de la velocidad con la profundidad

Fuente : Gilberto Sotelo Ávila

La distribución de velocidades en una sección de un canal depende también de otros factores, entre ellos la forma inusual de la sección, la presencia de curvas a lo largo del canal, etc. en una curva, la velocidad se incrementa de manera sustancial en el lado convexo, debido a la acción centrífuga del flujo.

En la siguiente figura se muestra el modelo general de la distribución de velocidades para varias secciones horizontales y verticales en un canal con sección rectangular y las curvas de igual velocidad de la sección transversal.

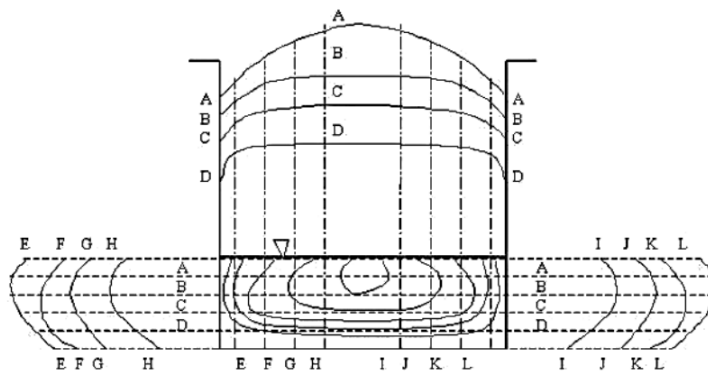


Figura N° 08 : Perfiles de velocidad en un canal rectangular

Fuente : Gilberto Sotelo Ávila

Los modelos generales para la distribución de velocidades en diferentes secciones de canal se muestran en la siguiente Figura .

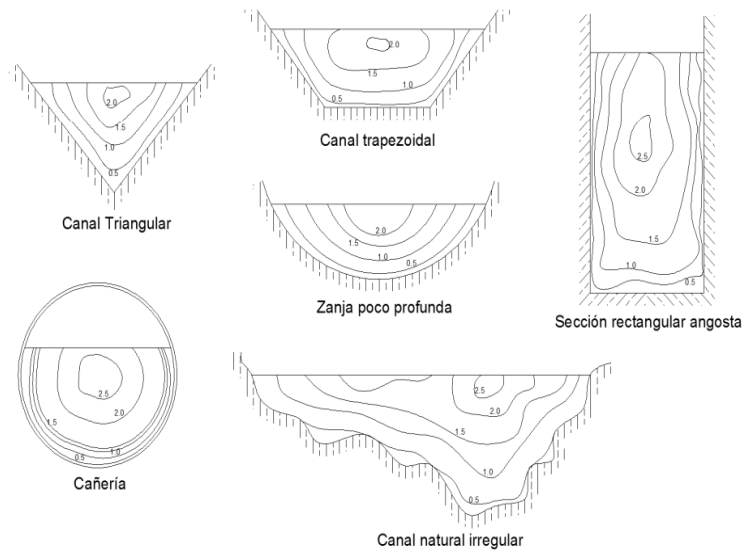


Figura N° 09 : Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal
Fuente : Gilberto Sotelo Ávila

RELACIONES PARA LA VELOCIDAD MEDIA

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey) presenta las siguientes relaciones de gran utilidad en las determinaciones y estimativos de caudal:

- La velocidad media en una vertical generalmente equivale a 80% a 90% de la velocidad superficial.

b) La velocidad a los seis décimos de la profundidad generalmente es la que más se aproxima a la velocidad media.

$$V_{med} \cong V_{0.6}$$

c) Con mayor aproximación que la anterior se tiene:

$$V_{med} \cong \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2}$$

d) La velocidad media también puede ser obtenida partiéndose de:

$$V_{med} \cong \frac{V_{0.2} + V_{0.8} + 2 * V_{0.6}}{4}$$

Esta última expresión es más precisa.

DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD EN CANALES ABIERTOS ANCHOS

Observaciones hechas en canales abiertos muy anchos han demostrado que la distribución de velocidades en la región central de la sección es en esencia la misma que existiría en un canal rectangular de ancho infinito

COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD

Coefficiente de Coriolis: Como resultado de la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal, la altura de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor calculado de acuerdo con la expresión $V \sqrt{2/g}$ donde V es la velocidad media.

Cuando se utiliza el principio de energía en cálculos, la altura de la velocidad real puede expresarse como $\alpha (V \sqrt{2/g})$.

El coeficiente de Coriolis α que aparece en la expresión de la energía cinética, representa la relación que existe, para una sección dada, entre la energía real y la que se obtendría considerando una distribución uniforme de velocidades.

Su valor se calcula con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\int V_h^3 \cdot dA}{V^3 \cdot A}$$

Dónde:

- V_h = Componente vertical de la velocidad a una profundidad h
- dA = Diferencial de área correspondiente a la velocidad V_h
- V = Velocidad media
- A = Área total

Los ensayos experimentales muestran que α varía entre 1,03 y 1,36 para los canales prismáticos (canales con sección transversal y pendiente del fondo constante). (Chow V. T. 1982)

El uso del coeficiente de Coriolis, depende de la exactitud con que se estén haciendo los cálculos, en muchos casos se justifica considerar: $\alpha=1$, siendo un valor límite utilizado generalmente en secciones transversales de

alineación casi recta y tamaño regular; en este caso la distribución de la velocidad será estrictamente uniforme.

- Coeficiente de Boussinesq:

La distribución no uniforme de velocidades también afecta el cálculo del momentum en flujo de canales abiertos. A partir del principio de mecánica, el momentum de un flujo que pasa a través de la sección de canal por unidad de tiempo se expresa por $\beta \cdot \delta \cdot Q \cdot V$, donde β es conocido como coeficiente de momentum o coeficiente de Boussinesq, en honor a quien lo propuso por primera vez; δ es la densidad del agua; Q es el caudal; V es la velocidad media.

Se ha encontrado que el valor de β para canales prismáticos aproximadamente rectos varía desde 1,01 hasta 1,12. En muchos casos se justifica considerar: $\beta=1$, siendo un valor límite utilizado generalmente en secciones transversales de alineación casi recta y tamaño regular; en este caso la distribución de la velocidad será estrictamente uniforme. El valor de β se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{\int V_h^2 \cdot dA}{V^2 \cdot A}$$

Dónde:

- Vh = Componente vertical de la velocidad a una profundidad h
- dA = Diferencial de área correspondiente a la velocidad Vh
- V = Velocidad media
- A = Área total
- δ = densidad del fluido
- Q = Caudal

RELACIONES DE α y β

El coeficiente de Coriolis, α : es la relación que hay entre la energía cinética que realmente lleva el flujo en una sección dada y la energía cinética en el supuesto que la velocidad sea constante e igual a la velocidad media en la misma sección.

El coeficiente de Boussinesq, β expresa la relación entre la cantidad de movimiento real que hay en una sección dada y la cantidad de movimiento suponiendo que la velocidad se reparte uniformemente en toda la sección.

Los dos coeficientes de distribución de velocidades son siempre un poco mayores que el valor límite de la unidad, para el cual la distribución de velocidades es estrictamente uniforme a través de la sección del canal.

Para canales de sección transversal regular y alineamiento más o menos recto, el efecto de la distribución no uniforme de velocidades en el cálculo de la altura de velocidad y el momentum es pequeño, especialmente en comparación con otras incertidumbres involucradas en el cálculo.

Por consiguiente, a menudo los coeficientes se suponen iguales a la unidad. En la siguiente tabla se indican algunos valores que pueden asumirse para los coeficientes α y β dependiendo del tipo de canal:

Tabla N° 02 : Valores de coeficientes de distribución de velocidad para diferentes canales

Canales	Valor de α			Valor de β		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Canales rectangulares, canaletas y vertederos	1,10	1,15	1,20	1,03	1,05	1,07
Corrientes naturales y torrentes	1,15	1,30	1,50	1,05	1,10	1,17
Ríos bajo cubiertas y de hielo	1,20	1,50	2,00	1,07	1,17	1,33
Valles de ríos, inundados	1,50	1,75	2,00	1,17	1,25	1,33

Fuente: Hidrología de los ríos lituanos. Steponas Kolupaila

RÉGIMEN SUBCRÍTICO:

Una ayuda valiosa en el cálculo hidráulico es el diagrama de energía con las curvas $H_o - y$. Se recomienda trazar, con el caudal dado Q , una familia de curvas para varias secciones transversales de la estructura, como se indica en la Figura N° 10; donde los cambios en la sección transversal de la estructura de transición están limitados únicamente a cambios en el ancho B del canal, de tal modo que las secciones transversales consecutivas están caracterizadas por valores definidos del caudal unitario $q=Q/B$.

Un ejemplo más general se muestra en la siguiente figura

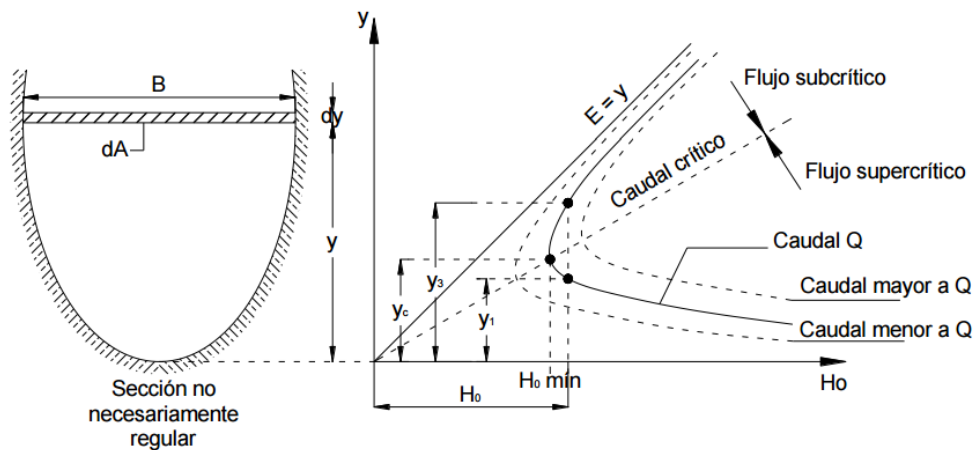


Figura N° 10 : Diagrama de alturas de energía
Fuente : Gilberto Sotelo Ávila

RÉGIMEN SUPERCRÍTICO:

En el diseño de una contracción en régimen supercrítico, se debe cuidar que no exista el peligro de estrangulamiento, sino más bien condiciones estables del flujo. La Figura N° 10; define tres zonas: la de no estrangulamiento (solo acción de ondas oblicuas), la segunda es de posible estrangulamiento y la última de estrangulamiento verdadero, para saber en cuál de ellas se está, se usan el número de Froude F_1 y la relación de contracción b_3/b_1 .

ECUACIONES GENERALES DE LOS FLUJOS POR CONDUCCIONES A SUPERFICIE LIBRE.

Básicamente las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los flujos a superficie libre son las siguientes:

- Conservación de la masa
- Cantidad de movimiento
- Energía

No necesariamente para la aplicación de estas ecuaciones se cumplen las relaciones medias como

$$\rho Q v_m = \iint_A \rho v^2 dA$$

En particular esta relación solo se cumple en condiciones de flujo uniforme en la sección.

Ello conduce a tener que aplicar algunos coeficientes de corrección para poder trabajar con las ecuaciones utilizando la velocidad media como medida característica de la velocidad del flujo.

CONSERVACION DE LA MASA

Considerando al agua como un fluido incompresible en un flujo estacionario, la ecuación de la conservación de la masa, a través de un tubo de flujo con “tapas” A1 y A2, resulta:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_{dA} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \rho \left[\int_{dA1} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA + \int_{dA2} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \right]$$

Como la masa se conserva, entonces $\frac{dM}{dt} = 0$ Y como $v_m = \frac{1}{A} \int_A (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA$, resulta:

$$v_{m1} A_1 = v_{m2} A_2 = Q$$

CANTIDAD DE MOVIMIENTO

La ecuación de cantidad de movimiento considerando al agua como un fluido incompresible en un flujo estacionario, a través de un tubo de flujo con “tapas” A1 y A2 ; es :

$$\frac{d}{dt} \int_D \rho \bar{v} = \int_D \rho \bar{F} + \int_{\partial D} \bar{f} dA = \bar{F}_{Total}$$

Analizando el primer término, resulta que la derivada total de la cantidad de movimiento se puede calcular como:

$$\frac{d}{dt} \int_D \rho \bar{v} = \frac{d}{dt} \int_D \rho \bar{v} + \int_{\partial D} \rho \bar{v} (\bar{v} \cdot \bar{n}) dA = \int_{A1} \rho v (v \cdot n) dA + \int_{A2} \rho v (v \cdot n) dA$$

Considerando que el flujo es unidimensional y proyectando según la dirección de

$$\bar{e}_1 \cdot \int_A \rho \bar{v} (\bar{v} \cdot \bar{n}) dA = \int_A \rho v^2 dA = \int_A \rho v^2 dA * \frac{\int_A \rho v^2 dA}{\int_A \rho v^2 dA} = \frac{\int_A \rho v^2 dA}{\int_A \rho v^2 dA} * \int_A \rho v^2 dA = \frac{\int_A \rho v^2 dA}{\rho A v_m^2} * \rho A v_m^2$$

Definiendo $\beta =$ coeficiente de Boussinesq como:

$$\beta = \frac{\int_A \rho v^2 dA}{\rho A v_m^2}$$

canal, el flujo de cantidad de movimiento en cada tapa se puede escribir como:

Entonces, la derivada total de la cantidad de movimiento se puede escribir como:

$$\frac{d}{dt} \int_D \rho \bar{v} = -\beta_1 \rho A_1 v_1^2 + \beta_2 \rho A_2 v_2^2$$

Y por lo tanto, la ecuación de la cantidad de movimiento resulta

$$\frac{d}{dt} \int_D \rho v = -\beta_1 \rho A_1 v_1^2 + \beta_2 \rho A_2 v_2^2 = F_{Total}$$

ENERGIA

Sea L una trayectoria (en caso de flujo estacionario coinciden las trayectorias con las líneas de flujo), entonces si P es un punto de la línea de flujo se cumple que: $v = vt$

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{dv}{dt} = \bar{t} + v \frac{d\bar{t}}{dt} = \left[\frac{dv}{dt} + (\nabla v)(v\bar{t}) \right] \bar{t} + v \left[\frac{v}{R} \bar{n} \right]$$

$$(\nabla v) \cdot v\bar{t} = v (\nabla v) \cdot \bar{t} = \nabla \left[\frac{v^2}{2} \right] \cdot \bar{t}$$

Entonces:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \left[\frac{dv}{dt} + \nabla \left[\frac{v^2}{2} \right] \cdot \bar{t} \right] \bar{t} + Cv^2 \bar{n}$$

La ecuación puntual de cantidad de movimiento (ecuación de Cauchy) para fluidos perfectos incomprensibles es:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = F - \frac{\nabla p}{\rho} = -\nabla(gz) - \nabla \left[\frac{p}{\rho} \right] = -\nabla \left[gz + \frac{p}{\rho} \right]$$

Igualando, y proyectando según el triedro de Frenet se obtiene:

$$\begin{cases} -\nabla \left[gz + \frac{p}{\rho} \right] \cdot \bar{t} = \frac{dv}{dt} + \nabla \left[\frac{v^2}{2} \right] \cdot \bar{t} \\ -\nabla \left[gz + \frac{p}{\rho} \right] \cdot \bar{n} = \frac{v^2}{R} \\ -\nabla \left[gz + \frac{p}{\rho} \right] \cdot \bar{b} = 0 \end{cases}$$

Entonces, si el flujo es estacionario resulta:

$$\frac{dv}{dt} = 0 \text{ de donde } -\nabla \left[gz + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \right] \cdot \bar{t} = 0$$

Como en el caso estacionario, las trayectorias se confunden con las líneas de flujo, a lo largo de las mismas se cumple :

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{Cte}$$

COMO SE APLICA LA ECUACIÓN DE BERNOULLI AL FLUJO EN CANALES.

$$\frac{p}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} = H = \text{Cte}$$

Válida para flujo:

- Estacionario
- Incompresible
- Fluido perfecto (sin tensiones rasantes)
- Si hay flujo irrotacional, vale en todo el flujo, caso contrario, solo a través de las trayectorias - líneas de flujo .

$$\frac{p}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} = \text{carga de presión} + \text{carga potencial} + \text{carga de velocidad.}$$

Asumiendo que tanto la pendiente de fondo como la de la superficie libre del canal son pequeñas, entonces la distribución de presiones sería similar a la hidrostática y por lo tanto en un punto cualquiera el término p/γ es equivalente a la profundidad del punto medida desde la superficie libre. Resulta entonces que el término $(z + p/\gamma)$ corresponde a la altura del agua medida sobre el fondo del canal para cualquier punto de la sección. Por ello la piezométrica $(z + p/\gamma)$ coincide con la cota del nivel de agua para cualquier punto en la sección y para el flujo en general.

Para valorar adecuadamente el término cinético, en un caso general donde la velocidad no es uniforme, se introduce el coeficiente de Coriolis (α).

$$\alpha = \frac{\int v^3 \cdot dA}{v_m^3 \int dA}$$

Este coeficiente de Coriolis es un factor de corrección que se aplica a la energía cinética calculada a partir de la velocidad media, para corregir la no uniformidad del perfil de velocidad.

De esta forma la ecuación de Bernoulli aplicada a canales que no sean de pendiente abrupta se expresa como:

$$y + \alpha \frac{V_m^2}{2g} = H = Cte$$

ENERGÍA ESPECÍFICA

Energía específica es la energía por unidad de peso del líquido en movimiento con relación a la solera del canal.

$$E = \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad \text{En flujo libre } \frac{P}{\gamma} = h$$

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad E = y \cos^2 \theta + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

Además, si se consideran canales de baja pendiente

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

Donde :

E = energía específica

h = altura piezométrica

d = profundidad medida perpendicularmente a la solera desde la superficie del agua

y = profundidad de la solera Del canal

θ = pendiente de la solera Del canal

α = coeficiente de velocidad o de Coriollis

V = velocidad media Del flujo

g = aceleración de la gravedad

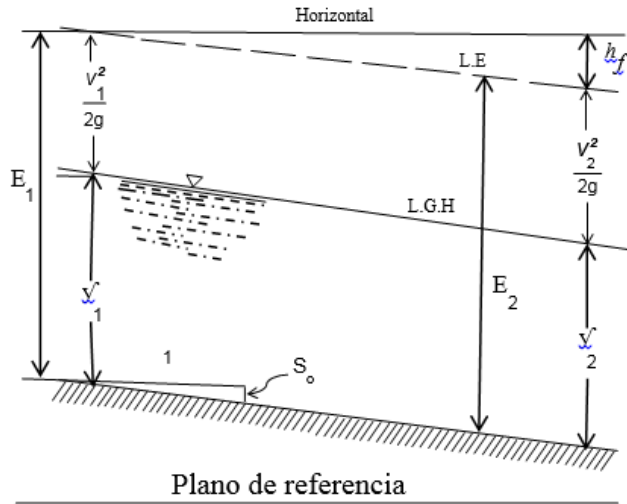


Figura N° 11 : Componentes de la Energía Especifica para canales de baja pendiente

La representación gráfica de la ecuación de energía específica se muestra en la Figura N° 12 ; en que se observan dos ramas. Uno asintótico al eje de las abscisas y otro, asintótico a una línea que forma un ángulo de 45 con relación a la horizontal.

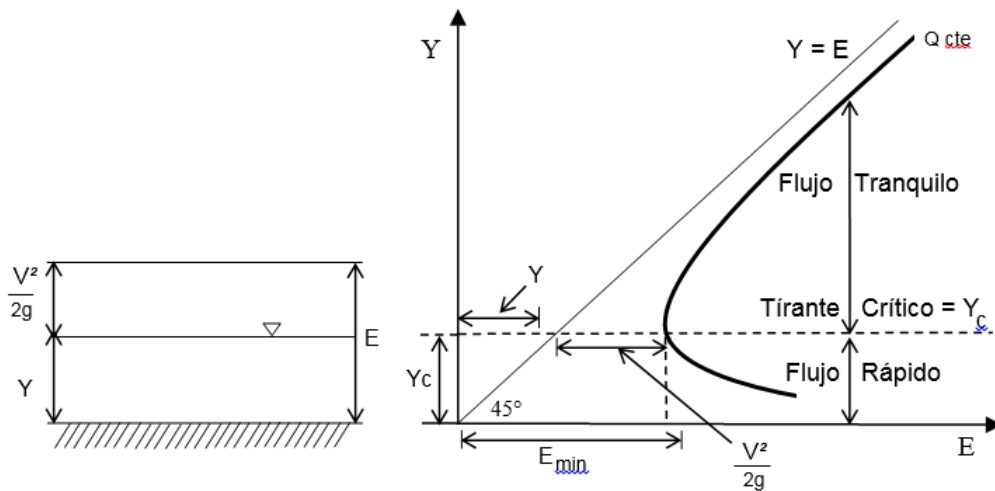


Figura N° 12 : Diagrama de Energía Especifica de un canal rectangular

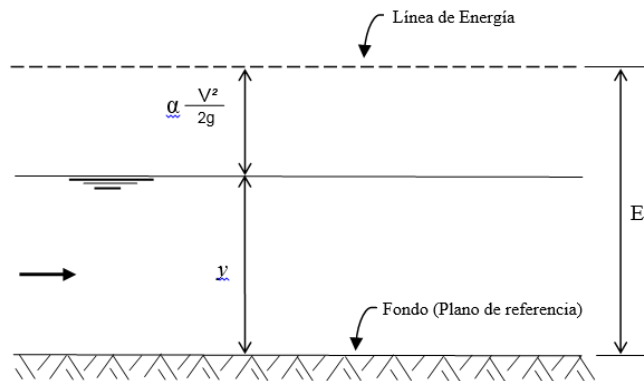


Figura N° 13 : Interpretación gráfica de la Energía Específica de un canal rectangular

FLUJO LIBRE

Ecuaciones Básicas

- Ecuación de Continuidad para la vena líquida

$$Q = VA$$

- Ecuación general de Velocidad según Chezy

$$V = C \sqrt{RS}$$

$$R = A / P$$

$$S = h / L$$

- Ecuación de la energía

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + \sum h_{p,1-2}$$

- Ecuación de cantidad de movimiento o Momentum

$$F_1 - F_2 + W \sin \Theta - F_f = \beta \rho Q (V_2 - V_1)$$

Nomenclatura

- A* = Área mojada
C = Coeficiente de velocidad
F = Fuerza debida a la presión hidrostática
F_f = Fuerza debida a la fricción entre el fluido y la frontera solida

 Σh_p = Pérdidas por unidad de peso entre dos puntos
L = Longitud real del conducto
P = Presión
P = Perímetro mojado
Q = Caudal
R = Radio hidráulico
S = Gradiente hidráulico
h = Pérdida de energía por fricción
V = Velocidad media del flujo
W = Peso contenido en el volumen de control
Z = Cabeza de posición
 α = Coeficiente de variación de la velocidad en la sección transversal
 β = Coeficiente de Momentum o Coeficiente de Boussinesq
 Θ = Ángulo de inclinación de la solera del canal
 ρ = Densidad del fluido
 γ = Peso específico del fluido

TIRANTE CRÍTICO PARA CANALES CON SECCIÓN RECTANGULAR Por la definición de energía mínima específica, expresión

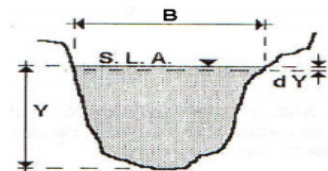
$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{B}$$

Como $A=By$ y $q=Q/B$, realizando operaciones y simplificando, se obtiene :

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Simplificando y considerando que cerca de la superficie $dA = Bdy$

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{g} \frac{B}{A^3} = 0$$



O en otros términos:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{B}$$

Y el número de Froude es:

$$Fr^2 = \frac{BQ^2}{gA^3},$$

$$Fr = \frac{Q}{\sqrt{gA^3}} = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

La energía específica es la suma de la carga de presión (energía potencial) y la carga de velocidad (energía cinética). Al evaluar diferentes tirantes, para una misma sección, se obtendrá una curva entre energía y tirante, donde se puede observar que para una misma energía se tendrán 2 tirantes, llamados tirantes alternos, y estos son uno para régimen supercrítico (rápido) y el otro para régimen subcrítico (lento), exceptuando un sólo punto el cual corresponde a la energía específica mínima y a este tirante único se le denomina tirante crítico, y por consiguiente existe un sólo gasto que puede satisfacer esta condición.

El cambio de régimen de lento a rápido ocurre en forma gradual, sin involucrar grandes pérdidas de energía específica (flujo sobre un cimacio), en tanto que el cambio de régimen rápido a lento sucede por lo general en forma abrupta y con grandes pérdidas de energía específica (salto hidráulico).

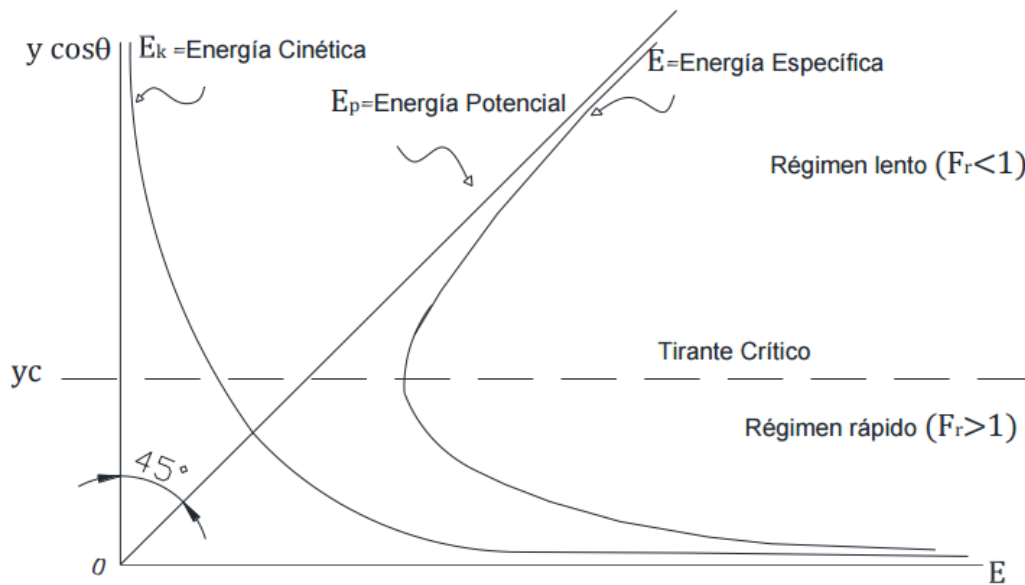


Figura N° 14 : Ilustración gráfica, Energía cinética; Energía potencial y Energía Específica

2.4. La Variables

2.4.1. Variable Independiente.

Canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la UPAO.

2.4.2. Variable Dependiente.

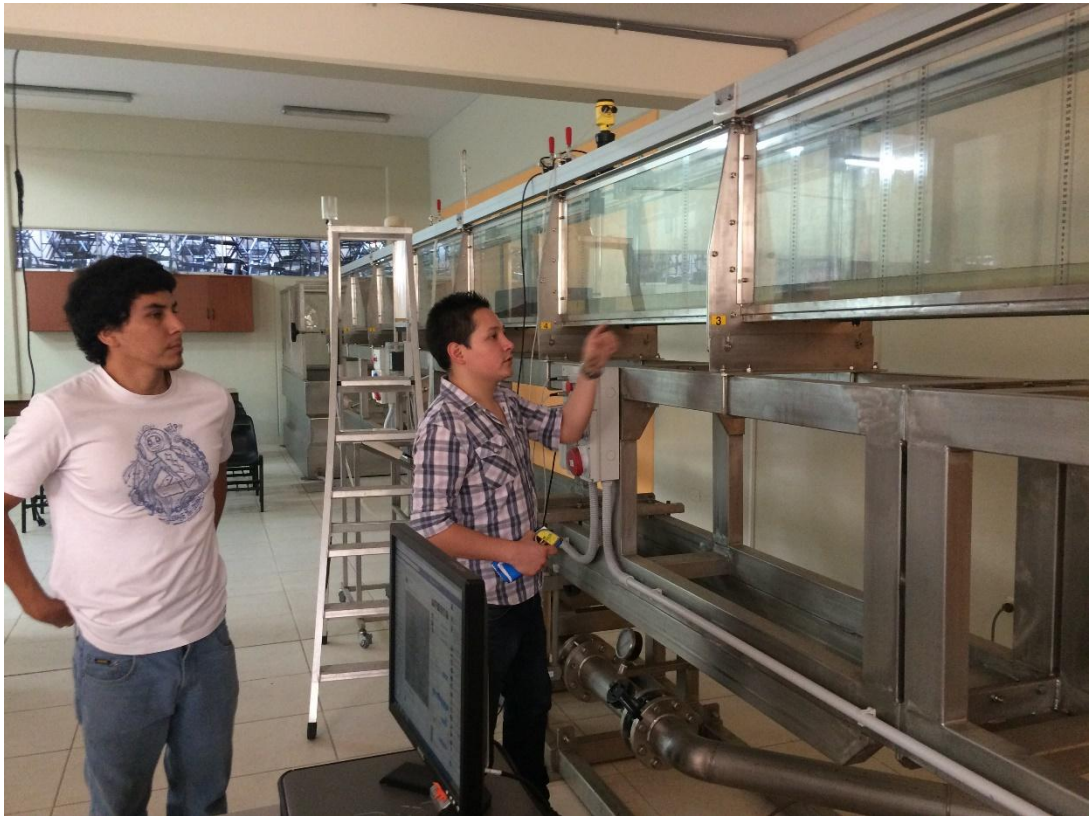
Coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y momentum de Boussinesq (β), para flujo subcrítico, crítico y supercrítico.

CAPITULO III METODOLOGÍA

3.1. Población y Muestra

Población.

El universo al cual va dirigido la investigación son los canales de pendiente variable y la determinación experimental de los Coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y momentum de Boussinesq (β), para flujo subcrítico, crítico y supercrítico.



Fotografía N° 04 : Vista de toma de datos del trabajo de investigación de Tesistas, en el canal de pendiente variable de la UPAO.

Muestra.

La muestra que se tomó, es el canal de pendiente variable del laboratorio de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo.



Fotografía N° 05 : Vista del Canal de Pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo.

3.2.Modalidad Básica de la Investigación

Las modalidades de investigación empleadas fueron:

- Campo.- Se realizó levantamiento de información in situ, elaborando el inventario de equipos, accesorios, instrumentos, software del canal de pendiente variable del laboratorio de la Universidad Privada Antenor Orrego, estudios realizados, valores de coeficientes de Coriolis y de Boussinesq para los flujos subcrítico, crítico y supercrítico. Se fabricó un accesorio longitudinal de canal triangular para tomar datos y determinar los coeficientes de Coriolis y de Boussinesq en el canal triangular.
- Documental Bibliográfico.- Se consultó material bibliográfico sobre estudios realizados , valores de coeficientes de Coriolis y de Boussinesq para los flujos subcritico, crítico y supercrítico en canales rectangulares y en canales triangulares.

3.3.Nivel o Tipo de Investigación

Los niveles de investigación en el proyecto son:

- Exploratorio.- Se realizó levantamiento de información empleando un inventario de equipos, accesorios, instrumentos, software y funcionamiento del canal de pendiente variable del laboratorio de la Universidad Privada Antenor Orrego, estudios realizados , valores de coeficientes de Coriolis y de Boussinesq para los flujos subcritico, crítico y supercrítico, para establecer los parámetros para la determinación de los coeficientes de corrección de Coriolis y de Boussinesq en el canal de pendiente Variable y en un accesorio longitudinal de 2 metros de un canal triangular.
- Descriptivo.- Definimos los valores de los coeficientes de Coriolis y de Boussinesq para los flujos subcritico, crítico y supercrítico en el canal rectangular de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo y en un accesorio longitudinal de un canal triangular.
- Explicativo.- Se aclara la aplicación y uso de valores de los coeficientes de Coriolis y de Boussinesq para los flujos subcritico, crítico y supercrítico en el canal de pendiente variable del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, así como contribuirá para prácticas de laboratorio para alumnos y docentes de los cursos de Ingeniería Civil y en especial para Estructuras Hidráulicas, Hidrología, Irrigación y drenaje y Mecánica de Fluidos, así como contribuirá para proyectos de Ingeniería y consultoría de la Región de la Libertad y del Perú.

3.4. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

3.4.1. Variable Independiente.

Tabla N° 03 : Canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la UPAO

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítem	Técnicas e Instrumentos
Canal de pendiente variable de 10 metros UPAO. La serie de canales H91.8D ha sido diseñada por Didacta Italia para el estudio de los fenómenos hidrodinámicos de las corrientes de superficie libre en los canales abiertos con pendiente variable	Inventario	Longitud Sección Típica bombas accesorios	¿Cuál es longitud? ¿Cuál es la sección típica? ¿Qué sistema de bombas existe? ¿Qué tipo de accesorios existe?	Observación directa Fichas nemotécnicas Cuaderno de notas Uso de sistema de posicionamiento global Cartas topográficas Cámara fotográfica
	Evaluación de la Velocidad y cálculo de Coeficientes de Coriolis y de Boussinesq	Caudal Área Hidráulica Velocidad	¿Cuál es el caudal del canal ? ¿Cuáles son las áreas hidráulicas de los canales Rectangular y Triangular ? ¿Cuáles son las velocidades de los canales Rectangular y triangular ?	Observación directa Fichas nemotécnicas Cuaderno de notas Especificaciones de Didacta Italia Software disponible
	Niveles de intervención	Operatividad Mantenimiento Mejoramiento	¿Cuáles son las tareas de mantenimiento y mejoramiento? ¿Cuál son las tareas de operatividad ?	Observación directa Fichas nemotécnicas Lista de chequeo
	Modalidad de Ejecución	Administración Directa Contrato por Niveles de Servicio Concesión Convenio Interinstitucional	¿Cuál es la modalidad de Administración Directa? ¿Cuál es la modalidad por Niveles de Servicio? ¿Cuál es la modalidad de Concesiones? ¿Cuál es la modalidad de Convenios Interinstitucionales?	Observación directa Cuaderno de notas

3.4.2.Variable Dependiente.

Tabla N° 04 : Coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y momentum de Boussinesq (β), para flujo subcrítico, crítico y supercrítico.

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítem	Técnicas e Instrumentos
Coeficientes de distribución de velocidad de energía de Coriolis (α) y momentum de Boussinesq (β), para flujo subcrítico, crítico y supercrítico. El coeficiente de Coriolis α que aparece en la expresión de la energía cinética, representa la relación que existe, para una sección dada, entre la energía real y la que se obtendría . La distribución no uniforme de velocidades también afecta el cálculo del momentum en flujo de canales abiertos.	Mantenimiento diario	Equipo y maquinaria Mano de obra Materiales	¿Qué equipo y maquinaria se necesita? ¿Cuál es la mano de obra necesaria? ¿Qué materiales se necesitan?	Observación directa Fichas nemotécnicas Cuaderno de notas Manual de rubros y rendimientos
	Mantenimiento mensual	Equipo y maquinaria Mano de obra Materiales	¿Qué equipo y maquinaria se necesita? ¿Cuál es la mano de obra necesaria? ¿Qué materiales se necesitan?	Observación directa Fichas nemotécnicas Cuaderno de notas Manual de rubros y rendimientos
Costos de Operación y mantenimiento Son los costos que genera el canal de pendiente variable, en ensayos y estudios de Investigación de hidráulica	Costos variables	Energía Eléctrica Agua Lubricantes	¿Cuánto consume el canal en energía eléctrica? ¿Cuál es el tiempo de duración las bombas y accesorios del canal ? ¿Cuánto se gasta en lubricantes y aceites?	Registro de horas de trabajo y consumo Hojas de ruta
	Costos fijos	Seguros Impuestos Matrícula	¿Cuánto se gasta en seguros? ¿Cuánto se gasta en salarios? ¿Cuánto se gasta en la matrícula o registro ?	Cuaderno de notas y registros de facturas

***Fuente: Elaboración propia**

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Se realizó la investigaciones en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo, para recopilar información sobre velocidad del fluido (agua) en :

- 1°. Canal rectangular de pendiente variable y
- 2°. Accesorio longitudinal de un canal triangular.
- 3°. Inventario de accesorios y equipos que comprende: inventarios, monitoreo, intervenciones.

3.6. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

La información de campo y bibliográfica, se procesará analizando los resultados y representándolos en gráficos, cuadros, con apoyo de marcos teóricos, formulas y softwares.

Se enfoca, en el análisis de los coeficientes de Coriolis y de Boussinesq a ser aplicados, se presentaran cuadros que permitan levantar la información requerida, para poner en práctica los coeficientes determinados para estudios de consultoría y de ensayos de mecánica de Fluidos para los alumnos de las carreras de Ingeniería de la Universidad Privada Antenor Orrego.

Se procesará los datos y se analizará los beneficios de aplicación de los valores de Coeficientes de Coriolis y de Boussinesq en estudios del área de Hidráulica.

1° Canal Rectangular

- 1.1. Coeficiente de Coriolis (α)
- 1.2. Coeficiente de Boussinesq (β)

2° Canal Triangular

- 2.1. Coeficiente de Coriolis (α)
- 2.2. Coeficiente de Boussinesq (β)

Al concluir el análisis, se presentará los valores de los coeficientes de Coriolis y de Boussinesq y que por sus condiciones podrá ser aplicado en estudios de Hidráulica y permitiendo provechar la información para implementar acciones que ayuden a tomar los valores de los coeficientes determinados.

DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES

Para lograr una medición sistemática se adoptó una rutina explicada a continuación:

- 1.- Como primera medida se procede a conectar el cable de corriente a la red eléctrica (alimentación eléctrica: 380v, trifásica y neutro, 50/60 Hz, 7K W).
- 2.- Se comprobó que todas las válvulas estén cerradas y que el canal este colocado en posición horizontal con respecto al suelo.
- 3.- Se montó el correntómetro en un eje que lo sujeta al accesorio para que pueda desplazarse en el canal de pendiente variable.
- 4.- Se subió la compuerta de ingreso del agua girando el volante (rueda manual) en sentido anti horario.
- 5.- Se accionó el interruptor principal y se pulsó el botón start.
- 6.- Se ingresó los caudales deseados regulando la válvula de mariposa para que estos se muestren en el medidor de caudales.
- 7.- Modificamos la pendiente del canal, subiendo o bajando de acuerdo a nuestros datos.
- 8.- Se activa correntómetro, el cual hace un promedio de la velocidad en el punto de medida durante 30 segundos.
- 9.- Se toman los datos de los tirantes y las velocidades para diversos puntos en la sección rectangular y triangular.
- 10.- Se procesó y analizo los datos obtenidos en gabinete.



a) Para Una pendiente de 7 mm



b) $d = 5.4$



c) Tabla = 61.3

Fotografía N° 06 : Vista del Dispositivo de medición de pendiente (a), el valor de d (b) y el valor de tabla (Indicator Reading Hz) (c); accesorios del canal de pendiente variable del laboratorio de Hidráulica de la UPAO. Trujillo.

Streamflo Probe Calibration Chart

Use green figures for high speed probes
Use red and black figures for low speed probes

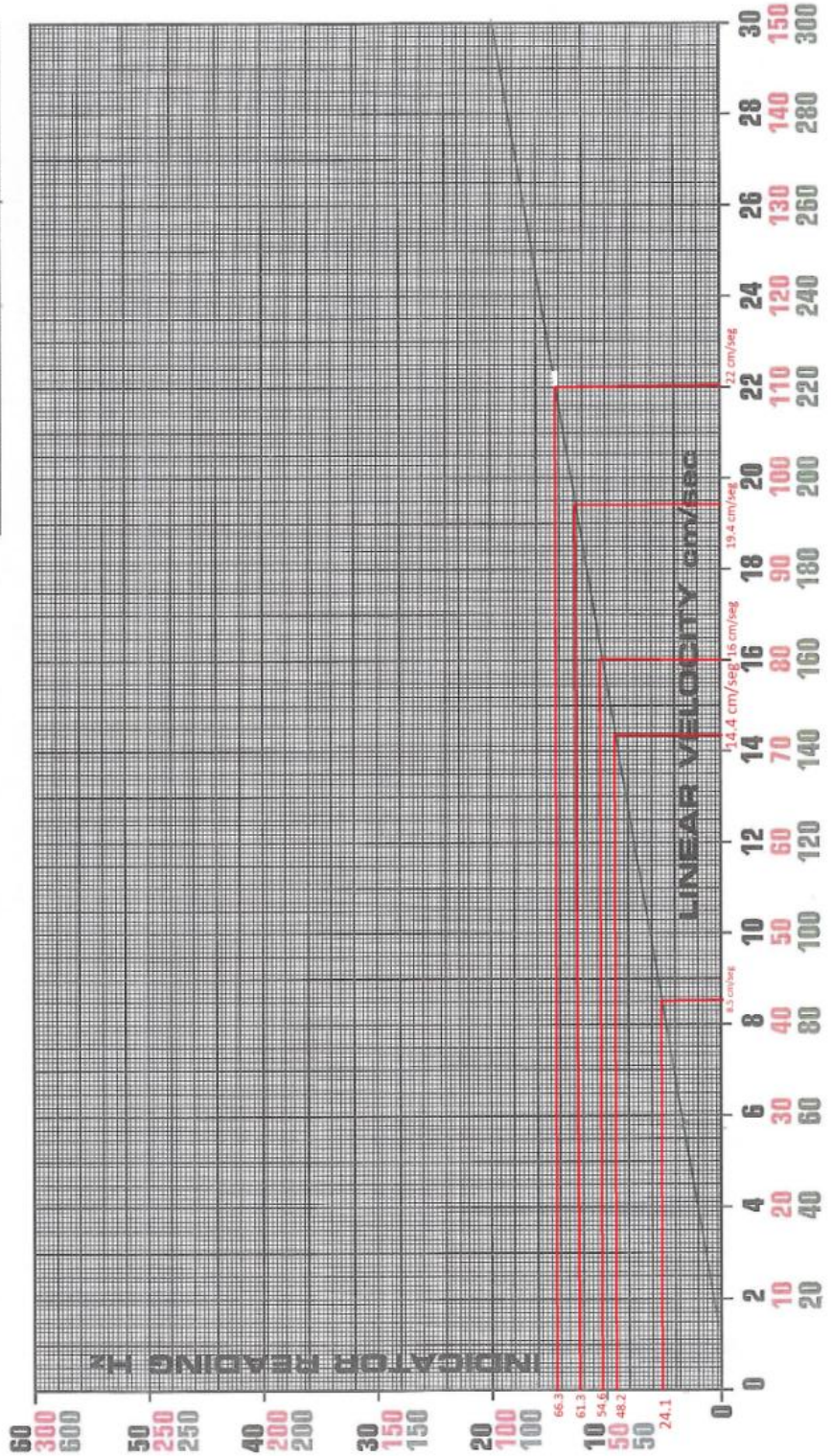


Figura N° 15 : Abaco para determinar la velocidad del canal de pendiente variable del laboratorio de la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo
Fuente : DIDACTA .Italia

El número de Froude , está gobernado por efectos de :

- Viscosidad.
- Gravedad Relativa.
- Fuerzas de Inercia del Flujo.

De acuerdo al valor del número de Froude, se puede clasificar al flujo en:

Flujo lento	→	$Fr < 1.0$	→	flujo subcrítico ($y > y_c$)
Flujo crítico	→	$Fr = 1.0$	→	flujo crítico ($y = y_c$)
Flujo rápido	→	$Fr > 1.0$	→	flujo supercrítico ($y < y_c$)

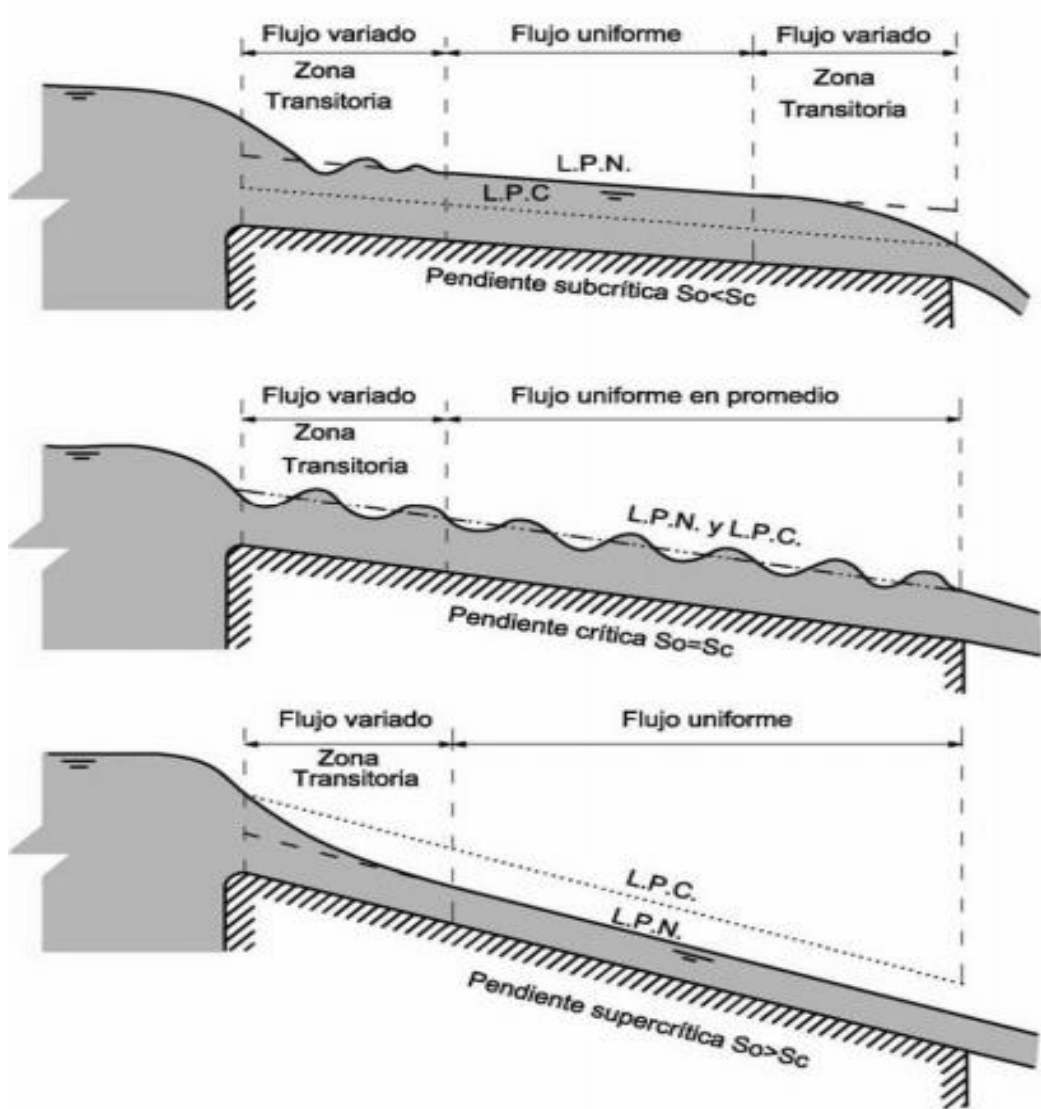


Figura N° 16 : Establecimientos de flujos en canal Rectangular y canal Triangular , motivo de la investigación

CAPITULO IV

RESULTADOS

Tabla N° 07 : Resumen de los cálculos de α y β para canal Rectangular por diferentes métodos. Flujo Subcrítico.

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	1.09	1.18	1.07
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	1.05	1.10	1.04
Según Chow			
$\mu = \frac{V_M}{V} \quad \Gamma$	0.079	0.200	0.082
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.02	1.10	1.02
$\beta = 1 + \mu^2$	1.01	1.04	1.01
Según Chow usando el criterio de Manning			
$R_H = \frac{b y}{b + 2y}$	0.048	0.045	0.043
$\mu_H = n g^{1/2} R^{-1/6}$	0.051	0.052	0.052
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.01	1.01	1.01
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.00
Según Cobb (1968) y Hulsing (1966)			
$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667$	0.69	0.84	1.06
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0.079	0.228	0.082
$\alpha = e^{0.96}$	1.08	1.21	1.08
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	1.04	1.10	1.04

Fuente : Propia

Tabla N° 08 : Medición con fondo liso, caudal 7 litros /seg. Canal Rectangular de pendiente variable del laboratorio de la UPAO. Flujo Subcritico.

Medición caudal 7 [l/s]				
Profundidad 0,06 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.05	0.15	0.25	
0.05	0.83	0.85	0.81	0.83
0.03	0.74	0.75	0.73	0.74
0.015	0.63	0.66	0.61	0.63

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.05	0.83
0.03	0.74
0.015	0.63

Tabla N° 09 : Medición con fondo liso, caudal 8 litros por segundo. Canal Rectangular de pendiente variable del laboratorio de la UPAO. Flujo Subcritico.

Medición con paredes liso, caudal 8 [l/s]				
Profundidad 0,066 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.05	0.15	0.25	
0.055	0.81	0.84	0.83	0.83
0.035	0.65	0.67	0.64	0.65
0.025	0.62	0.66	0.61	0.63

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.05	0.83
0.03	0.65
0.015	0.63

Tabla N° 10 : Medición con fondo liso, caudal 9 litros por segundo. Canal Rectangular de pendiente variable del laboratorio de la UPAO. Flujo Subcritico.

Medición con paredes liso, caudal 9 [l/s]				
Profundidad 0,071 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.05	0.15	0.25	
0.06	0.81	0.84	0.83	0.83
0.04	0.76	0.77	0.74	0.76
0.02	0.69	0.71	0.68	0.69

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.06	0.83
0.04	0.76
0.02	0.69

Tabla N° 11 : Resumen de los cálculos de α y β para canal Rectangular por diferentes métodos. Flujo crítico.

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	1.09	1.07	1.17
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	1.05	1.05	1.11
Según Chow			
$\mu = \frac{V_M}{V} \quad \text{†}$	0.066	0.055	0.123
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.01	1.01	1.04
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.02
Según Chow usando el criterio de Manning			
$R_H = \frac{b_y}{b + 2y}$	0.0346	0.0325	0.0303
$\mu_H = ng^{1/2} R^{-1/6}$	0.054	0.055	0.056
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.01	1.01	1.01
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.00
Según Cobb (1968) y Hulsing (1966)			
$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667$	0.72	0.59	0.61
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0.066	0.055	0.123
$\alpha = e^{0.96}$	1.06	1.05	1.12
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	1.03	1.03	1.06

Fuente: Propia

Tabla N° 12 : Medición con fondo liso, caudal 7 litros /seg. Canal Rectangular de pendiente variable del laboratorio de la UPAO. Flujo critico.

Medición con paredes liso, caudal 7 [l/s]				
Profundidad 0,038 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.05	0.15	0.25	
0.035	1.20	1.21	1.19	1.20
0.025	1.08	1.10	1.07	1.08
0.015	1.02	1.04	1.03	1.03

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.035	1.20
0.025	1.08
0.015	1.03

Tabla N° 13 : Medición con fondo liso, caudal 8 litros por segundo. Canal Rectangular de pendiente variable del laboratorio de la UPAO. Flujo critico.

Medición con paredes liso, caudal 8 [l/s]				
Profundidad 0,0416 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.05	0.15	0.25	
0.035	1.15	1.17	1.16	1.16
0.025	1.10	1.12	1.09	1.10
0.015	1.02	1.06	1.04	1.04

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.035	1.16
0.025	1.10
0.015	1.04

Tabla N° 14 : Medición con fondo liso, caudal 9 litros por segundo. Canal Rectangular de pendiente variable del laboratorio de la UPAO. Flujo critico.

Medición con paredes liso, caudal 9 [l/s]				
Profundidad 0,045 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.05	0.15	0.25	
0.035	1.03	1.05	1.04	1.04
0.025	0.95	0.98	0.96	0.96
0.015	0.86	0.89	0.87	0.87

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.035	1.04
0.025	0.96
0.015	0.87

Tabla N° 15 : Resumen de los cálculos de α y β para canal Rectangular por diferentes métodos. Flujo super critico.

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	1.12	1.07	1.22
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	1.08	1.04	1.13
Según Chow			
$\mu = \frac{V_M}{V} \quad \text{†}$	0.056	0.031	0.152
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.01	1.00	1.06
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.02
Según Chow usando el criterio de Manning			
$R_H = \frac{b_y}{b + 2y}$	0.029	0.027	0.025
$\mu_H = n g^{1/2} R^{-1/6}$	0.056	0.057	0.057
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.01	1.01	1.01
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.00
Según Cobb (1968) y Hulsing (1966)			
$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667$	0.57	0.58	0.63
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0.056	0.031	0.152
$\alpha = e^{0.96}$	1.06	1.03	1.16
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	1.03	1.01	1.08

Fuente: Propia

Tabla N° 16 : Medición con fondo liso, caudal 7 litros /seg. Canal Rectangular de pendiente variable del laboratorio de la UPAO. Flujo super critico.

Medición con paredes liso, caudal 7 [l/s]				
Profundidad 0,03 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.05	0.15	0.25	
0.025	1.35	1.36	1.33	1.35
0.02	1.20	1.21	1.19	1.20
0.015	1.13	1.15	1.12	1.13

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.025	1.35
0.02	1.20
0.015	1.13

Tabla N° 17 : Medición con fondo liso, caudal 8 litros por segundo. Canal Rectangular de pendiente variable del laboratorio de la UPAO. Flujo super critico.

Medición con paredes liso, caudal 8 [l/s]				
Profundidad 0,033 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.05	0.15	0.25	
0.025	1.45	1.47	1.46	1.46
0.02	1.42	1.44	1.41	1.42
0.015	1.33	1.34	1.32	1.33

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.025	1.46
0.02	1.42
0.015	1.33

Tabla N° 18 : Medición con fondo liso, caudal 9 litros por segundo. Canal Rectangular de pendiente variable del laboratorio de la UPAO. Flujo super critico.

Medición con paredes liso, caudal 9 [l/s]				
Profundidad 0,036 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.05	0.15	0.25	
0.03	1.26	1.28	1.27	1.27
0.025	1.24	1.26	1.22	1.24
0.015	1.11	1.15	1.13	1.13

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.03	1.27
0.025	1.24
0.015	1.13

Tabla N° 19 : Resumen de los cálculos de α y β para canal Triangular por diferentes métodos. Flujo Subcrítico.

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	1.07	1.17	1.29
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	0.96	1.09	1.27
Según Chow			
$\mu = \frac{V_M}{V} \quad \text{f}$	0.077	0.029	0.071
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.02	1.00	1.01
$\beta = 1 + \mu^2$	1.01	1.00	1.00
Según Chow usando el criterio de Manning			
$R_H = \frac{b_y}{b + 2y}$	0.040	0.035	0.035
$\mu_H = n g^{1/2} R^{-1/6}$	0.0510	0.0525	0.0525
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.01	1.01	1.01
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.00
Según Cobb (1968) y Hulsing (1966)			
$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667$	0.596	0.87	0.70
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0.077	0.029	0.071
$\alpha = e^{0.96}$	1.08	1.03	1.07
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	1.04	1.01	1.03

Fuente: Propia

**Tabla N° 20 : Medición con paredes liso, caudal 7 lps. Canal Triangular.
Flujo Subcritico.**

Medición con paredes liso, caudal 7 [l/s]				
Profundidad 0,197 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.06	0.075	0.09	
0.15	1.06	1.06	1.05	1.06
0.10	0.95	0.97	0.94	0.95
0.05	0.76	0.76	0.76	0.76

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.15	1.06
0.10	0.95
0.05	0.76

**Tabla N° 21 : Medición con paredes liso, caudal 8 lps. Canal Triangular.
Flujo Subcritico.**

Medición con paredes liso, caudal 8 [l/s]				
Profundidad 0,208 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.06	0.075	0.09	
0.15	1.42	1.43	1.41	1.42
0.10	1.34	1.35	1.33	1.34
0.06	1.09	1.09	1.09	1.09

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.15	1.42
0.10	1.34
0.06	1.09

**Tabla N° 22 : Medición con paredes liso, caudal 9 lps. Canal Triangular.
Flujo Subcritico.**

Medición con paredes liso, caudal 9 [l/s]				
Profundidad 0,218 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.06	0.075	0.09	
0.15	1.07	1.09	1.07	1.08
0.10	0.89	0.88	0.86	0.88
0.06	0.78	0.78	0.78	0.78

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.15	1.08
0.10	0.88
0.06	0.78

Tabla N° 23 : Resumen de los cálculos de α y β para canal Triangular por diferentes métodos. Flujo crítico.

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	1.07	1.16	1.35
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	1.04	1.14	1.33
Según Chow			
$\mu = \frac{V_M}{V} \quad \text{f}$	0.035	0.030	0.056
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.00	1.00	1.01
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.00
Según Chow usando el criterio de Manning			
$R_H = \frac{b_y}{b + 2y}$	0.032	0.030	0.028
$\mu_H = ng^{1/2} R^{-1/6}$	0.0543	0.0537	0.0543
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.01	1.01	1.01
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.00
Según Cobb (1968) y Hulsing (1966)			
$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667$	0.76	0.10	0.09
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0.035	0.030	0.056
$\alpha = e^{0.96}$	1.03	1.03	1.05
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	1.02	1.01	1.03

Fuente: Propia

**Tabla N° 24 : Medición con paredes liso, caudal 7 lps. Canal Triangular.
Flujo critico.**

Medición con paredes liso, caudal 7 [l/s]				
Profundidad 0,149 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.04	0.06	0.08	
0.12	1.54	1.55	1.53	1.54
0.09	1.46	1.47	1.44	1.46
0.06	1.41	1.41	1.41	1.41

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.12	1.54
0.09	1.46
0.06	1.41

**Tabla N° 25 : Medición con paredes liso, caudal 8 lps. Canal Triangular.
Flujo critico.**

Medición con paredes liso, caudal 8 [l/s]				
Profundidad 0,157 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.04	0.06	0.08	
0.12	1.47	1.49	1.46	1.47
0.09	1.42	1.43	1.41	1.42
0.06	1.39	1.39	1.39	1.39

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.12	1.47
0.09	1.42
0.06	1.39

**Tabla N° 26 : Medición con paredes liso, caudal 9 lps. Canal Triangular.
Flujo critico.**

Medición con paredes liso, caudal 9 [l/s]				
Profundidad 0,165 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.04	0.06	0.08	
0.12	1.45	1.47	1.46	1.46
0.09	1.39	1.40	1.39	1.39
0.06	1.30	1.30	1.30	1.30

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.12	1.46
0.09	1.39
0.06	1.30

Tabla N° 27 : Resumen de los cálculos de α y β para canal Triangular por diferentes métodos. Flujo super critico.

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	1.27	1.30	1.47
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	1.25	1.29	1.46
Según Chow			
$\mu = \frac{V_M}{V} \quad \text{f}$	0.043	0.028	0.012
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.01	1.00	1.00
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.00
Según Chow usando el criterio de Manning			
$R_H = \frac{by}{b + 2y}$	0.028	0.026	0.025
$\mu_H = ng^{1/2} R^{-1/6}$	0.0552	0.0552	0.0552
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	1.01	1.01	1.01
$\beta = 1 + \mu^2$	1.00	1.00	1.00
Según Cobb (1968) y Hulsing (1966)			
$\frac{\alpha - \beta}{\beta - 1} = \frac{5}{3} = 1.667$	0.12	0.04	0.02
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\mu = \frac{V_M}{V} - 1$	0.043	0.028	0.012
$\alpha = e^{0.96}$	1.04	1.03	1.01
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	1.02	1.01	1.01

Fuente: Propia

**Tabla N° 28 : Medición con paredes liso, caudal 7 lps. Canal Triangular.
Flujo super critico.**

Medición con paredes liso, caudal 7 [l/s]				
Profundidad 0,13 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.04	0.06	0.08	
0.11	1.70	1.71	1.69	1.70
0.09	1.67	1.68	1.66	1.67
0.06	1.65	1.65	1.65	1.65

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.11	1.70
0.09	1.67
0.06	1.65

**Tabla N° 29 : Medición con paredes liso, caudal 8 lps. Canal Triangular.
Flujo super critico.**

Medición con paredes liso, caudal 8 [l/s]				
Profundidad 0,137 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vpromedio (m/s)
	0.04	0.06	0.08	
0.11	1.71	1.72	1.70	1.72
0.08	1.66	1.67	1.66	1.67
0.06	1.65	1.65	1.65	1.65

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.11	1.72
0.08	1.67
0.06	1.65

**Tabla N° 30 : Medición con paredes liso, caudal 9 lps. Canal Triangular.
Flujo super critico.**

Medición con paredes liso, caudal 9 [l/s]				
Profundidad 0,144 m, control aguas abajo posición del canal				
Profundidad [m]	Ancho(m)			Vprom.(Hz)
	0.04	0.06	0.08	
0.11	1.88	1.90	1.87	1.88
0.09	1.82	1.83	1.81	1.82
0.06	1.68	1.68	1.68	1.68

Profundidad [m]	Velocidad [m/s]
0.11	1.88
0.09	1.82
0.06	1.68

Tabla N° 31 : Resumen de los cálculos de α y β en % para canal Rectangular por diferentes métodos. Flujo Subcrítico

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	100%	100%	100%
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	100%	100%	100%
Según Chow			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	94%	93%	95%
$\beta = 1 + \mu^2$	93%	95%	97%
Según Chow usando el criterio de Manning			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu$	93%	93%	93%
$\beta = 1 + \mu^2$	92%	92%	92%
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\alpha = e^{0.96}$	99%	103%	101%
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	99%	100%	100%

Fuente: Propia

Tabla N° 32 : Resumen de los cálculos de α y β en % para canal Rectangular por diferentes métodos. Flujo critico

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	100%	100%	100%
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	100%	100%	100%
Según Chow			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	93%	94%	89%
$\beta = 1 + \mu^2$	92%	95%	92%
Según Chow usando el criterio de Manning			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu$	93%	93%	93%
$\beta = 1 + \mu^2$	92%	92%	92%
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\alpha = e^{0.96}$	97%	98%	96%
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	98%	98%	95%

Fuente: Propia

Tabla N° 33 : Resumen de los cálculos de α y β en % para canal Rectangular por diferentes métodos. Flujo super crítico

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	100%	100%	100%
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	100%	100%	100%
Según Chow			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	90%	93%	87%
$\beta = 1 + \mu^2$	89%	96%	90%
Según Chow usando el criterio de Manning			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu$	90%	90%	90%
$\beta = 1 + \mu^2$	89%	89%	89%
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\alpha = e^{0.96}$	95%	96%	95%
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	95%	97%	96%

Fuente: Propia

Tabla N° 34 : Resumen de los cálculos de α y β en % para canal Triangular por diferentes métodos. Flujo subcrítico

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	100%	100%	100%
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	100%	100%	100%
Según Chow			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	95%	85%	78%
$\beta = 1 + \mu^2$	94%	92%	79%
Según Chow usando el criterio de Manning			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu$	94%	94%	94%
$\beta = 1 + \mu^2$	93%	93%	93%
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\alpha = e^{0.96}$	101%	88%	83%
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	106%	93%	80%

Fuente: Propia

Tabla N° 35 : Resumen de los cálculos de α y β en % para canal Triangular por diferentes métodos. Flujo crítico

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	100%	100%	100%
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	100%	100%	100%
Según Chow			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	93%	86%	75%
$\beta = 1 + \mu^2$	93%	88%	75%
Según Chow usando el criterio de Manning			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu$	94%	94%	94%
$\beta = 1 + \mu^2$	93%	93%	93%
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\alpha = e^{0.96}$	96%	89%	78%
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	98%	89%	77%

Fuente: Propia

Tabla N° 36 : Resumen de los cálculos de α y β en % para canal Triangular por diferentes métodos. Flujo super crítico

Expresión	FONDO LISO		
	Caudal [l/s]		
	9	8	7
Cálculo de α y β a partir de valores discretos			
$\alpha = \frac{1}{yV^3} \sum y^3 \Delta y$	100%	100%	100%
$\beta = \frac{1}{yV^2} \sum y^2 \Delta y$	100%	100%	100%
Según Chow			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu^3$	80%	77%	68%
$\beta = 1 + \mu^2$	79%	78%	68%
Según Chow usando el criterio de Manning			
$\alpha = 1 + 3\mu^2 - 2\mu$	80%	80%	80%
$\beta = 1 + \mu^2$	79%	79%	79%
Según Jaeger (1949,1968) y Mazumder (1971)			
$\alpha = e^{0.96}$	82%	79%	69%
$\beta = e^{0.48\mu} = \alpha$	82%	78%	69%

Fuente: Propia

**Tabla N° 37 : Valores Obtenidos en canales de laboratorio de hidráulica de la
UPAO : Rectangular y Triangular**

DESCRIPCION DE CANAL	Coeficientes	Flujo Subcritico	Flujo Critico	Flujo Supercrítico
CANAL RECTANGULAR	α	1.12	1.11	1.14
	β	1.06	1.07	1.08
CANAL TRIANGULAR	α	1.18	1.19	1.35
	β	1.07	1.17	1.33

Fuente: Propia

CAPITULO V

DISCUSIÓN

Es evidente que el uso de los coeficientes α y β depende de la exactitud con la que se estén haciendo los cálculos. Ambos son siempre mayores que la unidad. En muchos casos se justifica, considerar :

$$\alpha = \beta = 1$$

Pero este valor de 1 no se justifica en forma general, en razón que no se toma en cuenta los valores exactos de los coeficientes α y β para que no exista un error en los cálculos de la velocidad en diversos proyectos de la hidráulica, dado que la velocidad no es absoluta y cambia debido a la existencia de diversos parámetros como son: viscosidad, temperatura, pH, sedimentos, etc.

Por tal razón en nuestro trabajo de investigación en el canal rectangular de pendiente de variable de nuestro laboratorio de hidráulica y en el accesorio longitudinal de un canal triangular, hemos tomado datos inherentes para la determinación de dichos coeficientes tanto para el canal rectangular como para el canal triangular.

Asi mismo se a podido evaluar que α es mayor que β en razón que en la expresión de $\alpha Vh / V$ interviene al cubo y en la expresión de β interviene al cuadrado; tal como lo demostramos en los resultados (tablas N° 07, 11, 15, 19, 23, 27).

Los valores de α y β calculados a partir de valores discretos se refieren a los valores calculados en el laboratorio de hidráulica de la UPAO; los cuales difieren por ser mayores a los calculados con las fórmulas de otros autores: Chow, Manning, Cobb, Hulsing, Jeager, Mazumder en razón que dichos autores realizaron la determinación experimental en canales muy anchos. Dichos valores se indican en las tablas N° 07, 11, 15, 19, 23, 27

Debido a la mayor turbulencia del flujo en régimen supercrítico se observa que los valores de α y β tienden a subir con respecto al régimen crítico y régimen subcrítico (ver figuras N°) lo que hace que la distribución sea errática.

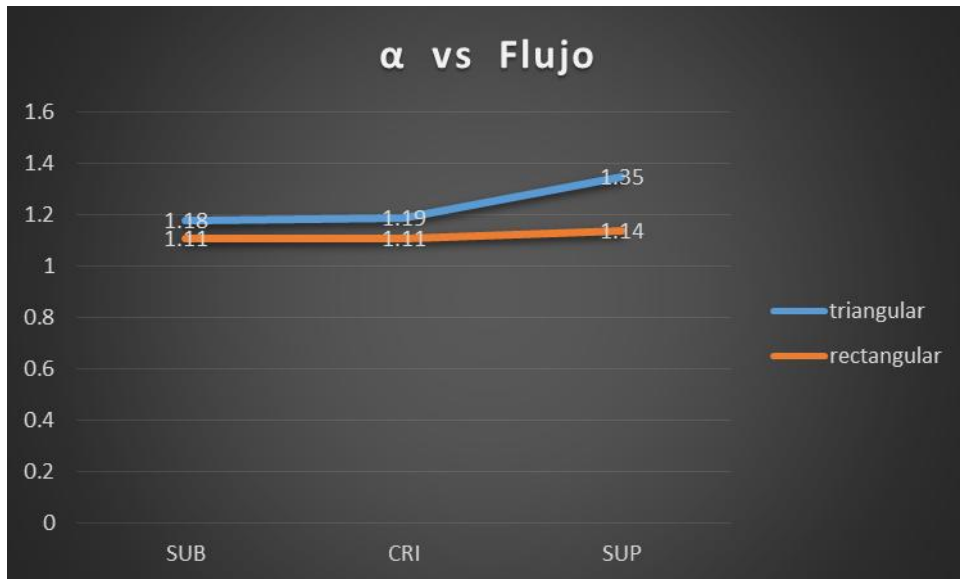


Figura N° 17

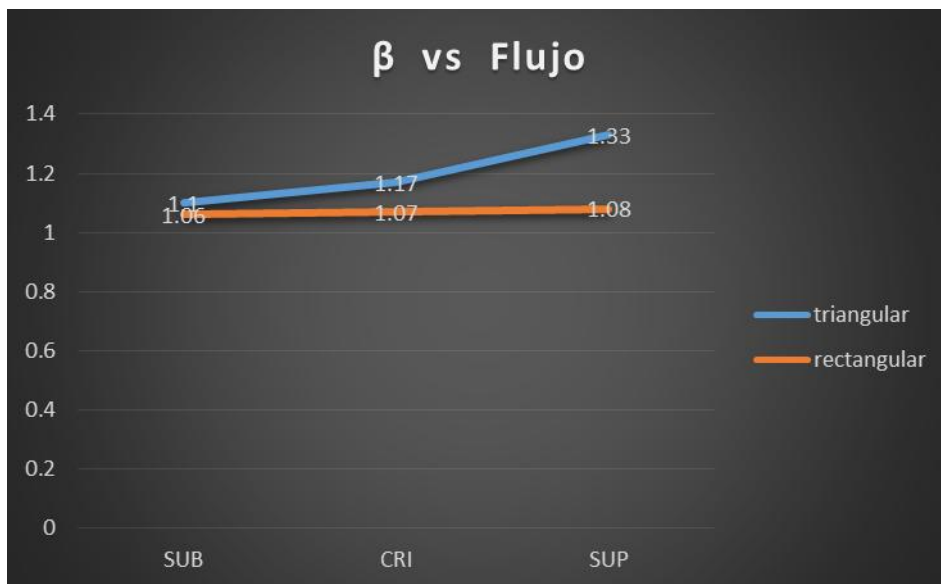


Figura N° 18

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

Realizada la investigación podemos concluir lo siguiente:

En la determinación Experimental de los coeficientes de velocidad de Coriolis (α) y Boussinesq (β) para flujo subcrítico , crítico y supercrítico en canal de pendiente variable del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego puede concluirse que:

1.- Para el canal Rectangular los valores de α en Flujo Subcrítico es 1.12; en Flujo Crítico es 1.11 y en Flujo Supercrítico es 1.14 y los valores de β en Flujo Subcrítico es 1.06; en Flujo Crítico es 1.07 y en Flujo Supercrítico es 1.08 respectivamente. Son independientes de la sección hidráulica y su valor es una función de la distribución de todas velocidades puntuales.

2.- Para canales triangulares los valores de α Flujo Subcrítico es 1.18; en Flujo Crítico es 1.19 y en Flujo Supercrítico es 1.35 y los valores de β en Flujo Subcrítico es 1.07 ; en Flujo Crítico es 1.17 y en Flujo Supercrítico es 1.33 ; respectivamente. Son independientes de la sección hidráulica y su valor es una función de la distribución de todas velocidades puntuales.

3.- Los valores α y β calculados en el canal de pendiente variable y en el accesorio longitudinal triangular del laboratorio de la UPAO son mayores que 1 en razón que el ancho de los canales motivo de la investigación son angostos o pequeños.

4.- Los valores de la distribución de la velocidad para diferentes caudales varían en función inversa con la profundidad de todos los valores evaluados en el trabajo de investigación. Es decir, la velocidad mínima de un canal generalmente se obtiene en la proximidad de las paredes y en el fondo del canal; dado que las paredes ejercen una fricción sobre el agua lo cual reduce su velocidad.

5.- los valores de los coeficientes De distribución de velocidad de coriolis α y boussinesq β obtenidos en el laboratorio de hidráulica de la UPAO comparados con los obtenidos mediante expresiones teóricas y de otras investigaciones, varían en un porcentaje del 1% al 30% como se indica en las tablas N° 31 a 36.

6.-En la determinación de los coeficientes de velocidad de Coriolis (α) y Boussinesq (β) para flujo subcrítico , crítico y supercrítico en canal de pendiente variable del laboratorio de Hidráulica de la Universidad Privada Antenor Orrego, y en el accesorio de canal triangular de madera; se encontró que los valores puntuales de la velocidad medidos permitieron encontrar consistencia en los resultados obtenidos, puesto que uno de los conjuntos de datos analizados arrojó resultados para los coeficientes y fue posible establecer una relación directa entre los flujos de energía y momentum con la magnitud del caudal o la velocidad media del flujo.

7.-El uso de expresiones para el cálculo de α y β en términos de las velocidades máxima y media en el canal pueden resultar más convenientes en términos prácticos para el cálculo de los coeficientes α y β , en lugar de usar la función de la distribución de la velocidad, que sin duda es un procedimiento más analítico de realizar.

8.-En lo que se refiere a los valores determinados para los coeficientes α y β , se considera que los mejores valores calculados corresponden a los que se presentan en la Tabla N°37; para el canal rectangular y triangular; es decir, aquellos obtenidos al utilizar todas las velocidades puntuales.

CAPITULO VII

RECOMENDACIONES

1.- Se recomienda, hacer otros estudios de investigación para determinar los coeficientes de Coriolis (α) y de Boussinesq (β) para diversas secciones transversales de canales y de diferentes materiales de que están contruidos.

2.- Se recomienda que el usuario debe conocer todas las fórmulas y la metodología de diseño de canales, para hacer uso adecuado de la hoja de cálculo y de los softwares a emplearse.

3.- Se recomienda calcular el valor de los coeficientes de Coriolis y de Boussinesq para todo proyecto de hidráulica porque de lo contrario siempre existirá incertidumbre en los resultados y un porcentaje de error.

CAPITULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AZEVEDO N., J. M. Y ACOSTAA., G., (1975). Manual de Hidráulica. Sexta edición. Harla, S. A. de C. V. México.
- CHOW, VEN TE (1959). Open Channel Hydraulics. McGraw- Hill. New York, New York.
- CHOW, VEN TE (1982). Hidráulica de los Canales abiertos. Primera Edición .Editorial Diana. México.
- CADAVID, JUAN H. (2006).Hidráulica de Canales: Fundamentos. Editorial EAFIT. Medellin. Colombia.
- CHIU, C.L. (1991) .Application of Entropy Concept in Open-Channel Flow Study.J. Hydr. Engrg., ASCE, 117(5), 615-628.
- CHIU, C.L.(1988). Entropy and 2-D velocity distribution in open channels. J. Hydr. Engrg., ASCE, 114(7), 738-756.
- CHIU, C.L.(1989) - Velocity distribution in open channel flow. J. Hydr. Engrg., ASCE, 115(5), 576- 594.
- ESTRADA GUTIERREZ G. (2014). Laboratorio de Hidráulica de Canales. Colombia.
- H. DARCY y H. BAZIN (1865). Recherhes Hydrauliques.Academie Des Sciences. Paris.
- JULIEN, PIERRE (1998). Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press, pp. 280.
- JARRÍN CORAL M.F. (2014). Bases para el diseño hidráulico de transiciones en flujo subcrítico y supercrítico. Ecuador.
- LI,HAGER.(1991). Correction coefficients for uniform channel flow. Canadian journal of civil engineering,18,156-158, 1991.
- Ligget.Critical depth, velocity profiles and averaging.Journal of irrigation and drainage engineering. 119.416-422, 1993.

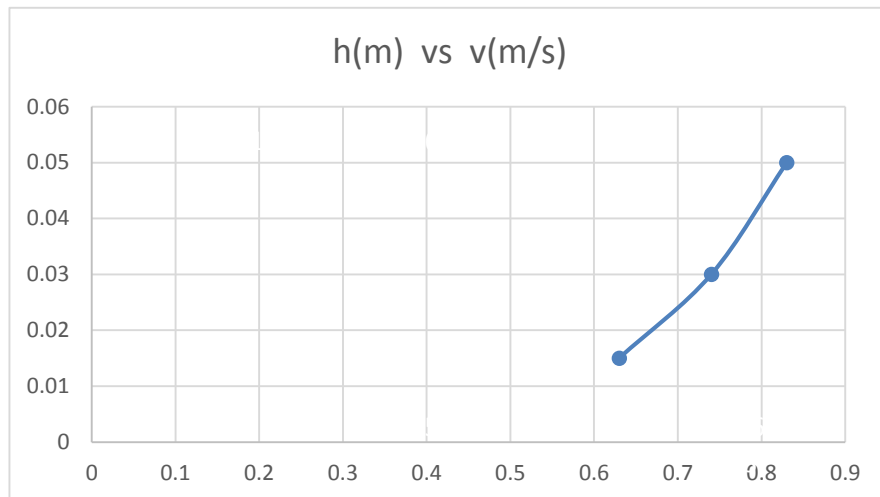
- NAUDASCHER Eduard (2001). Hidráulica de Canales, México.
- QUINTELA ESTEVEZ, P., (2000). Matemáticas en ingeniería con MATLAB. Servicio de Publicaciones da Universidad de Santiago de Compostela.
- RODRÍGUEZ RUIZ Pedro. (2008). Hidráulica II. Hidráulica de Canales. Editorial Nuevo Mundo. Lima. Peru.
- ROUSE HUNTER, INCE SIMON. (1957). History of Hydraulics. Dover Publications. New York, Inc. 269 p.
- SECKIN, GALIP. (2009). Experimental investigation of kinetic energy and momentum correction coefficients in open channels. Scientific Research and Essay Vol. 4 (5) pp. 473-478, April.
- SOTELO ÁVILA GILBERTO. (2010). Hidráulica II, Universidad Nacional Autónoma de México.
- STEPONAS KOLUPAILA (1892) . Hidrología de los ríos lituanos.
- STOKER, J. J. (1957). Water waves, Vol. IV de Pure and Applied Mathematics, Interscience Publishers, Inc., New York.
- STREETER VL, WYLIE EB. (1979). Fluid Mechanics. McGraw-Hill, New York, 1979.

ANEXO

Calculo coriolis y boussinesq sección rectangular

SUBCRITICO $Q=7\text{Lps}$
 $Y=$ 0.06 $b=$ 0.3

$h(\text{m})$	$Vh(\text{m/s})$
0.05	0.83
0.03	0.74
0.015	0.63



$q=$ $0.0131175 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

$V=$ 0.72875 m/s

CUADRO CORIOLIS

Vh	Vh^3	A	Vh^3A
0.83	0.571787	0.00675	0.0038596
0.74	0.405224	0.00525	0.0021274
0.63	0.250047	0.006	0.0015003

$V_m=$ 0.73 Σ 0.0074873

$\alpha=$ 1.07

CUADRO BOUSSINESQ

Vh	Vh^2	A	Vh^2A
0.83	0.6889	0.00675	0.00465008
0.74	0.5476	0.00525	0.0028749
0.63	0.3969	0.006	0.0023814

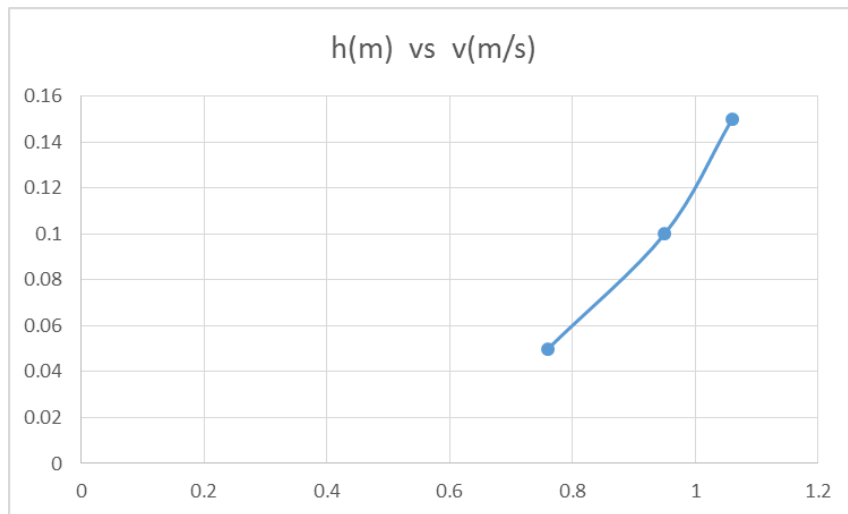
$V_m=$ 0.73 Σ 0.00990638

$\beta=$ 1.04

Calculo coriolis y boussinesq sección triangular

SUBCRITICO Q=7Lps
 Y= 0.197 Z= 0.38071066

h(m)	Vh(m/s)
0.15	1.06
0.1	0.95
0.05	0.76



CUADRO CORIOLIS

Vh	Vh3	A	Vh3A
1.06	1.191016	0.00900	0.0107191
0.95	0.857375	0.0045	0.0038582
0.76	0.438976	0.001	0.0004390

Vm= 0.92 Σ 0.0150163

$\alpha = 1.29$

CUADRO BOUSSINESQ

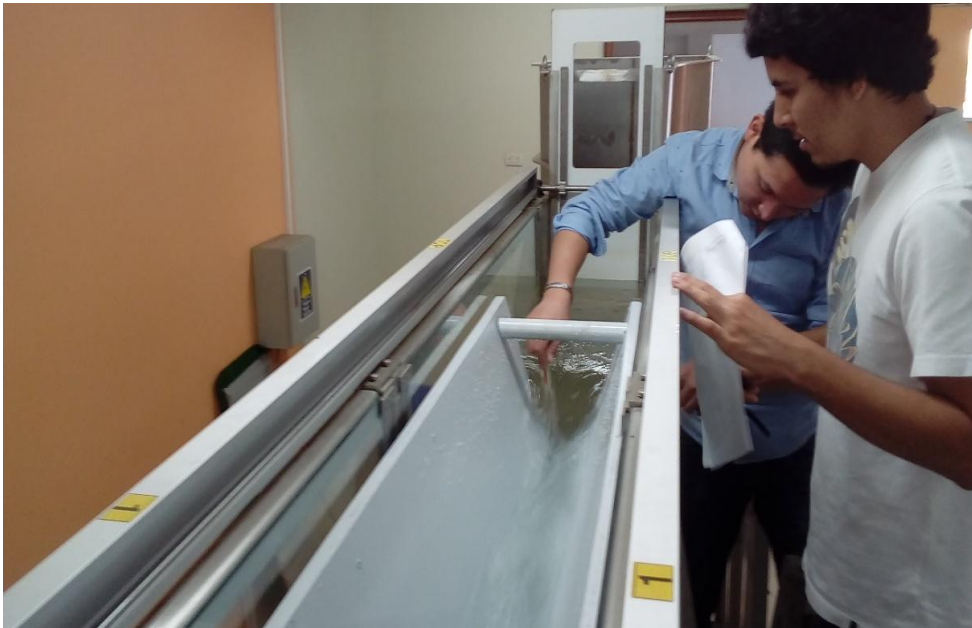
Vh	Vh2	A	Vh2A
1.06	1.1236	0.00900	0.0101124
0.95	0.9025	0.0045	0.00406125
0.76	0.5776	0.001	0.0005776

Vm= 0.92 Σ 0.01475125

$\beta = 1.17$



Fotografía N° 07 : Vista de Canal triangular de 2 metros de longitud, en el interior del canal rectangular de pendiente variable.



Fotografía N° 08 : Vista de Tesistas tomando los datos para determinar los coeficientes de Coriolis y de Boussinesq en el Canal triangular de 2 metros de longitud, en el interior del canal rectangular.

PRÁCTICA DE LABORATORIO COEFICIENTES DE ENERGÍA (CORIOLIS) Y MOMENTUM (BOUSSINESQ) EN CANAL DE PENDIENTE VARIABLE

Objetivo:

Que el alumno además de ser capaz de proponer los valores de los coeficientes de distribución de velocidad α y β , en función a lo sugerido por diferentes investigadores, los calcule para el canal de pendiente variable de la Universidad Privada Antenor Orrego a partir de la toma de datos y las respectivas ecuaciones existentes.

Introducción:

Debido a la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal, la carga de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor calculado a partir de la expresión $V^2/2g$, por lo que es conveniente afectarla por un coeficiente α conocido como coeficiente de energía.

En flujo en canales abiertos, la distribución no uniforme de velocidades también afecta el cálculo del momentum, de ahí la importancia de familiarizarse con los coeficientes y con las ecuaciones para calcularlos.

Coeficiente de energía o coeficiente de Coriolis (α) : Cuando se utiliza el principio de energía en cálculos, la carga de velocidad real puede expresarse como $\alpha (V^2/2g)$, siendo α coeficiente de energía o coeficiente de coriolis, en honor a G. Coriolis. El valor de α para canales prismáticos relativamente rectos, varía desde 1.03 hasta 1.36, donde el valor alto se asocia con canales pequeños y el valor bajo con corrientes grandes y de profundidad considerable.

Coeficiente de momentum o coeficiente de Boussinesq (β) : A partir del principio de mecánica, el momentum de un fluido que pasa a través de una sección de canal por unidad de tiempo se expresa por $\beta\gamma QV/g$, donde β es conocido como coeficiente de momentum o coeficiente de Boussinesq, en honor a J. Boussinesq quien lo propuso por primera vez; γ es el peso

unitario del agua, V es la velocidad media del agua y Q el caudal. Experimentalmente se ha encontrado que β para canales artificiales aproximadamente rectos, varía desde 1.01 hasta 1.12.

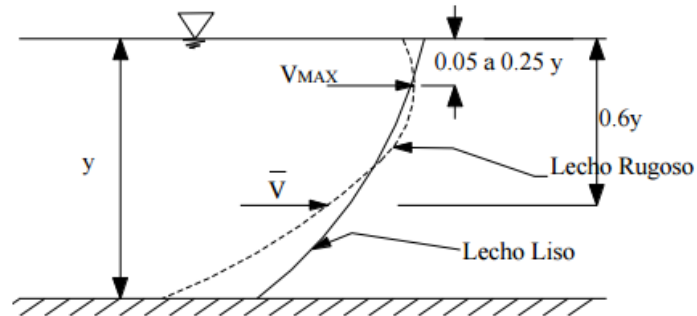


Figura N° 19 : Perfil de distribución de velocidad en un canal abierto

Equipo:

- Canal de Pendiente Variable de 10 mts.
- Correntómetro
- Cinta métrica
- Cronómetro
- Termómetro

Procedimiento:

- 1.-Seleccionar una sección transversal en el modelo donde no existan interferencias por estructuras.
- 2.-Medir la profundidad del flujo.
- 3.-Dividir en dovelas de ancho constantes la sección transversal del canal.
- 4.-Calcular por medio del correntómetro la velocidad en diferentes profundidades.
- 5.-Calcular la velocidad media general de la sección transversal
- 6.-Establecer entre las velocidades calculadas, la velocidad máxima.
- 7.-Suponiendo una distribución logarítmica de velocidades, calcular los coeficientes a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = 1 + 3\varepsilon^2 - 2\varepsilon^3$$

$$\beta = 1 + \varepsilon^2$$

Donde:

$$\varepsilon = \frac{V_{\max}}{V} - 1$$

Siendo:

V_{\max} = Velocidad máxima

V = Velocidad media

- 8.-** Comparar los valores calculados a partir de las ecuaciones anteriores con los valores propuestos por diferentes investigadores, para las mismas condiciones de revestimiento o material del canal del canal de pendiente variable.