

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

**Obtención de relaciones de diseño de canales con rugosidad artificial
(rugosidad tipo B) en laboratorio**


Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Civil

Autor:

Orly Alberto Pereira Navas

Director:

Verónica Margarita Carrillo Serrano

ORCID:  0000-0003-3420-0855

Cuenca, Ecuador

2023-06-09

Resumen

Las altas velocidades producidas en canales de alta pendiente generan una tensión tractiva que desgasta el revestimiento de los canales, afectando las condiciones de flujo. Una de las soluciones implementadas para la reducción de velocidad establece la colocación de bloques con una configuración establecida aumentando la resistencia al flujo. En el presente, se determinaron las condiciones de flujo en un canal con rugosidad artificial tipo B mediante la ejecución de ensayos de laboratorio. En 1935, el profesor I. A. Pikalov postuló una ecuación que determina el valor del coeficiente de Chézy en función del calado del flujo, la base del canal y altura de la rugosidad, sin embargo, dicha ecuación carece de precisión cuando se comparan con resultados reales. Para realizar los ensayos, se usó el canal del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, y se estudió la condición de flujo usando la configuración de la rugosidad tipo B. Se tomaron las medidas de calado y velocidad superficial para 5 caudales en 5 pendientes; luego en base a la teoría se encontró el valor del coeficiente de Chézy. Finalmente, se obtuvo una ecuación empírica de C hallada mediante una regresión lineal múltiple en función del calado, altura de la rugosidad, base del canal y también la pendiente. Se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.54, por lo que se considera que la ecuación predictiva de C es buena.

Palabras clave: rugosidad artificial tipo b, coeficiente de chézy, dissipador de energía, laboratorio de hidráulica

Abstract

The high velocities produced in high slope channels generate a tractive stress that wears the lining of the channels, affecting the flow conditions. One of the solutions implemented for velocity reduction provides for the placement of blocks with a set configuration increasing the flow resistance. In the present work, the flow conditions in a channel with artificial roughness type B were determined by performing laboratory tests. In 1935, Professor I. A. Pikalov postulated an equation that determines the value of the Chézy coefficient as a function of flow draft, channel base and roughness height, however, this equation lacks accuracy when compared to actual results. To carry out the tests, the channel of the Hydraulics Laboratory of the Faculty of Engineering of the University of Cuenca was used, and the flow condition was studied using the type B roughness configuration. The measurements of draft and surface velocity were taken for 5 flows in 5 slopes; then based on the theory, the value of the Chézy coefficient was found. Finally, an empirical equation of C found by multiple linear regression as a function of draft, roughness height, channel base and also slope was obtained. A coefficient of determination of 0.54 was obtained, so the predictive equation of C is considered to be good.

Keywords: artificial roughness type b, chézy coefficient, energy dissipator, laboratory of hydraulic

Índice de contenido

Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	8
1 Introducción	10
2 Objetivos.....	11
2.1 Objetivo general.....	11
2.2 Objetivos específicos	11
3 Marco teórico	12
3.1 Canales abiertos.....	12
3.2 Elementos geométricos de una sección de canal	12
3.2.1 Profundidad de flujo de la sección o calado del agua <i>y</i>	12
3.2.2 Área mojada <i>Am</i>	12
3.2.3 Perímetro mojado <i>Pm</i>	12
3.2.4 Radio hidráulico <i>RH</i>	13
3.3 Distribución de velocidades	13
3.4 Tipos de flujo	14
3.5 Flujo uniforme permanente	15
3.6 Velocidad en el flujo uniforme.....	15
3.6.1 Ecuación de Chézy.....	16
3.6.2 Factor de resistencia de Chézy.....	17
3.7 Rugosidad artificial.....	21
3.7.1 Concepto de rugosidad artificial.....	21
3.7.2 Método de Pikalov (1935)	24
4 Materiales	29
4.1 Configuración Experimental	29
4.1.1 Canal de experimentación	29
4.1.2 Limnómetro.....	30
4.1.3 Medidor de la velocidad del flujo.....	30
4.1.4 Diseño de los elementos de la rugosidad artificial tipo B.....	31

4.2	Número de Manning del canal en la experimentación	34
5	Metodología	34
5.1	Procesamiento de datos	35
5.1.1	Regresión lineal múltiple	35
5.1.2	Comparación de velocidades con rugosidad y sin rugosidad	35
5.2	Proceso de validación de datos	35
6	Resultados y discusión	36
6.1	Evaluación del flujo sin rugosidad artificial	50
6.2	Resultados del coeficiente de Chézy por el método de Pikalov.....	51
6.2.1	Resultados gráficos del método de Pikalov.....	52
6.3	Comparación de velocidades	57
6.4	Comparación del método de Pikalov y validación	58
7	Conclusiones y recomendaciones.....	59
7.1	Conclusiones	59
8	Referencias.....	64
9	Anexos.....	66
9.1	Anexo A – Cálculos de los valores de la matriz de la Ecuación 5.8 para la regresión lineal múltiple con las variables explicativas: h/k , b/h y S	66
9.2	Anexo B – Ondulaciones generadas en la pendiente del 0.5%.	66

Índice de figuras

Figura 1. Elementos geométricos de la sección de un canal rectangular.	13
Figura 2. Distribución de velocidades en un canal rectangular.	13
Figura 3. a) Flujo permanente y b) Flujo no permanente.	14
Figura 4. a) Flujo uniforme y b) Flujo no uniforme.	14
Figura 5. Deducción de la ecuación de Chézy para flujo uniforme en un canal abierto.	17
Figura 6. Naturaleza de la rugosidad superficial: a) lisa; b) ondulada; c) rugosa.	22
Figura 7. Vista en perfil del flujo con rugosidad artificial.	23
Figura 8. Rugosidad tipo A.	24
Figura 9. Rugosidad tipo B.	25
Figura 10. Rugosidad tipo C.	26
Figura 11. Rugosidad tipo D.	26
Figura 12. Rugosidad tipo E.	27
Figura 13. Canal del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.	29
Figura 14. Limnímetros usados para tomar las medidas de altura dentro del canal de experimentación.	30
Figura 15. Dispositivo para medir la velocidad.	31
Figura 16. Diseño de los elementos de rugosidad tipo B para el ancho del canal de experimentación (en cm).	32
Figura 17. Fondo del canal utilizado para la experimentación.	32
Figura 18. Fondo con rugosidad artificial colocado en el canal experimental.	33
Figura 20. Fondo del canal con los apoyos para aumentar la pendiente en el experimento.	33
Figura 21. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 0.5%.	39
Figura 22. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 1.5%.	41
Figura 23. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 2.5%.	44
Figura 24. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 5%.	46
Figura 25. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 7.5%.	49
Figura 26. Calados medidos de manera transversal a la dirección del flujo uniforme sobre la rugosidad artificial para la pendiente de 2.5% y caudal de 13.74 l/s.	49
Figura 27. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 0.5%.	52
Figura 28. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 1.5%.	53
Figura 29. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 2.5%.	54

Figura 30. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 5%. 55

Figura 31. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 7.5%. 56

Figura 34. Ondulaciones que se generaban cuando se tenía un $S=0.5\%$ y $Q=8.95\text{l/s}$ 66

Índice de tablas

Tabla 1. Valores guía para el diseño de canales con rugosidad artificial.....	27
Tabla 2. Relación Aire/Área en función de la pendiente del canal.	28
Tabla 4 Cálculo del número de Manning realizada en el canal con fondo de acrílico y paredes de vidrio.	34
Tabla 5. Error entre el caudal obtenido por el vertedero y el caudal calculado de valores empíricos para diferentes caudales y pendientes.....	36
Tabla 6. Cálculo de la velocidad, del coeficiente de Chézy y factor de Darcy del flujo sin rugosidad artificial.	50
Tabla 7. Comparación del coeficiente de Chézy obtenido por diferentes formas.....	51
Tabla 8. Comparación de velocidades entre la velocidad del flujo sin rugosidad artificial y la velocidad hallada con la Ecuación 6.1 de la regresión múltiple.	57
Tabla 9. Tabla comparativa entre el factor de resistencia de Chézy teórico y el obtenido por la Ecuación 6.1.	58
Tabla 11. Cálculos para encontrar los elementos de la matriz de la Ecuación 5.8.	66

Agradecimientos

Agradezco a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, en especial a mi directora de tesis, la ingeniera Verónica Carrillo por su paciencia, apoyo y compromiso en este trabajo de titulación.

Agradezco a mis revisores: el ingeniero Esteban Pacheco y el ingeniero Esteban Sánchez, por el tiempo que se tomaron para revisar y resolver cualquier duda que se presentase a lo largo de la realización de este trabajo.

1 Introducción

El desarrollo del presente trabajo de titulación nace de la necesidad de verificar la eficacia de una de las soluciones implementadas para la reducción de velocidad que se produce en canales con grandes pendientes dentro de ciertos proyectos hidráulicos, con el fin de evitar o reducir los efectos negativos de las altas velocidades en canales abiertos, por ejemplo, las altas velocidades producidas en canales de alta pendiente generan tensión tractiva que desgasta el revestimiento de los canales alterando las condiciones de flujo y reduciendo su vida útil. Dichas soluciones, conocidas como rugosidad artificial, establecen la colocación de bloques, con una configuración establecida en el fondo del canal, con el objetivo de aumentar la rugosidad (resistencia al flujo). Estas estructuras han sido utilizadas para la reducción de velocidad en canales de alta pendiente, sin embargo, en desarrollos recientes se ha identificado que la teoría empírica en la cual se fundamenta los parámetros de diseño de estas estructuras requiere una revisión que considere los avances en la tecnología que permiten una estimación más precisa de los parámetros de flujo en estructuras hidráulicas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar las condiciones de flujo en un canal con rugosidad artificial Tipo B mediante la ejecución de ensayos de laboratorio.

2.2 Objetivos específicos

- Establecer el diseño teórico para un canal con rugosidad artificial para distintos escenarios.
- Ejecutar los ensayos en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, para el análisis de las condiciones de flujo en distintos escenarios considerados para el análisis teórico.
- Comparar los niveles de eficiencia en el desempeño de la rugosidad artificial tipo B en la reducción de velocidad para los distintos escenarios propuestos de los modelos teóricos y escenarios en laboratorio.

3 Marco teórico

3.1 Canales abiertos

El flujo de agua puede ser flujo en canales abiertos o flujo a presión. La principal característica en el flujo en canales abiertos es que posee una superficie libre, la cual está sometida a la presión atmosférica (Chow, 1994). Para el flujo en canales abiertos a través de la relación de la continuidad, el caudal se puede expresar con la Ecuación 3.1.

$$Q = V \cdot A \quad (3.1)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s) o (l/s)

V = Velocidad media del flujo (m/s)

A = Área transversal al flujo (m^2)

3.2 Elementos geométricos de una sección de canal

Los elementos geométricos de un canal son propiedades que se pueden definir en función de la geometría del canal y la profundidad de flujo (Chow, 1994) (Figura 1).

3.2.1 Profundidad de flujo de la sección o calado del agua y

La profundidad de flujo de la sección es la distancia vertical perpendicular al flujo del agua, desde el fondo de la sección de un canal hasta la superficie libre (Figura 1). Para un canal con pendiente θ , la profundidad de flujo (distancia vertical) es la profundidad de flujo de la sección dividida para el coseno de θ (Chow, 1994).

3.2.2 Área mojada A_m

El área mojada es el área de la sección transversal del flujo y es perpendicular a la dirección del flujo de un canal (Chow, 1994) (Figura 1).

3.2.3 Perímetro mojado P_m

El perímetro mojado es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano de una sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo del agua de un canal (Chow, 1994) (Figura 1).

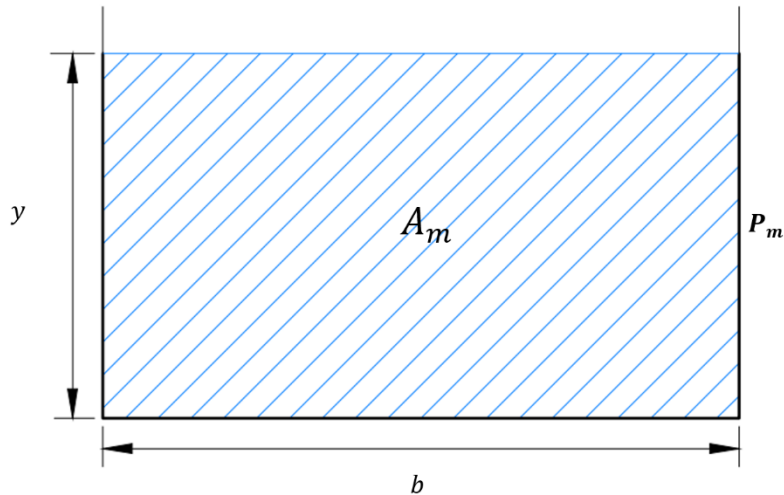


Figura 1. Elementos geométricos de la sección de un canal rectangular.

3.2.4 Radio hidráulico R_H

El radio hidráulico es un parámetro importante en el dimensionamiento de obras hidráulicas. Es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado, se muestra en la Ecuación 3.2 (Chow, 1994).

$$R_H = \frac{A_m}{P_m} \tag{3.2}$$

3.3 Distribución de velocidades

A causa de la fricción a lo largo de las paredes de un canal, las velocidades longitudinales no están uniformemente distribuidas en la sección transversal del canal. Según Chow (1994), la máxima velocidad en un canal ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de entre 0.05 a 0.25 de la profundidad (Figura 2). La distribución de las velocidades de una sección depende de factores como la forma de la sección, rugosidad del canal y la presencia de curvas en la alineación longitudinal del canal (Chow, 1994).

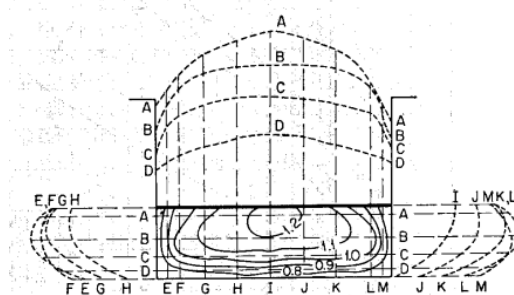


Figura 2. Distribución de velocidades en un canal rectangular.

Fuente: Ven Te Chow, 1994

3.4 Tipos de flujo

El flujo en canales abiertos se clasifica en función del tiempo y del espacio.

Cuando el tiempo es el criterio de clasificación, el flujo se clasifica en flujo permanente y no permanente (Figura 3). Se dice que el flujo es permanente cuando la profundidad de flujo y velocidad en una sección de un canal no cambia durante un intervalo considerable de tiempo (Figura 3-a), mientras que el flujo en un canal es no permanente cuando la profundidad o velocidad en una sección del canal no es constante (Figura 3-b) (Chow, 1994).

Cuando el espacio es el criterio de análisis, el flujo se clasifica en flujo uniforme y no uniforme (Figura 4). Se dice que el flujo es uniforme cuando la profundidad de flujo y velocidad es constante en diferentes secciones a lo largo de la longitud del canal (Figura 4-a), mientras que el flujo es no uniforme cuando la profundidad y velocidad en diferentes secciones del canal no es constante (Figura 4-b) (Chow, 1994).

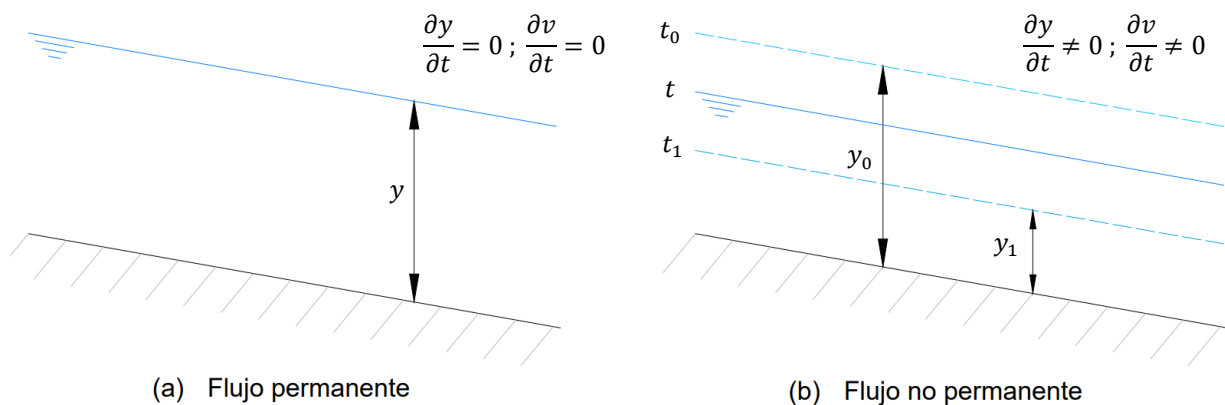


Figura 3. a) Flujo permanente y b) Flujo no permanente.

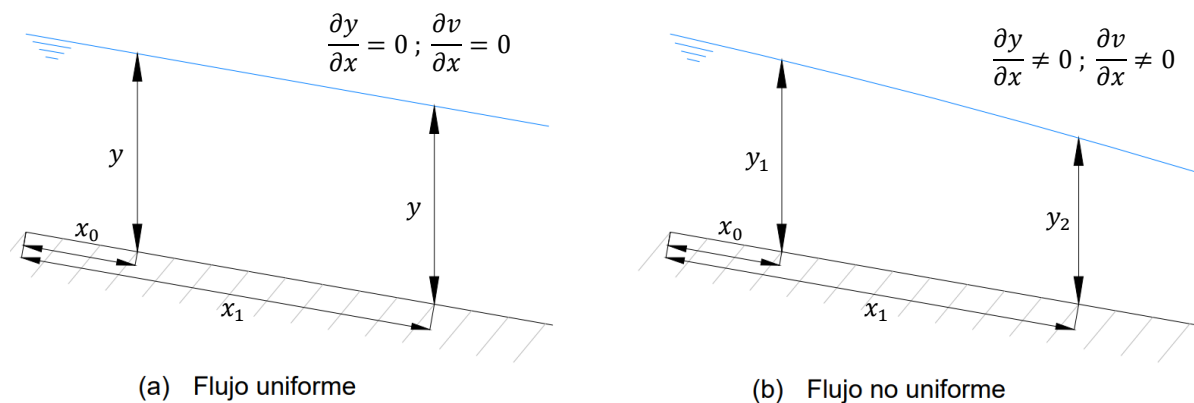


Figura 4. a) Flujo uniforme y b) Flujo no uniforme.

3.5 Flujo uniforme permanente

El flujo uniforme permanente es el flujo fundamental que se considera para hidráulica en canales abiertos. A pesar de que en canales naturales y en algunos casos de canales artificiales el flujo es muy irregular y se aleja de las condiciones de flujo uniforme y permanente, el análisis de las condiciones de flujo uniforme permanente permite tener un marco de referencia para analizar condiciones de flujo más complejas (Chow, 1994).

Las características del flujo uniforme permanente son las siguientes:

- a) La profundidad, área mojada y caudal son constantes en todas las secciones del canal.
- b) La línea de energía, la línea de la superficie del agua y la del fondo del canal son paralelas en todo el canal.

3.6 Velocidad en el flujo uniforme

Algunos análisis experimentales se han desarrollado para la determinación de relaciones empíricas que permitan caracterizar las condiciones de flujo en canales abiertos con flujo uniforme. Relaciones que planteadas en términos de ecuaciones para la estimación de pérdidas de energía (pendiente de la línea de energía) y considerando que para el flujo uniforme la línea de energía es paralela al fondo del canal, se utilizan como ecuaciones de flujo uniforme generalmente para estimar la velocidad media de flujo. En términos generales se ha establecido una relación general que incluye los principales parámetros que caracterizan el flujo en canales abiertos (Chow, 1994). La ecuación 3.3 representa la fórmula general que está en función de la geometría del canal y condiciones de flujo (a través del radio hidráulico), las pérdidas de energía (a través de S) y las condiciones de rugosidad del canal (a través de C).

$$V = C \cdot R_H^x \cdot S^y \quad (3.3)$$

Donde:

V = Velocidad media del flujo de un canal (m/s).

C = Factor de resistencia al flujo, es un factor adimensional que dependen de factores como el radio hidráulico, rugosidad, etc.

R_h = Radio hidráulico (m).

S = Pendiente de energía, al ser flujo uniforme, también es la pendiente del fondo del canal y de la superficie del flujo (m/m).

x y y = Exponentes que dependen del autor de la ecuación.

Varios desarrollos empíricos se han realizado para determinar la configuración final de la relación representada por la ecuación 3.3. Entre las principales relaciones se tienen la ecuación de Manning, la ecuación de Chézy, y la ecuación de Darcy Weisbach.

3.6.1 Ecuación de Chézy

La primera ecuación desarrollada para flujo uniforme fue dada por el ingeniero francés Antoine de Chézy en 1769. La ecuación se desarrolla matemáticamente partiendo de dos suposiciones (Chow, 1994):

- a) La primera suposición fue hecha por Chézy e indica que, la fuerza que resiste el flujo por unidad de área del lecho de la corriente es proporcional al cuadrado de la velocidad. La suposición se muestra en la Ecuación 3.4.

$$\frac{F_{resistencia}}{A_{fondo}} = K \cdot v^2 \quad (3.4)$$

Donde:

$F_{resistencia}$ = Fuerza de resistencia

A_{fondo} = Área del fondo del canal (m²)

K = Constante de proporcionalidad

v^2 = Velocidad del flujo (m/s)

- b) El principio básico de flujo uniforme dado por Brahms (Chow, 1994), que indica que la resistencia de flujo debe estar en equilibrio con la fuerza de gravedad.

Para desarrollar la deducción de la ecuación de Chézy, se parte de un tramo de canal con flujo uniforme mostrado en la Figura 5.

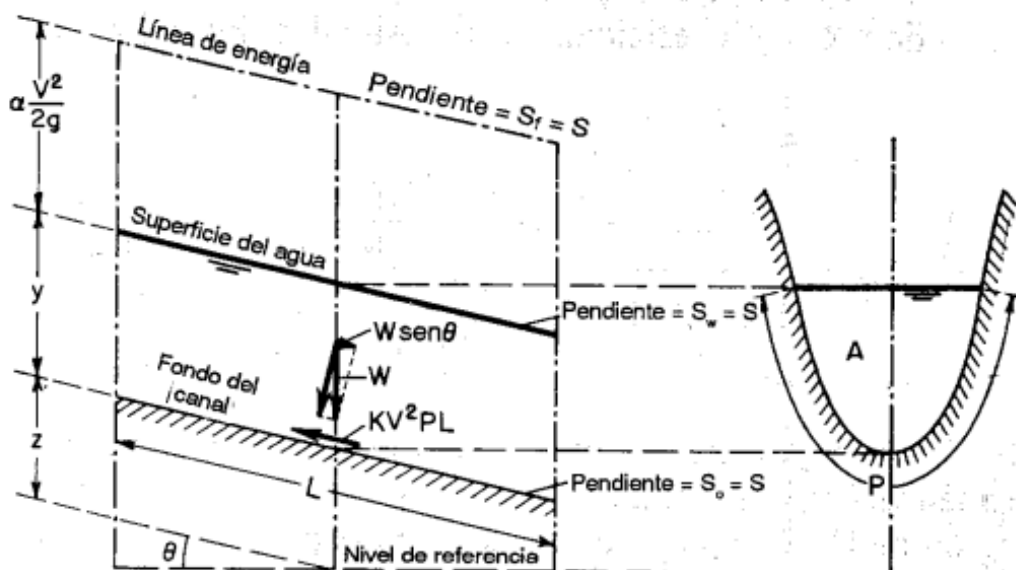


Figura 5. Deducción de la ecuación de Chézy para flujo uniforme en un canal abierto.

Fuente: Ven Te Chow, 1994

Partiendo de la Ecuación 3.3 y aplicándole las hipótesis planteadas, se obtiene la **ecuación de Chézy** (Ecuación 3.5).

$$v = C \cdot \sqrt{R_H \cdot S} \tag{3.5}$$

Donde:

v = Velocidad del flujo (m/s)

C = Factor de resistencia de Chézy o número de Chézy

R_H = Radio hidráulico (m)

S = Pendiente del canal (m/m)

3.6.2 Factor de resistencia de Chézy

El factor C de la Ecuación 3.5, también conocido como factor de resistencia de Chézy, es un factor que, para determinar su magnitud se han realizado un gran número de intentos (Chow, 1994). El factor de resistencia de Chézy está en función de la velocidad del canal, las formas geométricas del canal, el peso específico y viscosidad del flujo (Robinson y Albertson, 1952).

a) Ecuación de Ganguillet y Kutter

Entre las ecuaciones más usadas está la ecuación de G. K. (Ecuación 3.6) publicada en 1869 por los ingenieros Ganguillet y Kutter. La ecuación de G. K. es una ecuación que se dedujo

de manera empírica mediante mediciones de flujo en canales de varios tipos y con la cual se obtienen resultados satisfactorios (Chow, 1994).

$$C_{G.K.} = \frac{41.65 + \frac{0.00281}{S} + \frac{1.811}{n}}{1 + \left(41.65 + \frac{0.00281}{S}\right) \cdot \frac{n}{\sqrt{R_H}}} \quad (3.6)$$

Donde:

$C_{G.K.}$ = Factor de resistencia de Chézy según Ganguillet y Kutter

S = Pendiente del canal (ft/ft)

R_H = Radio hidráulico (ft)

n = Coeficiente de rugosidad de Kutter.

b) Ecuación de Bazin

Otra de las ecuaciones más usadas es la ecuación de Bazin, propuesta en 1897 por el ingeniero H. Bazin. La ecuación de Bazin fue desarrollada con datos obtenidos en pequeños canales experimentales, y por lo común, es menos satisfactoria que la ecuación G. K. (Chow, 1994); está en función del radio hidráulico, pero no de la pendiente del canal (Ecuación 3.7).

$$C_{Bazin} = \frac{157.6}{1 + \frac{m}{\sqrt{R_H}}} \quad (3.7)$$

Donde:

C_{Bazin} = Factor de resistencia de Chézy según Bazin

R_H = Radio hidráulico (ft)

m = Coeficiente de rugosidad de Bazin.

c) Ecuación de Powell

Una tercera ecuación es la ecuación de Powell (Ecuación 3.8) publicada en 1950, siendo una ecuación logarítmica en función del radio hidráulico, el número de Reynolds y la rugosidad del canal ϵ , donde el valor de Chézy está implícito y se encuentra mediante iteraciones (Chow, 1994).

$$C_{Powell} = -42 \cdot \log \left(\frac{C_{powell}}{4 \cdot R_e} + \frac{\epsilon}{R_h} \right) \quad (3.8)$$

Donde:

C_{Powell} = Factor de resistencia de Chézy según Powell

ϵ = Medida de rugosidad del canal (ft)

R_e = Número de Reynolds

R_H = Radio hidráulico (ft)

d) Ecuación de Keulegan

En 1938, el ingeniero Keulegan aplicó los principios de flujo en tuberías circulares para flujo turbulento en canales abiertos. La fórmula se desarrolló asumiendo que la resistencia de flujo en un canal rugoso es la misma que en el flujo de una tubería con rugosidad, con el mismo radio hidráulico y grado de rugosidad (Robinson y Albertson, 1952). Ver Ecuación 3.9.

$$C_{Keulegan} = 6.25 + 5.75 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_H}{k} \right) \quad (3.9)$$

Donde:

$C_{Keulegan}$ = Factor de resistencia de Chézy según Keulegan

R_H = Radio hidráulico (ft)

k = Coeficiente de rugosidad de Keulegan

e) Factor de Chézy a partir de la ecuación de Manning

Una ecuación muy usada en hidráulica de canales abiertos es la ecuación de Manning, propuesta por el ingeniero Robert Manning (Chow, 1994). Fue desarrollada en base a los datos experimentales de Bazin y verificada un gran número de veces. La ecuación de Manning se muestra en la Ecuación 3.10.

$$v = \frac{R_H^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (3.10)$$

Donde:

v = Velocidad (ft/s)

R_H = Radio hidráulico (ft)

S = Pendiente del canal (ft/ft)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

A través de la igualdad entre la velocidad obtenida con la ecuación de Chézy y la ecuación de Manning se obtiene que:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R_H^{1/6} \quad (3.11)$$

La Ecuación 3.11 muestra una relación importante entre el factor C de Chézy y la rugosidad n de Manning, a veces esta relación hace que se considere la ecuación de Manning una variación de la ecuación de Chézy (Chow, 1994).

f) Factor de Chézy a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach

En 1857 se postula una ecuación desarrollada por Henry Darcy y refinada por Julius Weisbach (Flechas, 2010). La ecuación de Darcy-Weisbach fue desarrollada principalmente para calcular las pérdidas por fricción en el flujo en tuberías y se muestra en la Ecuación 3.12 (Chow, 1994).

$$h_f = f \cdot \frac{L}{d_0} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3.12)$$

Donde:

h_f = Pérdida por fricción en la tubería (ft)

f = Factor de fricción de Darcy-Weisbach

L = Longitud de la tubería (ft)

d_0 = Diámetro de la tubería (ft)

V = Velocidad del flujo (ft/s)

g = aceleración debida a la gravedad (ft/s²)

Considerando que $S = h_f/L$, simplificando y reordenando, se obtiene la relación entre el número de Chézy C y el coeficiente de Darcy-Weisbach f (Ecuación 3.13).

$$f = \frac{8 \cdot g}{C^2} \quad (3.13)$$

La Ecuación 3.13 también se pueden aplicar a los flujos uniformes y casi uniformes en canales abiertos (Chow, 1994).

3.7 Rugosidad artificial

Las altas velocidades que se generan en el flujo de canales con gran pendiente vienen acompañadas de turbulencias en régimen supercrítico o rápido. Estas velocidades altas provocan que el revestimiento del canal se deteriore y sean necesarias obras de disipación que requieren un gasto económico considerable (Krochin, 1986). Se ha establecido, que las velocidades para el diseño de canales abiertos, generalmente se consideran entre 0.6 y 2 m/s, y que, en canales con gran pendiente, la velocidad no sea superior a 6 m/s (Chow, 1994).

Para situaciones donde la velocidad sea un problema para la construcción de obras hidráulicas se hace uso de la rugosidad artificial. La rugosidad artificial produce resistencia al flujo, con lo que disminuye la velocidad y energía (Chow, 1994). Estos elementos de rugosidad se pueden colocar tanto en el fondo como en las paredes del canal, sin embargo, se colocan solo en el fondo puesto que en las paredes la mayoría de las veces produce un flujo demasiado inestable. (Krochin, 1986)

3.7.1 Concepto de rugosidad artificial

Cuando se amplifica el perfil de la superficie de un canal se observa que la superficie tiene elementos de rugosidad que forman irregularidades (Ver Figura 6), las cuales tienen una altura efectiva que se conoce como la altura de rugosidad k . Si la altura de la rugosidad es menor que una fracción del espesor de la subcapa laminar, las irregularidades serán tan pequeñas que el flujo en la subcapa laminar cubrirá completamente a los elementos de rugosidad, haciendo que la superficie del canal sea *hidráulicamente lisa* (Figura 6-a). Si la superficie promedio del canal sigue una curva (Figura 6-b), se dice que la superficie es *hidráulicamente ondulada*. Según Schlichting (Chow, 1994), propone una condición para que la superficie del canal sea considerada como hidráulicamente lisa (Ecuación 3.14).

$$k < \frac{5 \cdot \nu}{V_f} \quad (3.14)$$

Donde:

$$V_f = \sqrt{g \cdot R_H \cdot S}$$

k = Altura del elemento de rugosidad (ft)

ν = Viscosidad cinemática del agua (en condiciones normales es de $1\text{e-}5$ ft²/s)

V_f = Velocidad de fricción (ft/s)

R_H = Radio hidráulico (ft)

S = Pendiente del canal (ft/ft)

A partir de la ecuación de Chézy (Ecuación 3.5) y con la condición dada por Schlichting, se demuestra que para que una superficie de un canal sea considerada como hidráulicamente lisa, la altura de los elementos de rugosidad debe ser menor que la rugosidad crítica (Ecuación 3.15) (Chow, 1994).

$$k_c = \frac{5 \cdot C \cdot v}{\sqrt{g \cdot V}} \quad (3.15)$$

Donde:

k_c = Altura crítica del elemento de rugosidad (ft)

C = Coeficiente de resistencia de Chézy, Schlichting recomienda que para una aproximación el valor sea de 113.5 (Chow, 1994).

V = Velocidad media del flujo (ft/s)

La superficie del canal se considera *hidráulicamente rugosa* si la altura de los elementos de rugosidad k es mayor que la altura crítica k_c puesto que el efecto de la rugosidad superará la subcapa laminar y se logrará perturbar el flujo en el canal (Figura 6-c) (Chow, 1994).

En la Figura 6 se puede identificar el límite nominal de la capa límite turbulenta (δ), el espesor de la subcapa laminar (δ_o), la altura de rugosidad (k) y la altura de rugosidad crítica (k_c).

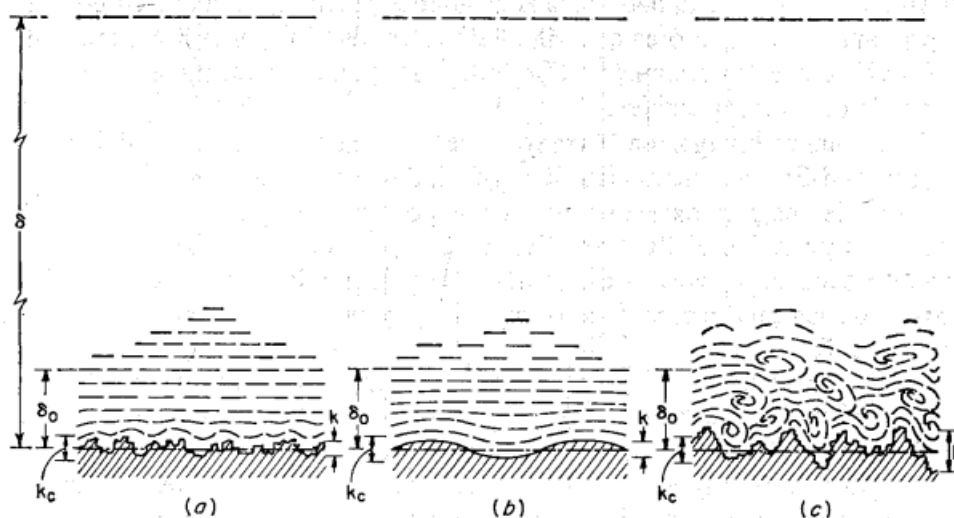


Figura 6. Naturaleza de la rugosidad superficial: a) lisa; b) ondulada; c) rugosa.

Fuente: Ven Te Chow, 1994

Como alternativa para el incremento de la rugosidad en canales abiertos, en 1935 el profesor F. I. Pikalov realizó una serie de ensayos en modelo físico con distintos tipos estructuras que proporcionaban una mayor resistencia al flujo, que se denominaron rugosidad artificial, varios tipos de configuraciones geométricas fueron colocadas en el fondo del canal (Krochin, 1986). En términos generales su vista en perfil se muestra en la Figura 7.

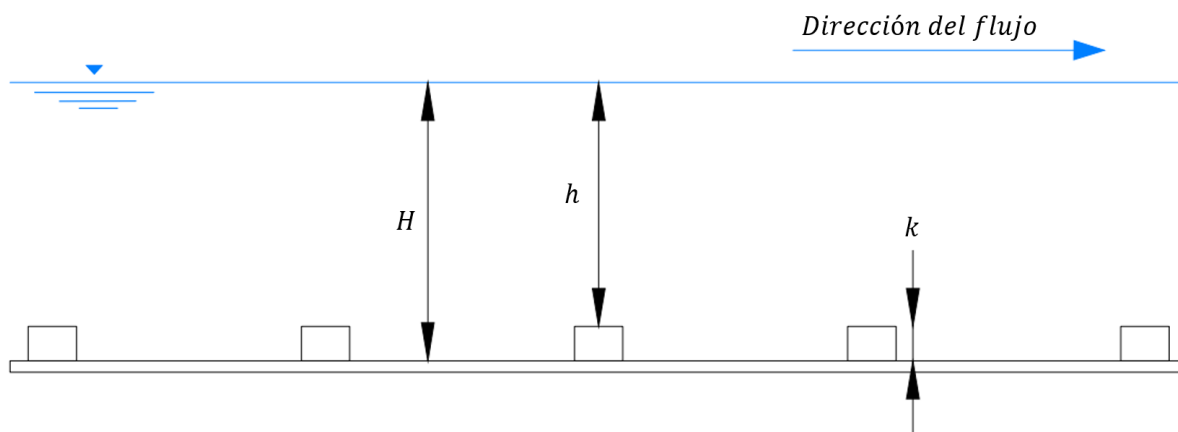


Figura 7. Vista en perfil del flujo con rugosidad artificial.

Adaptado de: Krochin, 1986.

Donde:

H = Altura desde el fondo del canal hasta la superficie del flujo (m)

h = Altura de agua sobre la rugosidad (m)

k = Altura del elemento de rugosidad (m)

La distancia longitudinal, entre los elementos es de suma importancia, puesto que, si existe una separación muy grande, el flujo entre ellas se puede acelerar, y el siguiente elemento se comporta como un deflector produciendo salpicaduras. Si en cambio la distancia entre elementos es muy corta, el líquido entre elementos no participa en el flujo y resta energía al flujo porque se forma remolinos estacionarios, haciendo que el fondo del canal sea prácticamente liso (Krochin, 1986). Chow (1994) recomienda que la separación entre elementos sea de $7k$ a $8k$. Autores como Aivazian (1996) proponen que la separación entre los elementos sea de $7k$, mientras que otros autores como Pikalov (1935), indican una separación de $8k$; sin embargo, en 2022, Illescas y Zhimnay realizaron un análisis de la configuración de la rugosidad artificial propuesta por Pikalov, donde identificaron que no existe una diferencia considerable de resultados entre las separaciones de elementos de $8k$ y $7k$.

La velocidad del flujo que se da sobre la rugosidad artificial se calcula con la ecuación de Chézy (Ecuación 3.5), donde el valor de C se obtiene de fórmulas empíricas y están en función de las relaciones de h/k y b/h donde: h = altura de agua sobre la rugosidad; k = altura de la rugosidad; b = ancho del canal (Ver Figura 7). Los experimentos realizados por Pikalov indican que las fórmulas solo son válidas para valores de $h/k \geq 3$. En caso de no cumplirse la condición de $h/k \geq 3$, el flujo se desestabiliza y se pierde, los elementos entonces empiezan a actuar como deflectores y a producir salpicaduras (Krochin, 1986).

3.7.2 Método de Pikalov (1935)

Según F. I. Pikalov, existen varios tipos de rugosidad que se distinguen por tener diferentes formas geométricas. Pikalov obtuvo una ecuación que determina el valor del coeficiente de rugosidad de Chézy para cada tipo de rugosidad.

a) Doble zigzag o M (tipo A)

La geometría de la rugosidad doble zigzag o tipo A se muestra en la Figura 8 y la ecuación obtenida por Pikalov se muestra en la Ecuación 3.16.

$$\frac{1000}{C} = 116.1 - 6.1 \cdot \frac{h}{k} - 1.2 \cdot \frac{b}{h} \tag{3.16}$$

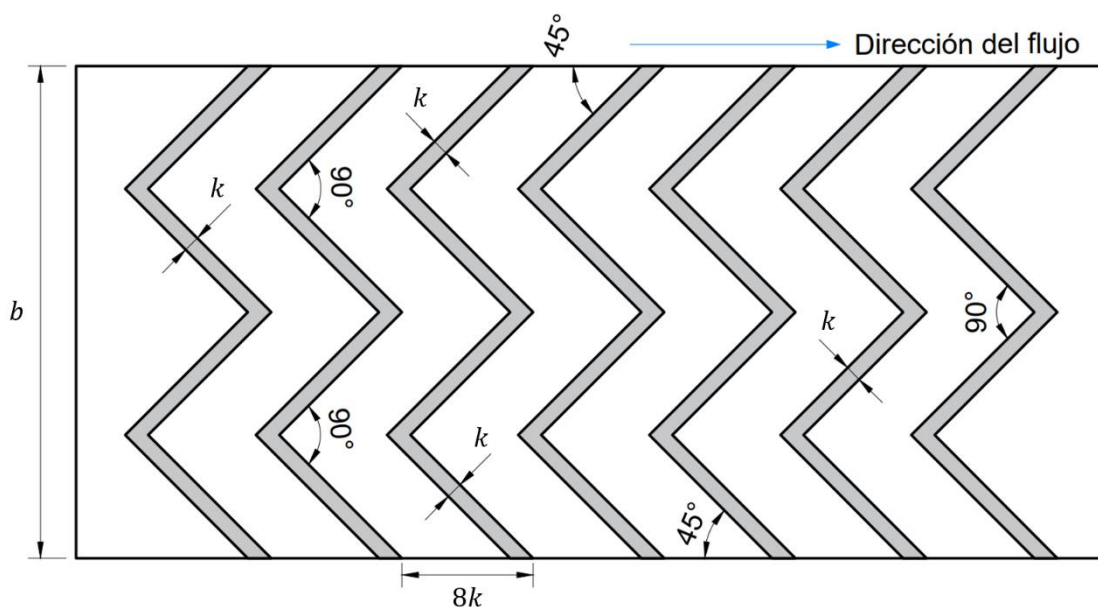


Figura 8. Rugosidad tipo A.

Adaptación de: Mostkov, 1956.

b) V invertida (tipo B)

La geometría de la rugosidad tipo V o tipo B invertida se muestra en la Figura 9 y la ecuación obtenida por Pikalov se muestra en la Ecuación 3.17.

$$\frac{1000}{C} = 85.8 - 3.9 \cdot \frac{h}{k} - 0.8 \cdot \frac{b}{h} \tag{3.17}$$

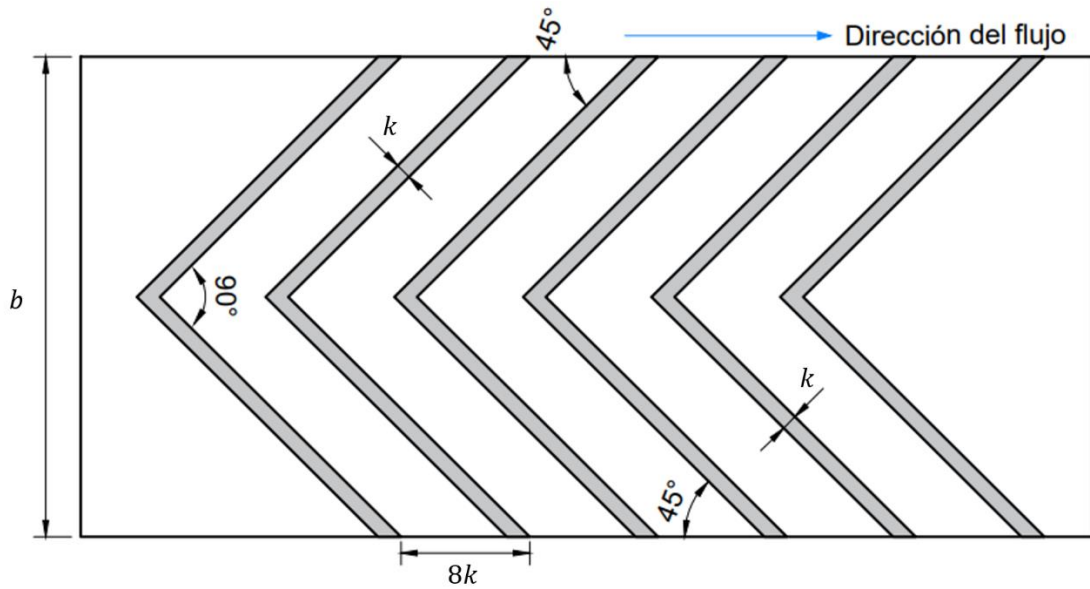


Figura 9. Rugosidad tipo B.

Adaptación de: Mostkov, 1956.

c) Barras cortadas (tipo C):

La geometría de la rugosidad de barras cortadas o tipo C se muestra en la Figura 10 y la ecuación obtenida por Pikalov se muestra en la Ecuación 3.18.

$$\frac{1000}{C} = 54.2 - 2.1 \cdot \frac{h}{k} + 0.33 \cdot \frac{b}{h} \tag{3.18}$$

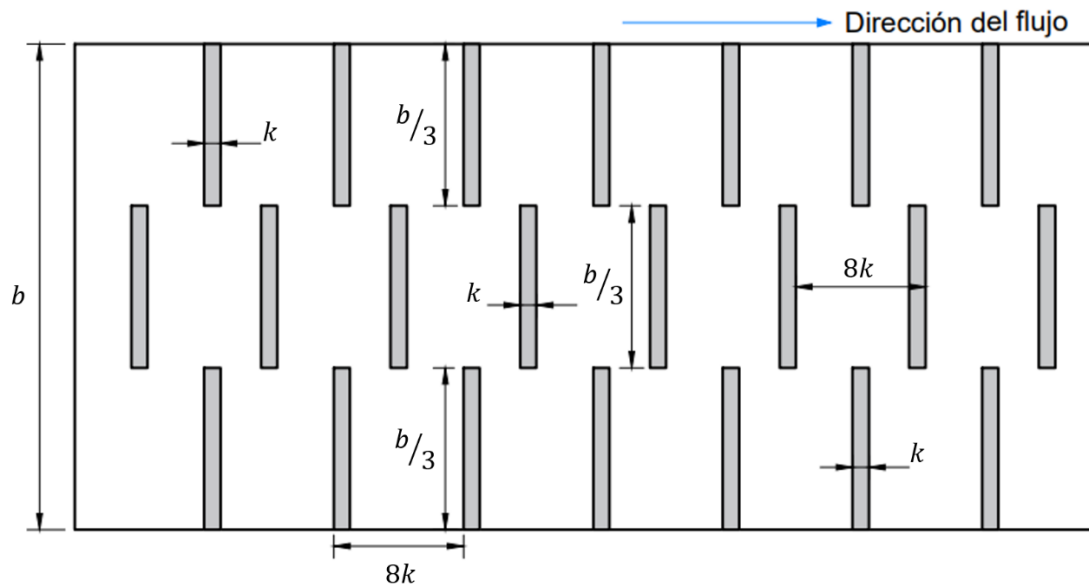


Figura 10. Rugosidad tipo C.

Adaptación de: Mostkov, 1954.

d) Dados (tipo D):

La geometría de la rugosidad en forma de dados o tipo D se muestra en la Figura 11 y la ecuación obtenida por Pikalov se muestra en la Ecuación 3.19.

$$\frac{1000}{C} = 52 - 5.1 \cdot \frac{h}{k} - 0.8 \cdot \frac{b}{h} \tag{3.19}$$

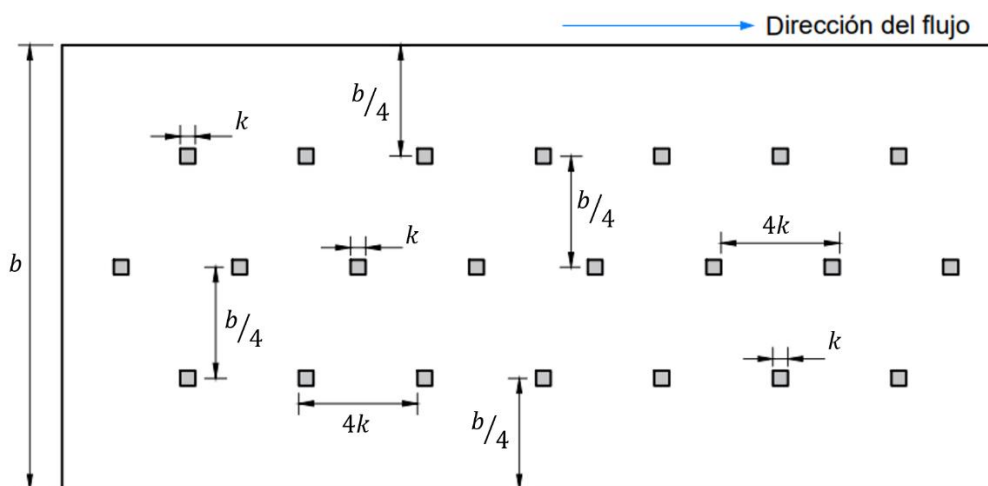


Figura 11. Rugosidad tipo D.

Adaptación de: Mostkov, 1954.

e) Barras continuas (tipo E):

La geometría de la rugosidad en forma de barras continuas o tipo E se muestra en la Figura 12 y la ecuación obtenida por Pikalov se muestra en la Ecuación 3.20.

$$\frac{1000}{C} = 47.5 - 1.2 \cdot \frac{h}{k} - 0.1 \cdot \frac{b}{h} \tag{3.20}$$

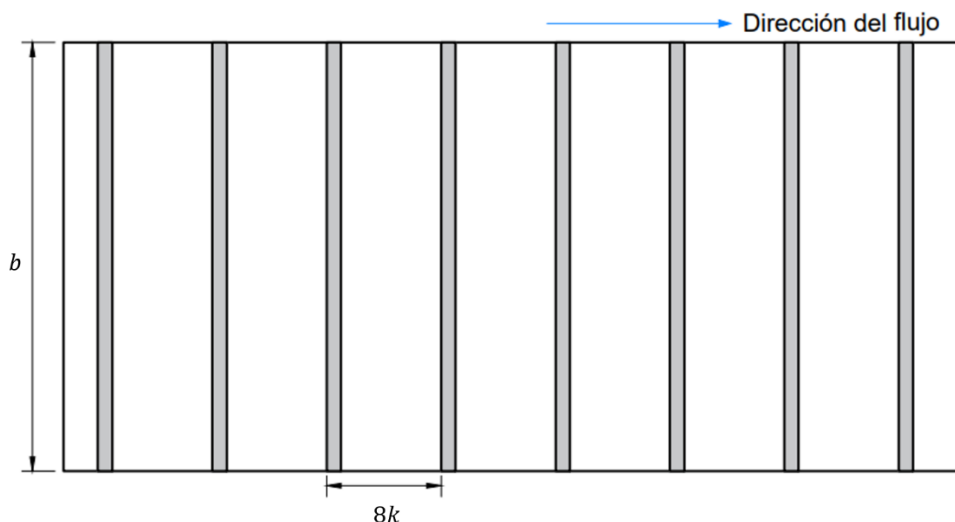


Figura 12. Rugosidad tipo E.

Adaptación de: Mostkov, 1954.

En 1954, Mostkov tabuló los valores del coeficiente de Chézy C obtenidos de las ecuaciones de Pikalov para diferentes proporciones de b/h y h/k (Pacheco y Carrillo). En la Tabla 1 se muestran los valores para el coeficiente C de Chézy adaptados del Manual de Hidráulica de Mostkov (1954) junto con el factor de corrección en función de la pendiente del canal.

Tabla 1. Valores guía para el diseño de canales con rugosidad artificial.

Fuente: Pacheco y Carrillo. Adaptado de: Manual de Hidráulica (Mostkov, 1954)

Tipo		h/k	Valores de C para diferentes proporciones de b/h												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A		5	11.85	12.00	12.20	12.38	12.56	12.76	12.95	13.16	13.37	13.59	13.87	14.04	
		6	12.79	12.97	13.2	13.39	13.61	13.83	14.06	14.31	14.56	14.81	15.08	15.36	
		7	13.85	14.08	14.33	14.58	14.84	15.11	15.38	15.67	15.97	16.29	16.61	16.96	
sen α	Factor de corrección	8	15.13	15.40	15.70	16.00	16.31	16.64	16.98	17.33	17.7	18.08	18.48	18.9	
		9	16.67	17.01	17.36	17.73	18.12	18.52	18.94	19.38	19.84	20.33	20.83	21.37	
	0.04 - 0.06	1.33	10	18.55	18.98	19.42	19.88	20.37	20.88	21.41	21.98	22.57	23.00	23.87	24.57
	0.1	1.25	11	20.92	21.46	22.03	22.62	23.26	23.92	24.63	25.38	26.18	27.03	27.93	28.90
	mayor a 0.15	1.00	12	23.98	24.69	25.45	26.25	27.10	28.01	28.99	30.03	31.15	32.36	33.67	35.09
B		3.5	13.90	14.14	14.31	14.47	14.64	14.81							
		4	14.37	14.58	14.71	14.88	15.06	15.24							
sen α		5	15.22	15.43	15.6	15.80	16.00	16.21							

	Factor de corrección	6	16.16	16.37	16.58	16.81	17.07	17.27						
0.04 - 0.06	1.33	6.5	16.69	16.92	17.12	17.36	17.61	17.86						
0.1	1.11	7	17.24	17.57	17.73	17.99	18.25	18.52						
mayor a 0.15	1.00	8	18.48	18.76	19.05	19.34	19.65	19.96						
C		3	20.70	20.58	20.45	20.33	20.16	20.04	19.92	19.72	19.61	19.53	19.42	19.27
		4	21.65	21.54	21.37	21.23	21.05	20.92	20.79	20.62	20.49	20.37	20.20	20.08
		5	22.68	22.52	22.37	22.22	22.08	21.88	21.74	21.55	21.41	21.28	21.1	20.96
		6	23.91	23.64	23.47	23.31	23.09	22.94	22.73	22.57	22.42	22.27	22.08	21.93
		7	25.25	24.88	24.69	24.51	24.33	24.10	23.92	23.70	23.53	23.36	23.15	22.99
		8	26.46	26.25	26.04	25.84	25.58	25.38	25.19	25.00	24.75	24.57	24.33	24.15
D		2.5	26.04	26.20	27.17	27.78	28.41	29.07	29.76	30.49				
		3	27.86	28.49	29.15	29.85	30.58	31.55	32.15	33.00				
		3.5	30.03	30.77	31.55	32.26	33.22	34.13	35.09	36.10				
		4	32.47	33.33	34.25	35.21	36.23	37.31	38.46	39.68				
		5	38.91	40.16	41.49	42.92	44.44	46.08	47.85	49.75				
E		2.5	22.42	22.37	22.32	22.27	22.27	22.22	22.17	22.12	22.1	22.06	22.02	21.98
sen α	Factor de corrección	3	22.68	22.68	22.62	22.59	22.52	22.52	22.47	22.47	22.37	22.37	22.32	22.30
		4	23.31	23.26	23.26	23.20	23.15	23.13	23.09	23.04	22.99	22.94	22.94	22.90
0.04 - 0.06	1.11	5	23.98	23.92	23.87	23.81	23.81	23.75	23.71	23.64	23.64	23.59	23.53	23.47
0.1	0.90	6	24.63	24.63	24.57	24.51	24.45	24.45	24.38	24.38	24.32	24.27	24.21	24.15
mayor a 0.15	1.11	7	25.38	25.32	25.25	25.25	25.19	25.13	25.06	25.03	25.00	24.97	24.88	24.85

Se ha observado que el coeficiente C no depende solo de la rugosidad, sino que también del calado, por lo que un solo tipo de rugosidad, puede dar distintos valores del coeficiente C, dependiendo del caudal y de la pendiente que el canal tenga (Krochin, 1986).

El tipo de flujo que se obtiene por la disipación de energía gracias a la rugosidad artificial no es un flujo acelerado, sino que la velocidad adquiere un valor constante en poco tiempo que el flujo ingresa a la rugosidad artificial y se torna en un flujo uniforme en un espacio relativamente corto (Krochin, 1986).

El flujo en la rugosidad artificial incorpora aire como resultado de la emulsión ocupa más espacio que la del agua pura, por lo que existe una relación Aire/Área, que está en función de la pendiente (Krochin, 1986) tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación Aire/Área en función de la pendiente del canal.

Adaptado de: Krochin, 1986

i=tan α	Relación Aire/A_m
0.20	1.11
0.30	1.25
0.40	1.41
0.50	1.67
0.60	2.00

4 Materiales

4.1 Configuración Experimental

El presente análisis experimental fue desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

4.1.1 Canal de experimentación

Para la modelación experimental, se usó el canal con pendiente ajustable del laboratorio, el canal de 12m de longitud es de sección rectangular, consta de una base de 0.3m de ancho, 0.45m de alto. La pendiente mínima es de -0.5 % y la pendiente máxima de 2.5%. El caudal del canal varía entre 9 l/s y 26 l/s.



Figura 13. Canal del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

El canal posee un vertedero triangular, para el control del flujo mediante una ecuación (Ecuación 4.1) que permite la aproximación del caudal que circula por el canal.

$$Q = 1.1241 \cdot H^{2.6085} \quad (4.1)$$

Donde:

Q = Caudal que circula por el canal (m^3/s).

H = Altura del nivel freático desde la base de la salida del vertedero (m).

4.1.2 Limnómetro

Para medir la altura de la superficie se usaron limnómetros mecánicos con una precisión de 0.1mm. Los limnómetros están sujetos en un riel por encima del canal para facilitar su desplazamiento a lo largo del canal, tal como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Limnómetros usados para tomar las medidas de altura dentro del canal de experimentación.

4.1.3 Medidor de la velocidad del flujo

Para medir la velocidad del flujo se usó el software *Vectrino*, el cual está acompañado por un dispositivo que es el encargado de medir la velocidad (Figura 16). El dispositivo consta de 4 sensores que miden la velocidad (con el efecto Doppler) en las direcciones X , Y y Z . El dispositivo mide la velocidad con una precisión de 0.1cm/s.



Figura 15. Dispositivo para medir la velocidad.

4.1.4 Diseño de los elementos de la rugosidad artificial tipo B

El diseño del bloque saliente de la rugosidad tipo B tendrá un alto y ancho k . El valor de la altura de la rugosidad k debe ser superior al valor de la altura de rugosidad crítica k_c descrito por Ven Te Chow, 1994 para que se considere una superficie rugosa (Ver Figura 6-c). Con la ecuación 3.15 (véase sección 3.7.1) se encuentra el valor de k_c . Considerando que la velocidad promedio sin rugosidad artificial es de 2.3m/s~7.55ft/s según Vásquez.

$$k_c = \frac{5 \cdot C \cdot v}{\sqrt{g \cdot V}} = \frac{5 \cdot 113.5 \cdot 1e - 5 \text{ ft}^2/\text{s}}{\sqrt{32.174 \text{ ft}/\text{s}^2 \cdot 7.55 \text{ ft}/\text{s}}} \cdot 30.48 \frac{\text{cm}}{\text{ft}} = 0.004 \text{ cm}$$

Luego de realizados los cálculos, se obtiene que la altura crítica de los elementos de rugosidad es muy baja. Por lo que, se opta tomar un valor de altura de rugosidad **k de 1cm**, no solo porque cumple con creces la condición de que $k > k_c$ y que la superficie del canal se considere hidráulicamente rugosa, sino porque es un valor fácil de medir y resulta conveniente para el modelo en físico.

Los elementos de rugosidad también deben tener los 29.8cm de ancho del fondo, por lo que se hizo el diseño mostrado en la Figura 16 respetando la configuración de la rugosidad tipo B.

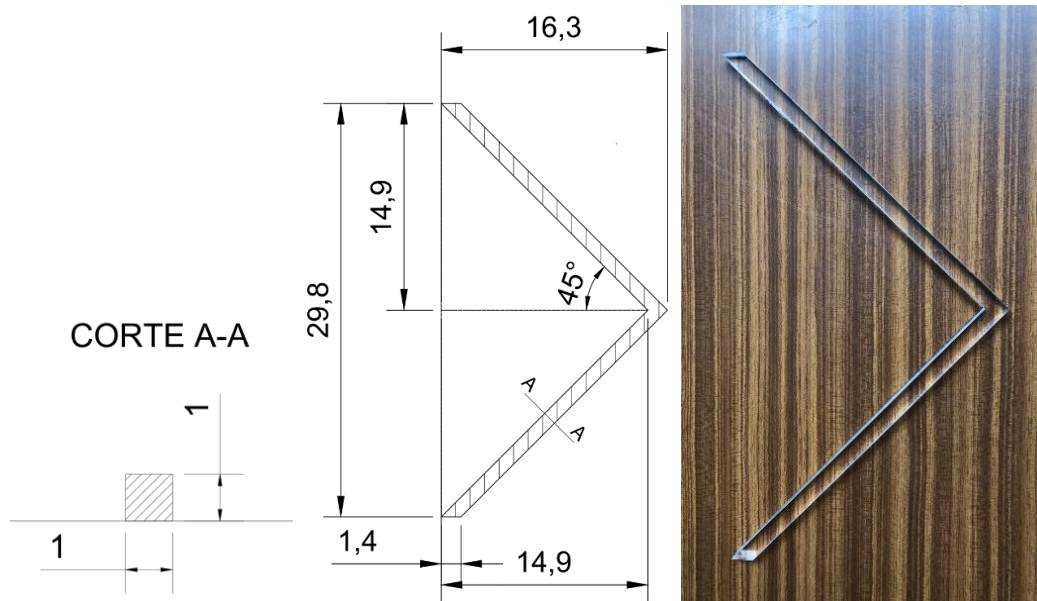


Figura 16. Diseño de los elementos de rugosidad tipo B para el ancho del canal de experimentación (en cm).

La separación entre rugosidades se tomará como aconseja Pikalov de 8k, por lo que **separación entre los elementos de rugosidad será de 8cm.**

El fondo usado para la simulación del experimento se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Fondo del canal utilizado para la experimentación.

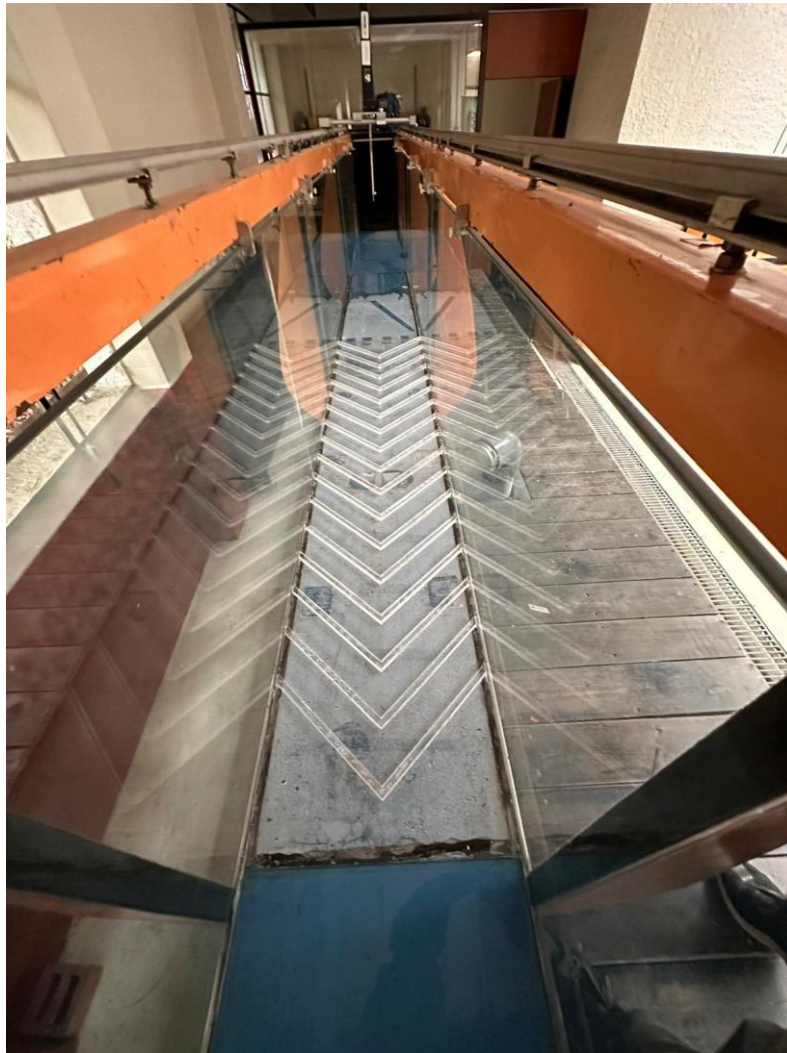


Figura 18. Fondo con rugosidad artificial colocado en el canal experimental.

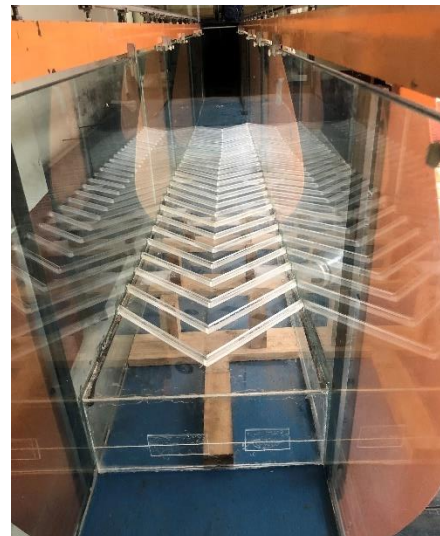


Figura 19. Fondo del canal con los apoyos para aumentar la pendiente en el experimento.

4.2 Número de Manning del canal en la experimentación

Se consideró inicialmente el coeficiente de rugosidad de Manning por ser el más comúnmente utilizado, pero como los desarrollos de la rugosidad artificial son en términos del coeficiente de Chézy posteriormente se realiza su equivalencia mediante la Ecuación 3.11. El número de Manning del canal sin rugosidad artificial se obtuvo con una serie de pruebas. En la Tabla 3 se muestran las tomas medidas en el laboratorio para una pendiente del 2.5%.

Tabla 3 Cálculo del número de Manning realizada en el canal con fondo de acrílico y paredes de vidrio.

RECOLECCIÓN DE DATOS PARA ENCONTRAR EL NÚMERO DE MANNING DEL MATERIAL ACRÍLICO							
Altura H (m) (1)	Caudal (l/s) (2)	Calado (m) (3)	Velocidad (m/s) (4)	A _m (m ²) (5)	P _m (m) (6)	R _n (m) (7)	n (8)
0,1580	9,13	0,0254	1,200	0,008	0,351	0,022	0,0102
0,1847	13,72	0,0336	1,360	0,010	0,367	0,027	0,0106
0,2047	17,94	0,0384	1,558	0,012	0,377	0,031	0,0099
0,2223	22,24	0,0418	1,773	0,013	0,384	0,033	0,0091
0,2305	24,47	0,0447	1,826	0,013	0,389	0,034	0,0092
Promedio							0,0098

Por lo que, para el canal con las paredes de vidrio y fondo de acrílico el número de Manning calibrado fue de 0.0098.

5 Metodología

Para este trabajo se ha analizado la eficiencia del uso de la rugosidad tipo B en un modelo experimental en el laboratorio en función del establecimiento de los coeficientes de resistencia de Chézy *C* para distintos caudales y pendientes. Luego, se desarrolló un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en base a la literatura existente propuesta por Pikalov (1935) y Aivazian (1996), y los datos experimentales.

La medición de los datos se realizó en términos de calados antes de que el flujo llegue a la rugosidad artificial en varias secciones a lo largo de la longitud de la rugosidad artificial (cada 10cm), para poder comparar el cambio que existe entre la velocidad en el canal sin rugosidad artificial y con rugosidad artificial, y también, su correspondiente relación con el valor de resistencia de Chézy. Adicionalmente, también se consideraron mediciones de las velocidades en puntos de interés, como por ejemplo en el resalto hidráulico que se forma por la entrada a la rugosidad artificial y cuando el flujo sea uniforme sobre la rugosidad artificial.

El proceso de toma de datos se repitió para las pendientes: 0.5%, 1.5%, 2.5%, 5% y 7.5%; que fueron las pendientes estudiadas en este trabajo.

5.1 Procesamiento de datos

Uno de los propósitos del presente, es realizar una comparación entre el coeficiente de Chézy obtenido en el canal de experimentación, el coeficiente en base a la literatura, y también el coeficiente de Chézy propio del canal de experimentación sin rugosidad artificial. Los datos de la experimentación se utilizaron para la determinación de los respectivos coeficientes de resistencia de Chézy “C”.

5.1.1 Regresión lineal múltiple

En este trabajo se busca presentar una ecuación empírica de C en función de los valores de la configuración experimental más relevantes. Las variables consideradas fueron h/k , b/h y S . Un modelo lineal de ajuste múltiple fue obtenido para la estimación del coeficiente C (variable dependiente) en función de las variables relevantes consideradas (variables independientes). Por lo que la ecuación de la regresión lineal múltiple quedaría de la siguiente manera:

$$C = b_0 + b_1 \cdot \frac{h}{k} + b_2 \cdot \frac{b}{h} + b_3 \cdot S \quad (5.1)$$

Como se muestra en la Ecuación 5.1, se tienen 3 variables explicativas y una variable dependiente.

5.1.2 Comparación de velocidades con rugosidad y sin rugosidad

Para evaluar la efectividad de la ecuación hallada mediante regresión lineal, se procedió a comparar la velocidad sin rugosidad artificial en contraste con la velocidad con rugosidad artificial encontrada usando la ecuación de regresión lineal obtenida para los datos empíricos tomados en la experimentación.

5.2 Proceso de validación de datos

Para el proceso de validación se tomó en cuenta el coeficiente de determinación de la regresión lineal múltiple R^2_{ajustado} .

También se optó por comparar los resultados del coeficiente de Chézy y Aivazian con el error relativo, entre el valor obtenido de manera empírica y el obtenido por la literatura.

6 Resultados y discusión

En la Tabla 4 se muestra en detalle de los datos utilizados en cada una de las pruebas experimentales y sus respectivos parámetros hidráulicos.

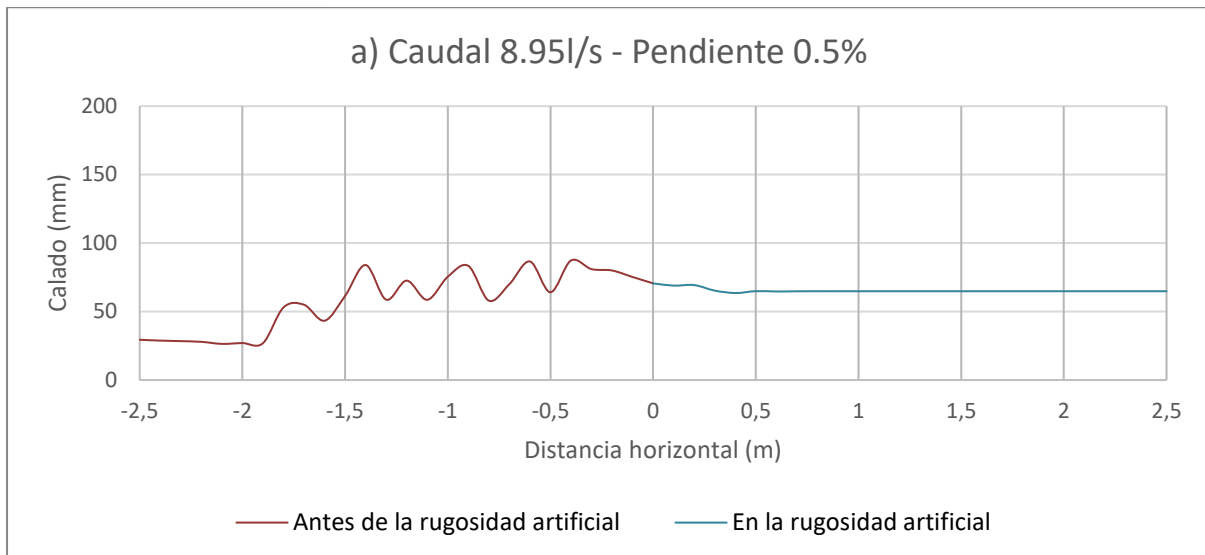
Tabla 4. Error entre el caudal obtenido por el vertedero y el caudal calculado de valores empíricos para diferentes caudales y pendientes.

RECOLECCIÓN DE DATOS						
S (%) (1)	Q (l/s) (2)	Calado (m) (3)	v_{cr} (m/s) (4)	A_m (m) (5)	P_m (m) (6)	R_H (m) (7)
0.5%	8,95	0,0649	0,644	0,014	0,510	0,027
	13,74	0,0807	0,722	0,019	0,541	0,034
	16,34	0,0946	0,731	0,023	0,569	0,040
	20,12	0,1047	0,788	0,026	0,589	0,044
	23,33	0,1105	0,868	0,027	0,601	0,046
1.5%	8,95	0,0555	0,837	0,011	0,491	0,022
	13,74	0,0706	0,872	0,016	0,521	0,030
	16,34	0,0796	0,899	0,018	0,539	0,034
	20,12	0,0874	0,952	0,021	0,555	0,037
	23,33	0,0989	0,984	0,024	0,578	0,042
2.5%	8,95	0,0524	0,865	0,010	0,485	0,021
	13,74	0,0642	0,987	0,014	0,508	0,027
	16,34	0,0702	1,041	0,015	0,520	0,030
	20,12	0,0791	1,096	0,018	0,538	0,034
	23,33	0,0848	1,158	0,020	0,550	0,036
5.0%	8,95	0,0456	1,083	0,008	0,471	0,017
	13,74	0,0564	1,212	0,011	0,493	0,023
	16,34	0,0601	1,329	0,012	0,500	0,025
	19,78	0,0688	1,336	0,015	0,518	0,029
	22,88	0,0713	1,440	0,016	0,523	0,030
7.5%	8,95	0,0415	1,291	0,007	0,463	0,015
	13,74	0,0525	1,373	0,010	0,485	0,021
	16,34	0,0557	1,450	0,011	0,491	0,022
	19,78	0,0598	1,574	0,012	0,500	0,025
	22,88	0,0647	1,641	0,014	0,509	0,027

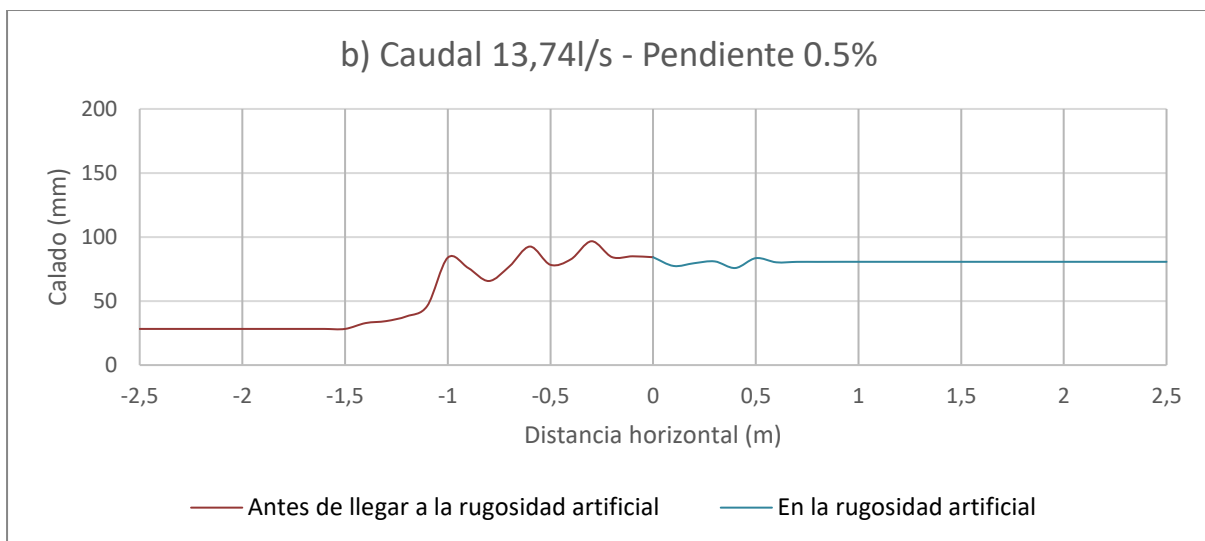
Variación del calado para una pendiente de 0.5%

Cuando el canal de experimentación se posicionó en una pendiente de 0.5% se obtuvieron los perfiles de calado mostrados en la Figura 20 para los caudales de: a) 8.95l/s, b) 13.74l/s, c) 16.34l/s, d) 20.12l/s y e) 23.33l/s.

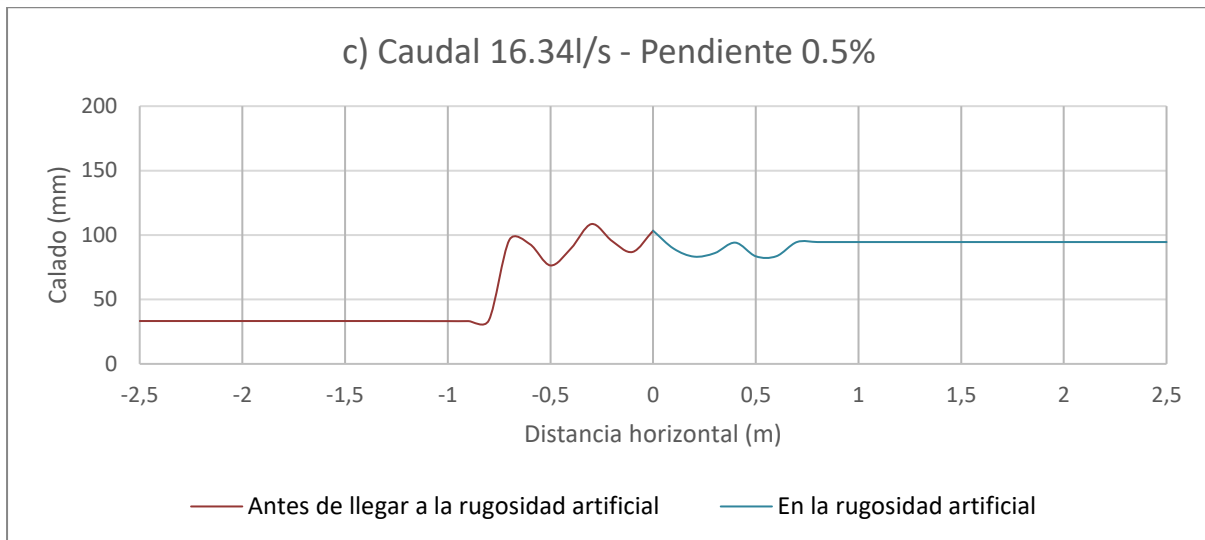
En la Figura 20-a, con el caudal de 8.95l/s y pendiente de 0.5% se puede apreciar el inicio de un resalto hidráulico 1.90m antes de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 26.9mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 0.5m después de que el flujo haya entrado en la rugosidad artificial con un calado de 64.9mm.



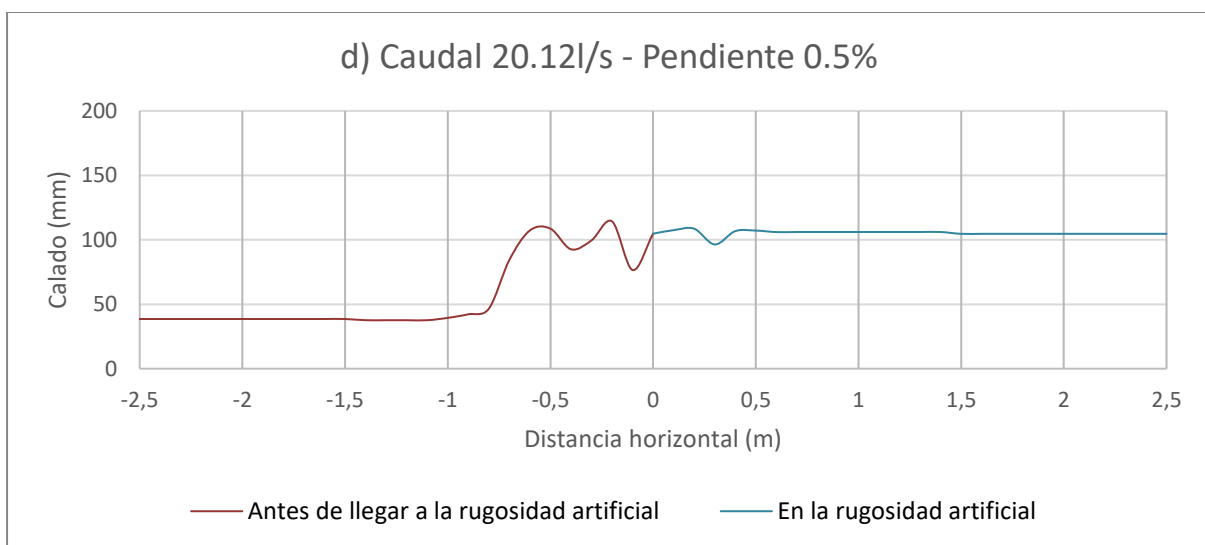
En la Figura 20-b, con el caudal de 13.74l/s y pendiente de 0.5% se puede apreciar un el inicio de un resalto hidráulico 1.10 m antes de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 46.17mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 0.6m después de que el flujo haya entrado en la rugosidad artificial con un calado de 80.3mm.



En la Figura 20-c, con el caudal de 16.34l/s y pendiente de 0.5% se puede apreciar el inicio de un resalto hidráulico 0.80m antes de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 33.8mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 0.8m después de que el flujo haya entrado en la rugosidad artificial con un calado de 94.6mm.



En la Figura 20-d, con el caudal de 20.12l/s y pendiente de 0.5% se puede apreciar el inicio de un resalto hidráulico 0.80m antes de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 46.53mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1m después de que el flujo haya entrado en la rugosidad artificial con un calado de 104.7mm.



En la Figura 20-e, con el caudal de 23.33l/s y pendiente de 0.5% se puede apreciar el inicio de un resalto hidráulico justo 0.10m antes de que el flujo entre en la rugosidad artificial con un calado de 45.85mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.7m después de que el flujo haya entrado en la rugosidad artificial con un calado de 110.1mm.

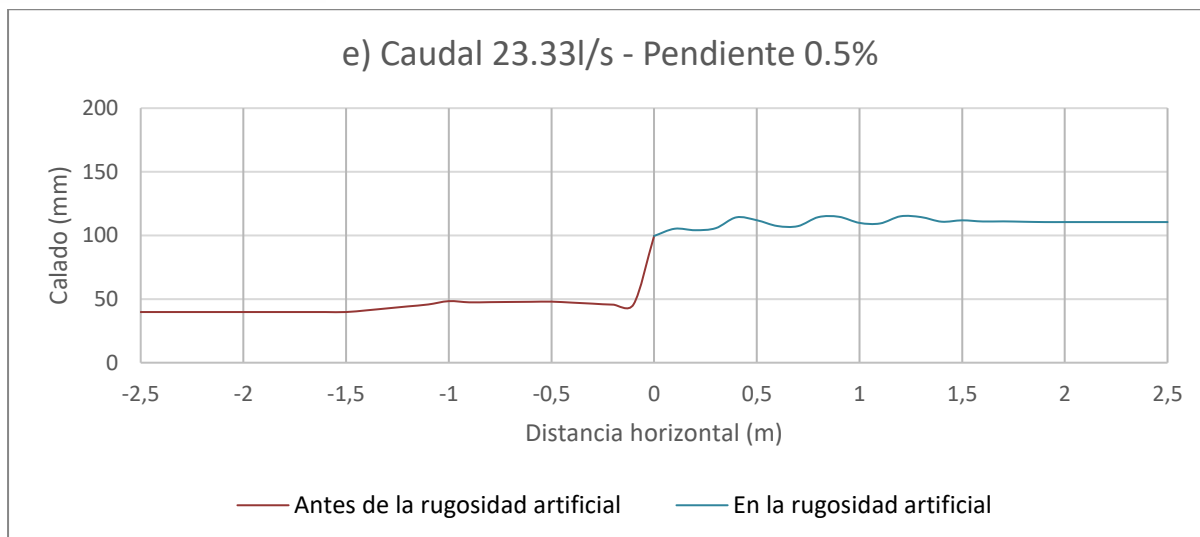
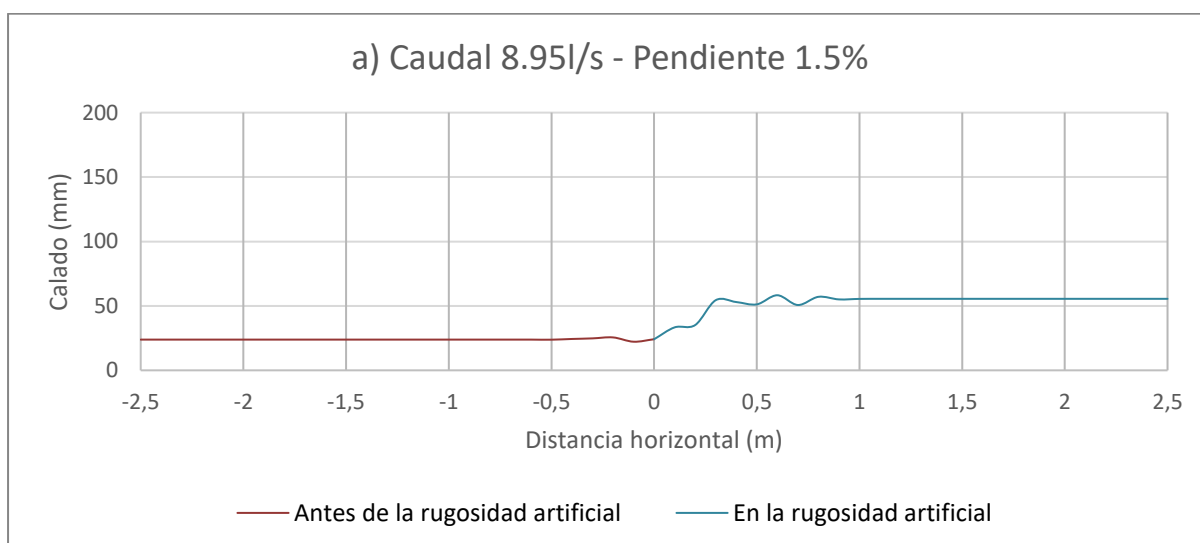


Figura 20. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 0.5%.

Variación del calado para una pendiente de 1.5%

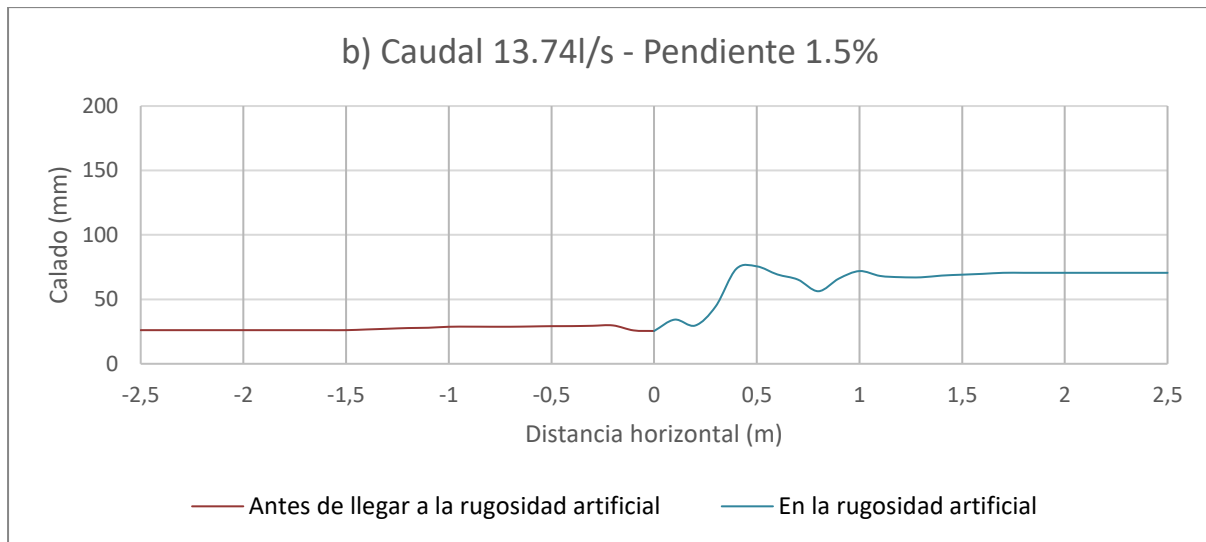
Cuando el canal de experimentación se posicionó en una pendiente de 1.5% se obtuvieron los perfiles de calado mostrados en la Figura 21 para los caudales de a) 8.95l/s, b) 13.74l/s, c) 16.34l/s, d) 20.12l/s y e) 23.33l/s.

En la Figura 21-a, con el caudal de 8.95l/s y pendiente de 1.5% se puede apreciar el inicio de un resalto hidráulico 0.1m antes de que el flujo entre en la rugosidad artificial con un calado de 22.22mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.00m después de que el flujo haya entrado en la rugosidad artificial con un calado de 55.45mm.

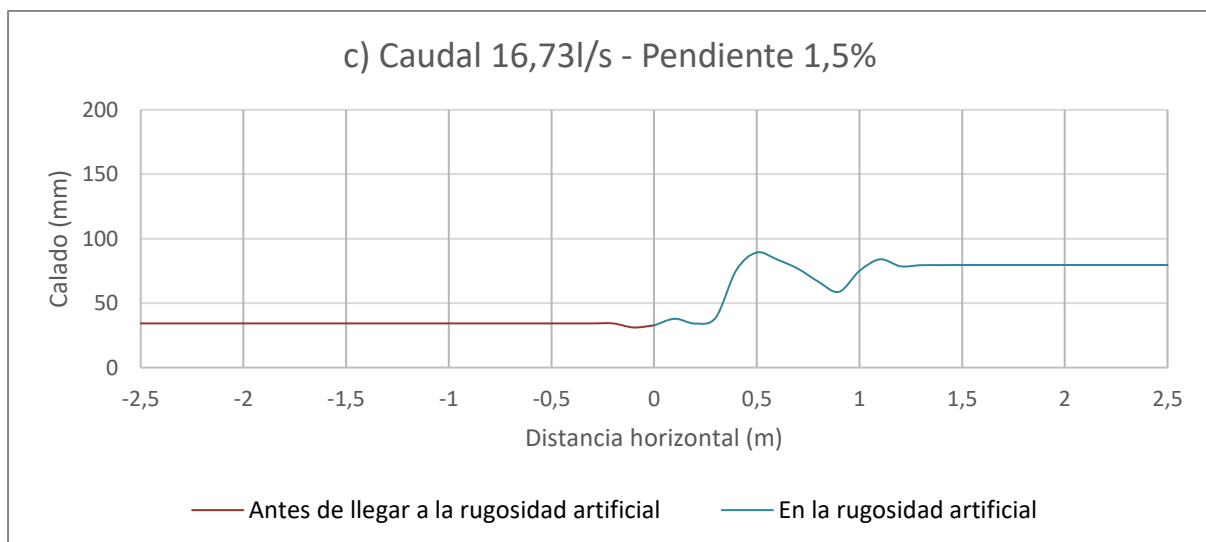


En la Figura 21-b, con el caudal de 13.74l/s y pendiente de 1.5% se puede apreciar un resalto hidráulico 0.2m después de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 29.7mm. Luego,

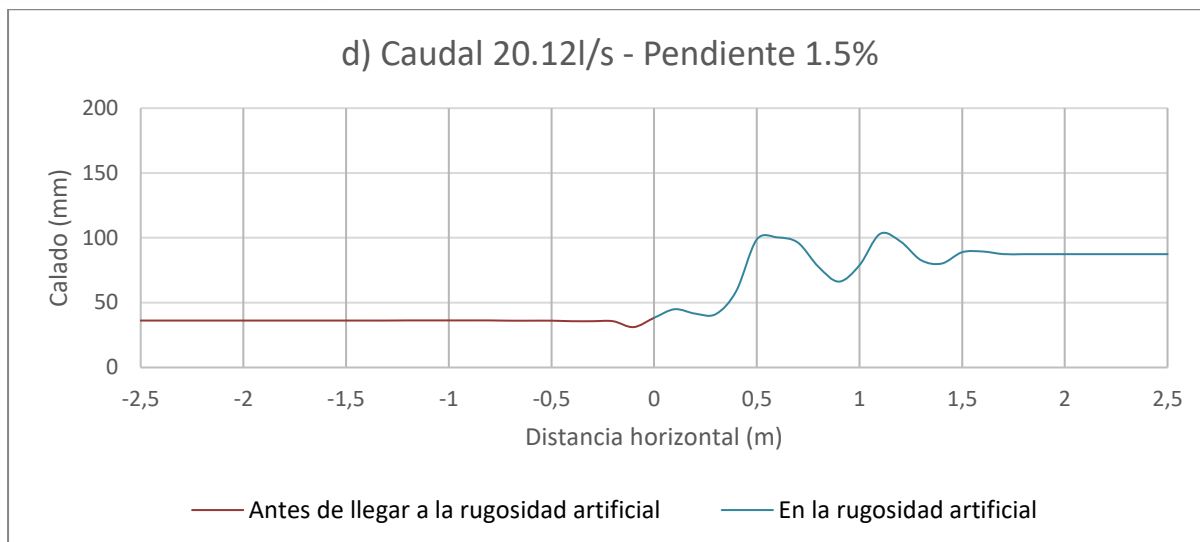
el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.50m después de que ocurra el resalto con un calado de 70.60mm.



En la Figura 12-c, con el caudal de 16.34/s y pendiente de 1.5% se puede apreciar un resalto hidráulico 0.3m después de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 38.75mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.20 m después de que ocurra el resalto con un calado de 79.6mm.



En la Figura 21-d, con el caudal de 20.12/s y pendiente de 1.5% se puede apreciar un resalto hidráulico 0.30m después de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 41.15mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.50m después de que ocurra el resalto con un calado de 87.4mm.



En la Figura 21-e, con el caudal de 23.33/s y pendiente de 1.5% se puede apreciar un resalto hidráulico 0.20m después de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 45.43mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.60m después de que ocurra el resalto con un calado de 98.9mm.

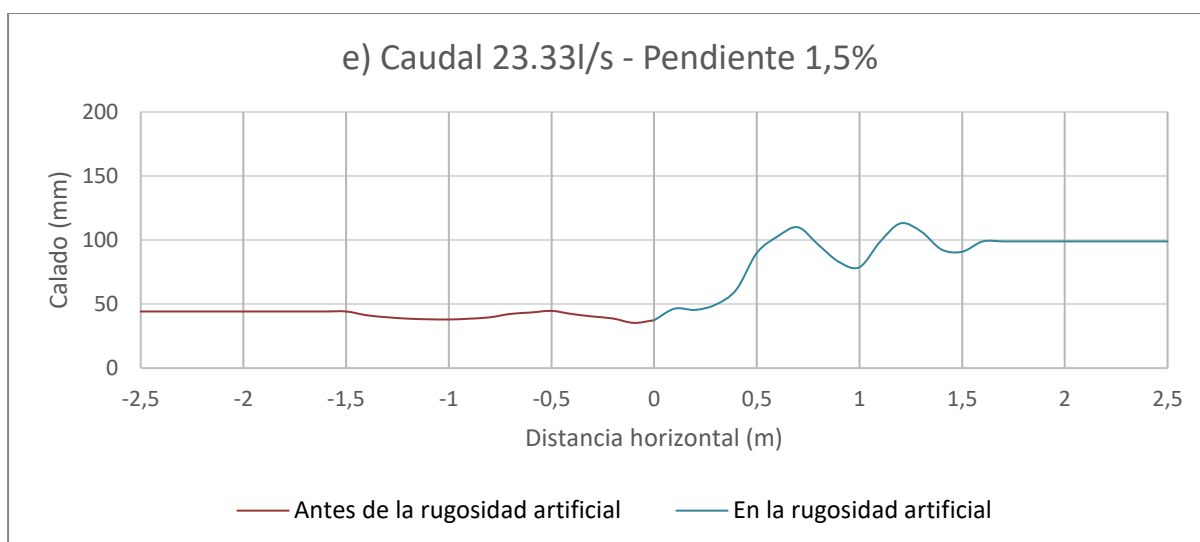


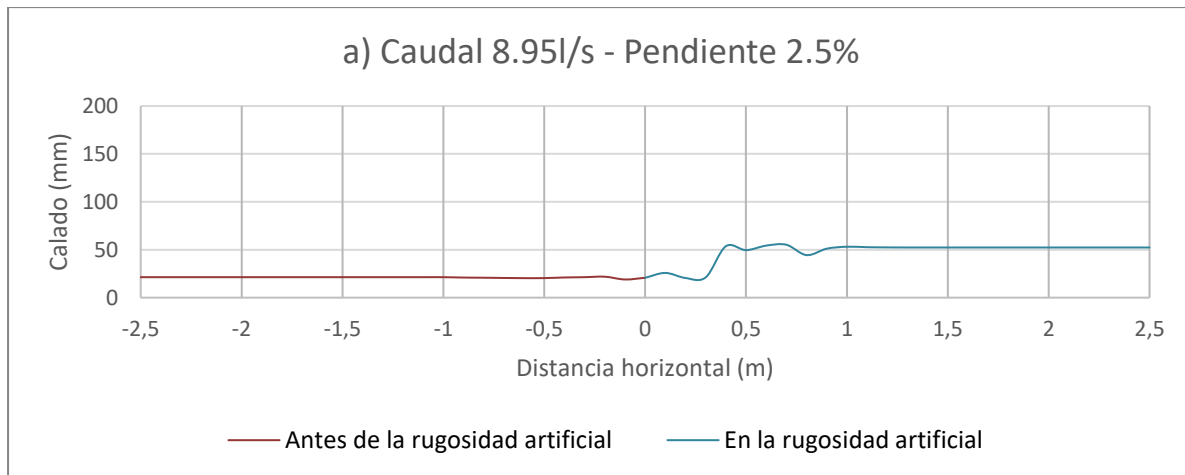
Figura 21. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 1.5%.

Variación del calado para una pendiente de 2.5%

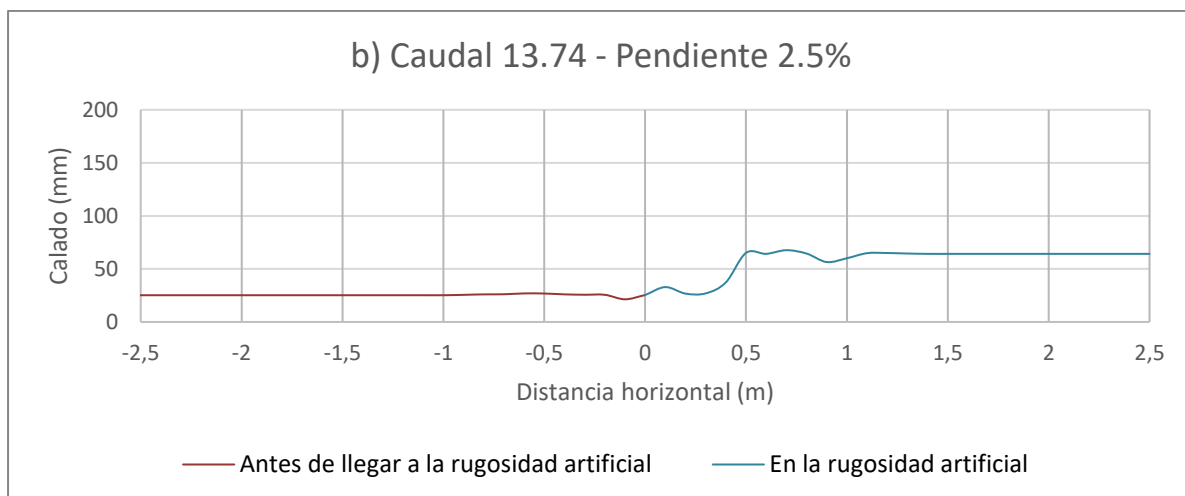
Cuando el canal de experimentación se posicionó en una pendiente de 2.5% se obtuvieron los perfiles de calado mostrados en la Figura 22 para los caudales de a) 8.95l/s, b) 13.74l/s, c) 16.34l/s, d) 20.12l/s y e) 23.33l/s.

En la Figura 22-a, con el caudal de 8.95l/s y pendiente de 2.5% se puede apreciar un resalto hidráulico 0.30m después de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 21.1mm. Luego,

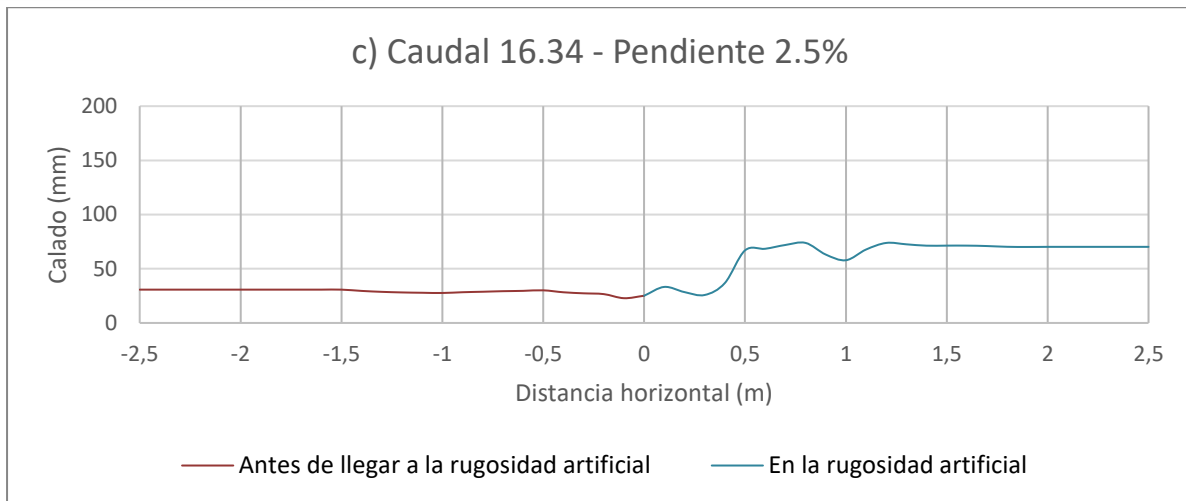
el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.00 m después de que el flujo haya entrado el resalto hidráulico con un calado de 52.35mm.



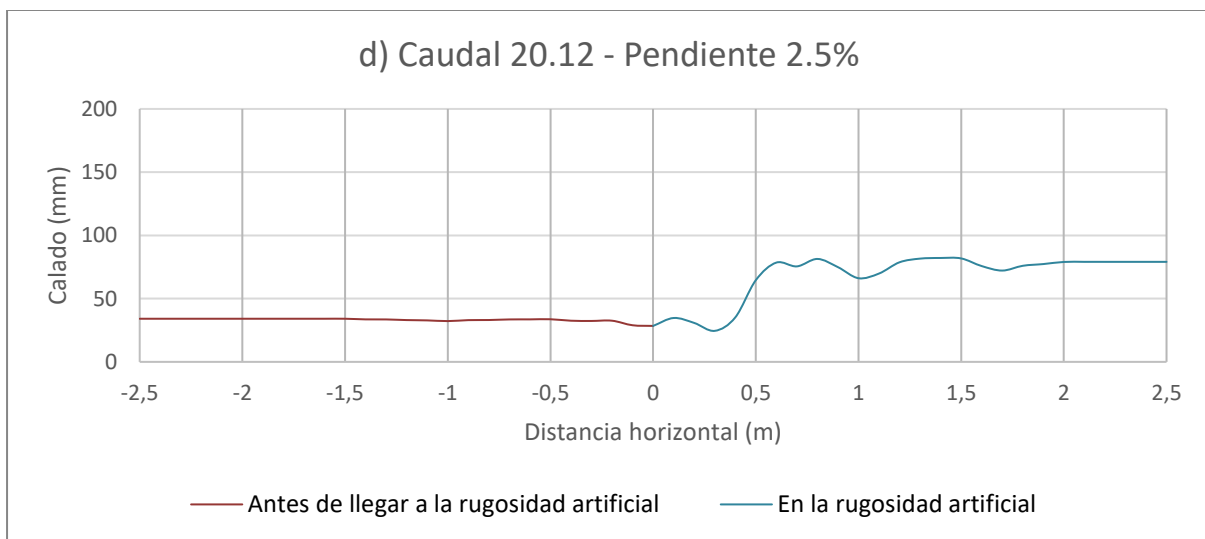
En la Figura 22-b, con el caudal de 13.74l/s y pendiente de 2.5% se puede apreciar un resalto hidráulico 0.3m después de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 26.9mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.10m después de que el flujo haya entrado en el resalto hidráulico con un calado de 64.2mm.



En la Figura 22-c, con el caudal de 16.34l/s y pendiente de 2.5% se puede apreciar un resalto hidráulico 0.3m después de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 25.8mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.70m después de que el flujo haya entrado en el resalto hidráulico con un calado de 70.2mm.



En la Figura 22-d, con el caudal de 20.12l/s y pendiente de 2.5% se puede apreciar un resalto hidráulico 0.3m después de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 24.5mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.80m después de que el flujo haya entrado en el resalto hidráulico con un calado de 79.1mm.



En la Figura 22-e, con el caudal de 23.33l/s y pendiente de 2.5% se puede apreciar un resalto hidráulico 0.4m después de entrar en la rugosidad artificial con un calado de 31.00mm. Luego, el flujo se estabiliza y se hace uniforme 1.70m después de que el flujo haya entrado en el resalto hidráulico con un calado de 84.8mm.

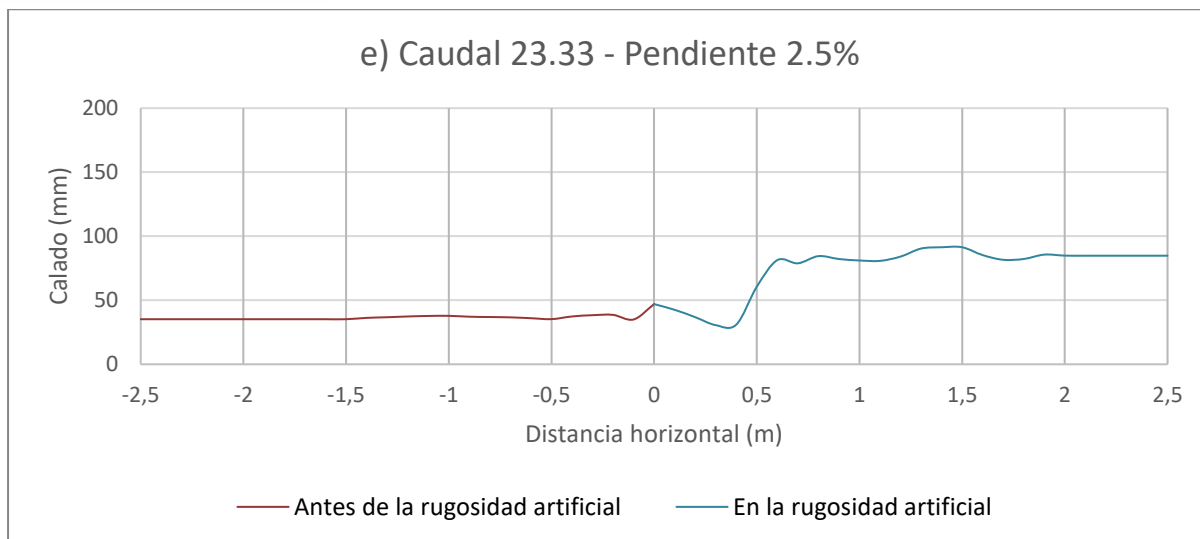


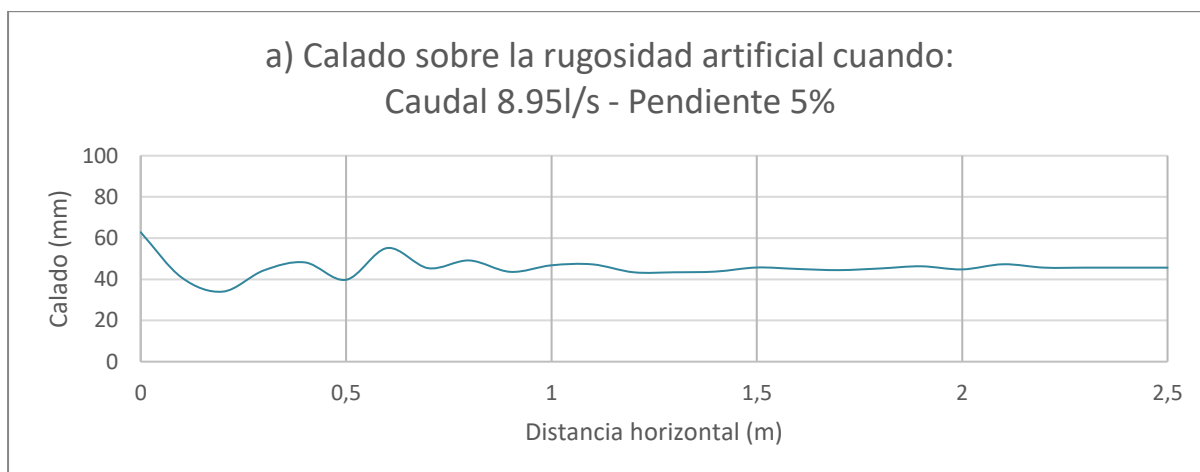
Figura 22. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 2.5%.

Variación del calado para una pendiente de 5%

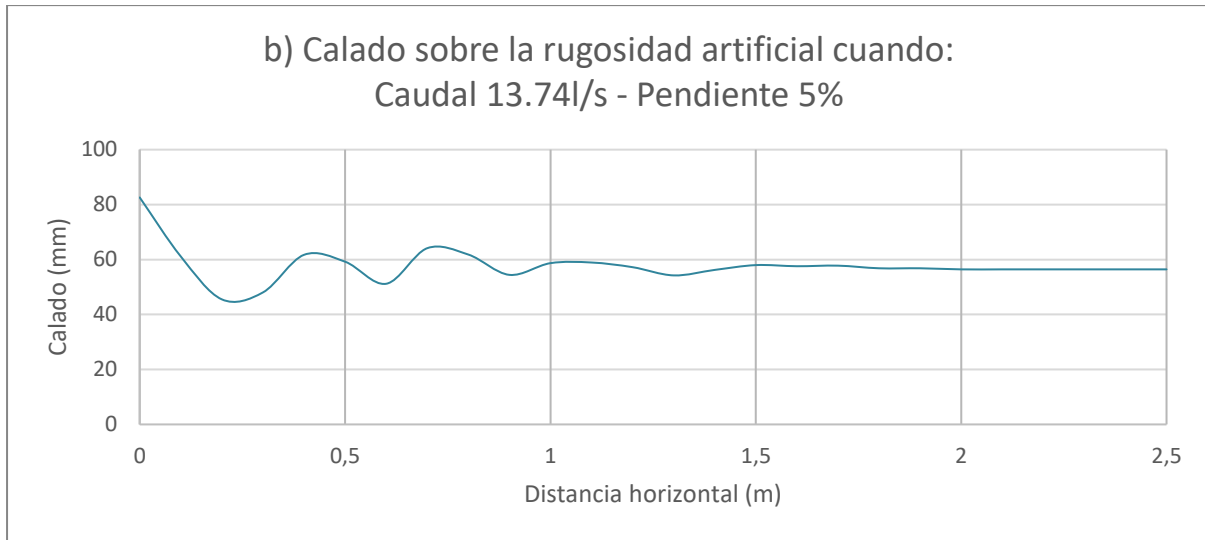
Cuando el canal de experimentación se posicionó en una pendiente del 0% y con una base para el fondo del 5% (en total una pendiente del 5%) se obtuvieron los perfiles de calado mostrados en la Figura 23 para los caudales de a) 8.95l/s, b) 13.74l/s, c) 16.34l/s, d) 19.78l/s y e) 22.88l/s.

Al tener una pendiente de 5% sobrepuesta sobre el canal con una pendiente de 0%, no fue posible contemplar el resalto hidráulico que se forma debido a la rugosidad por la diferencia que existía entre las pendientes de 0% y 5%. Esto también causa que en los primeros 0.2m de que el flujo entre en la rugosidad artificial, se genere un aumento de calado.

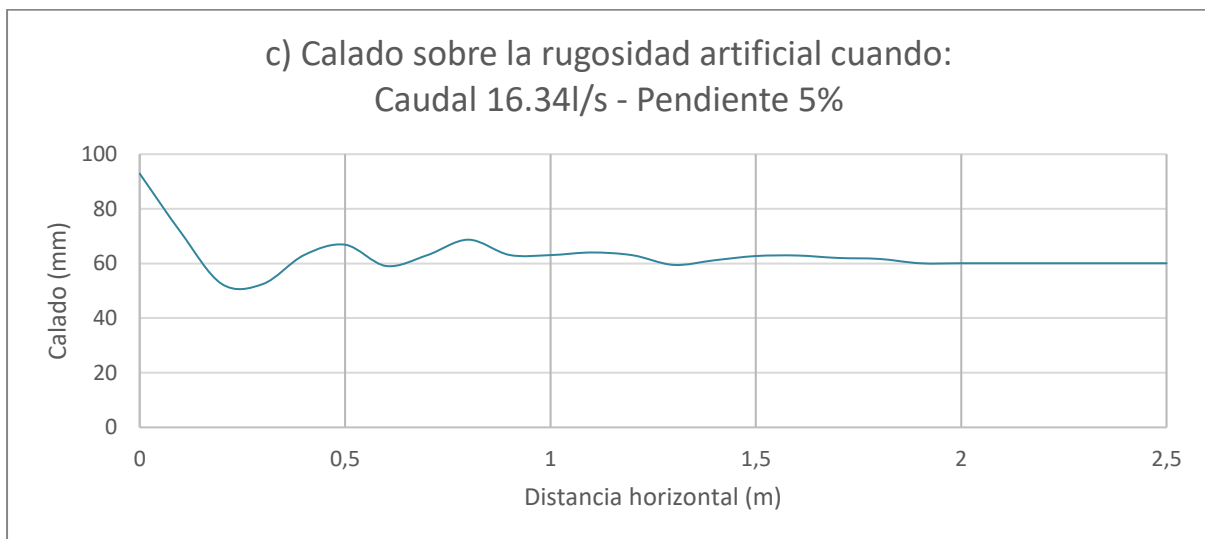
En la Figura 23-a, con el caudal de 8.95l/s y pendiente del 5%, el flujo se hace uniforme a 2.2m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 45.6mm.



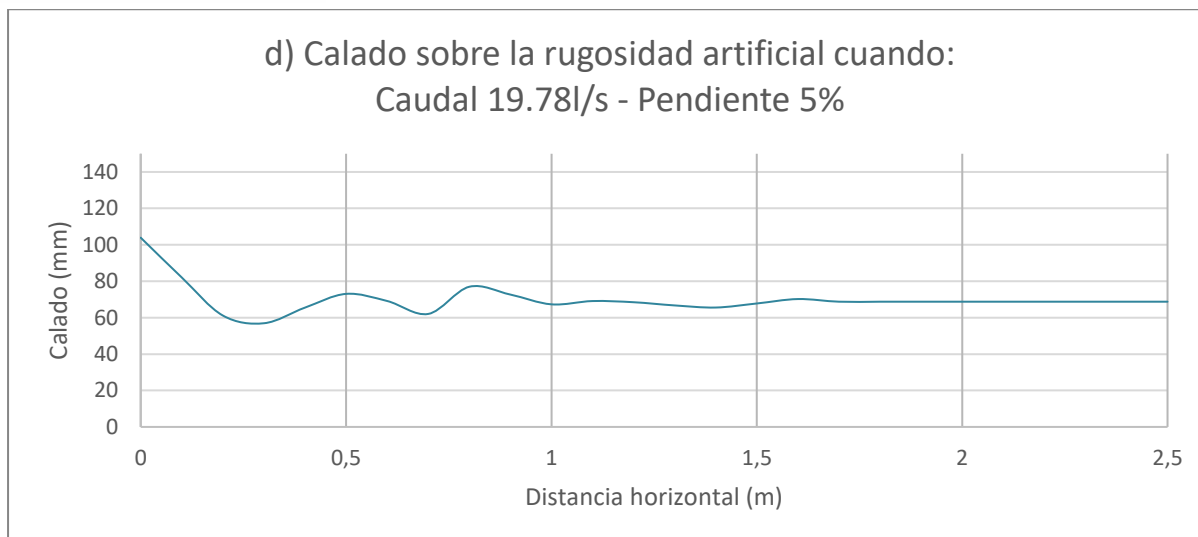
En la Figura 23-b, con el caudal de 13.74l/s y pendiente del 5%, el flujo se hace uniforme a 2.0m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 56.4mm.



En la Figura 23-c, con el caudal de 16.34l/s y pendiente del 5%, el flujo se hace uniforme a 1.90m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 60.1mm.



En la Figura 23-d, con el caudal de 19.78l/s y pendiente del 5%, el flujo se hace uniforme a 1.7m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 68.8mm.



En la Figura 23-e, con el caudal de 22.88l/s y pendiente del 5%, el flujo se hace uniforme a 2.0m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 71.31mm.

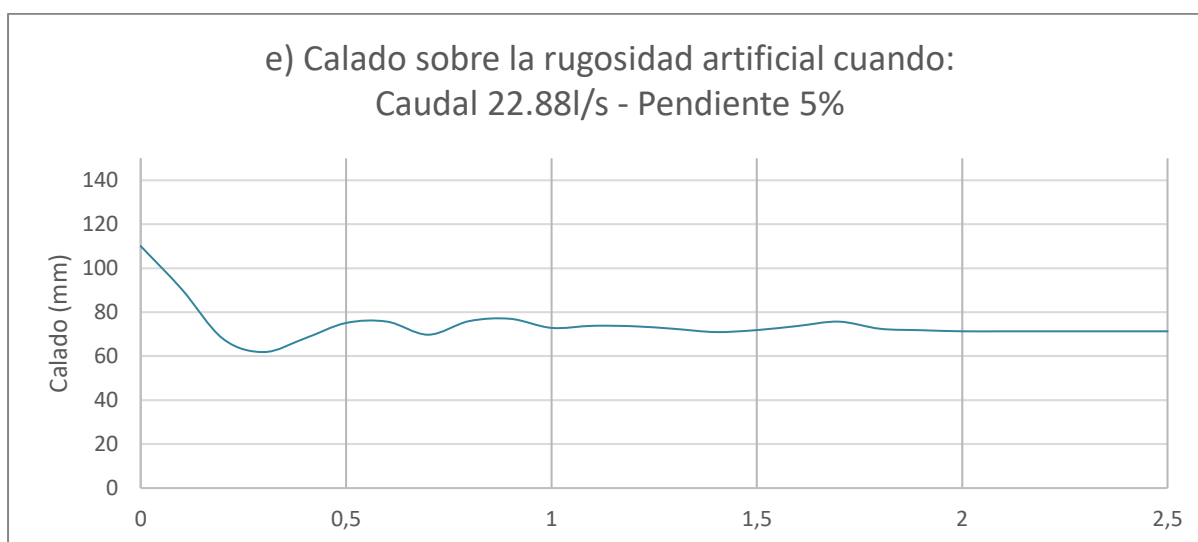


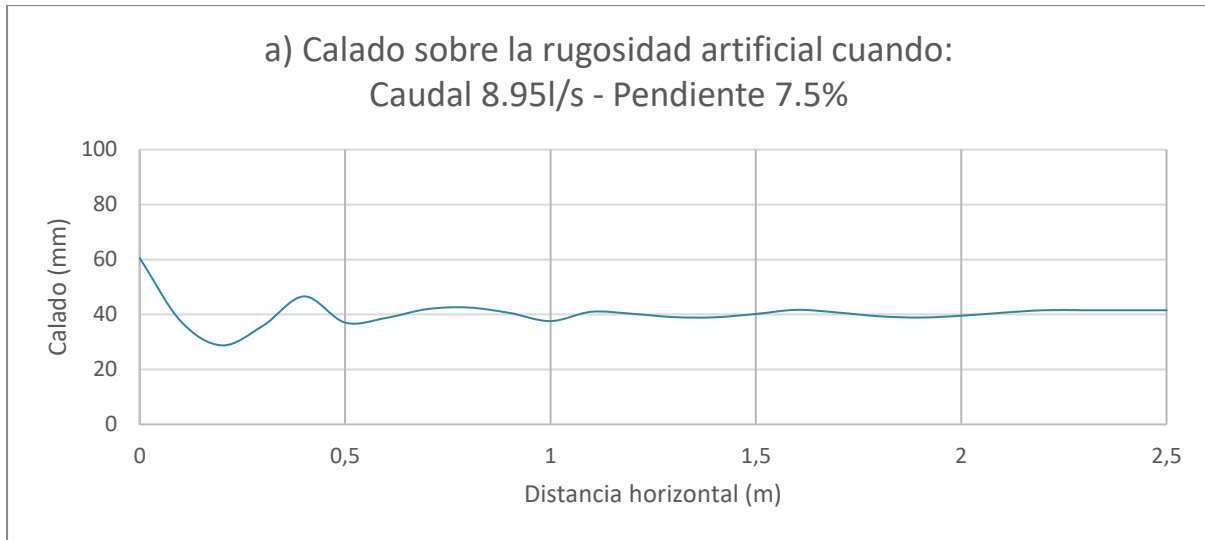
Figura 23. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 5%.

Variación del calado para una pendiente de 7.5%

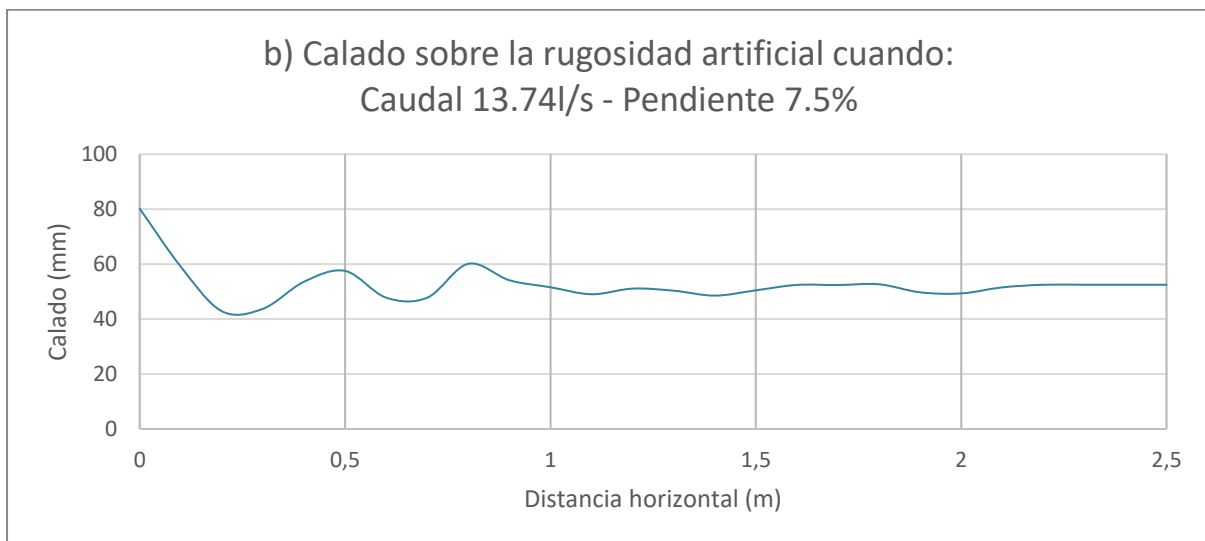
Cuando el canal de experimentación se posicionó en una pendiente del 2.5% y con una base para el fondo del 5% (en total 7.5%), se obtuvieron los perfiles de calado mostrados en la Figura 24 para los caudales de a) 8.95l/s, b) 13.74l/s, c) 16.34l/s, d) 19.78l/s y e) 22.88l/s.

Al igual que cuando se tenía la pendiente del 5%, en este caso, con la pendiente de 7.5%, tampoco se puede obtener el resalto hidráulico debido al cambio de pendiente, en esta ocasión entre las pendientes de 2.5% y 5%.

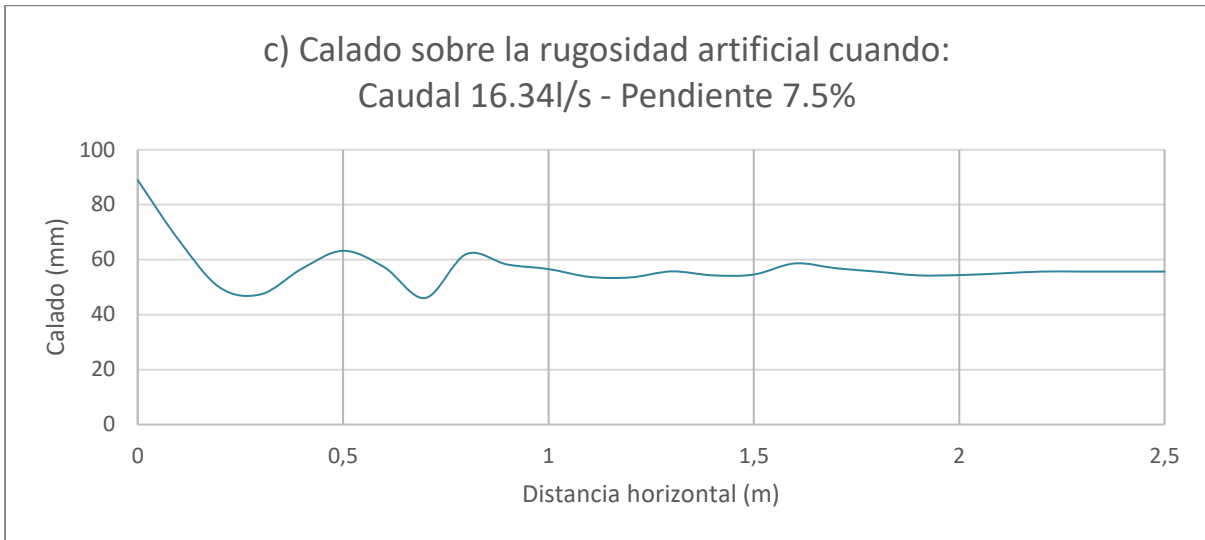
En la Figura 24-a, con el caudal de 8.95l/s y pendiente del 7.5%, el flujo se hace uniforme a 2.2m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 41.54mm.



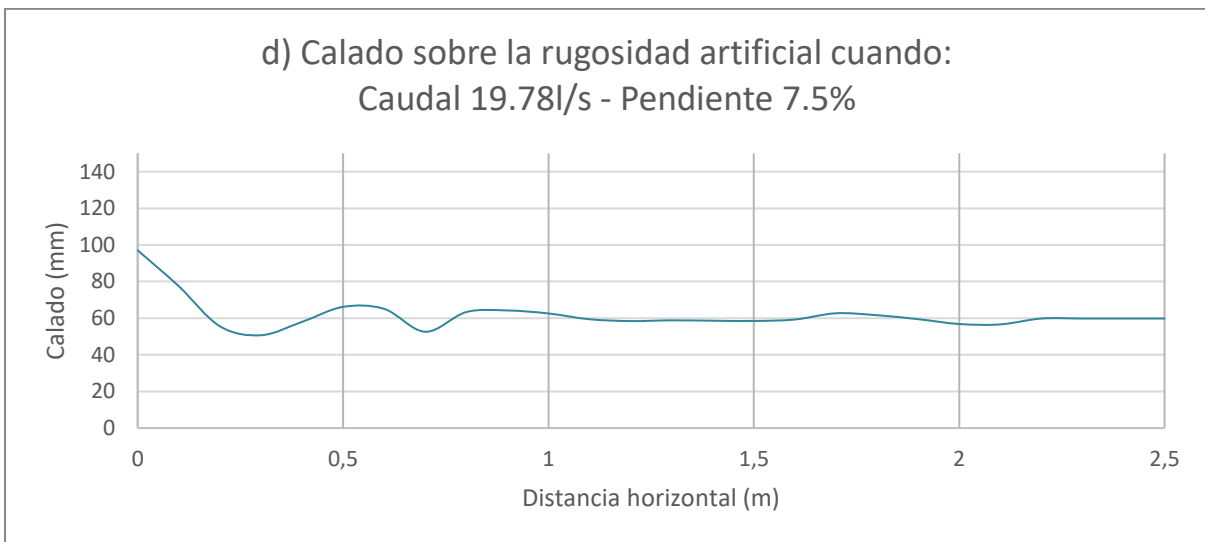
En la Figura 24-b, con el caudal de 13.74l/s y pendiente del 7.5%, el flujo se hace uniforme a 2.2m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 52.5mm.



En la Figura 24-c, con el caudal de 16.34l/s y pendiente del 7.5%, el flujo se hace uniforme a 2.2m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 55.7mm.



En la Figura 24-d, con el caudal de 19.78l/s y pendiente del 7.5%, el flujo se hace uniforme a 2.2m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 59.8mm.



En la Figura 24-e, con el caudal de 22.88l/s y pendiente del 7.5%, el flujo se hace uniforme a 2.2m de haber entrado en la rugosidad artificial con un calado de 64.5mm.

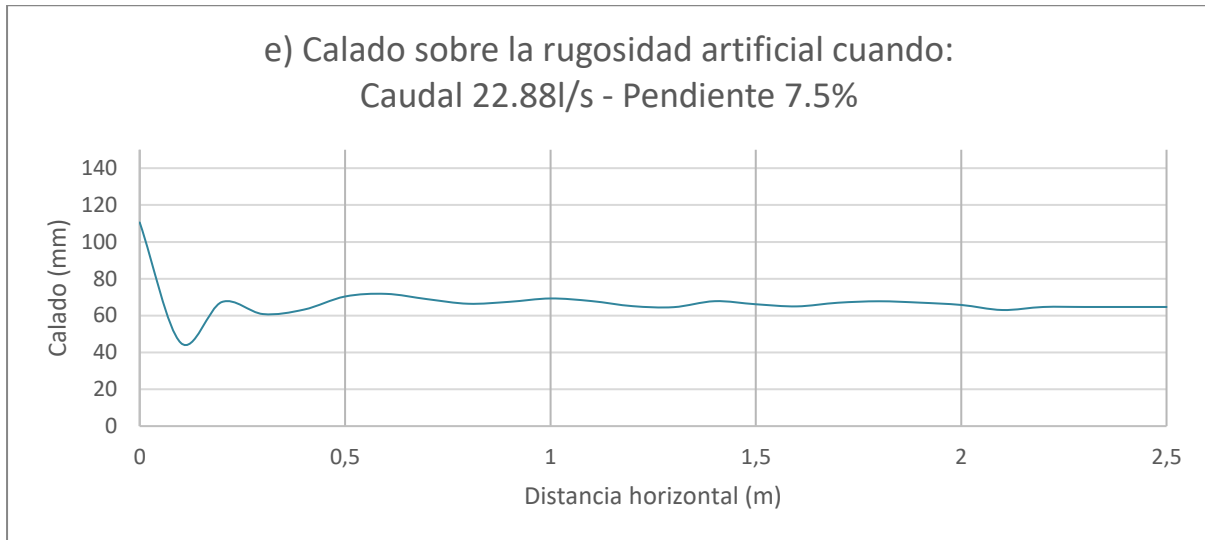


Figura 24. Mediciones de calado en la experimentación para una pendiente del 7.5%.

Perfil de flujo transversal a la dirección del flujo

De manera aleatoria (puesto que, para todos los casos la sección transversal de flujo era similar), se escogió un caso particular de caudal y pendiente para medir el calado en la sección transversal al flujo, así que, para un caudal de 13.74l/s y pendiente de 2.5% se midieron los valores de calado de manera transversal a la dirección del flujo uniforme a lo largo del ancho de 30cm. En la Figura 25 se muestra el calado de manera gráfica.

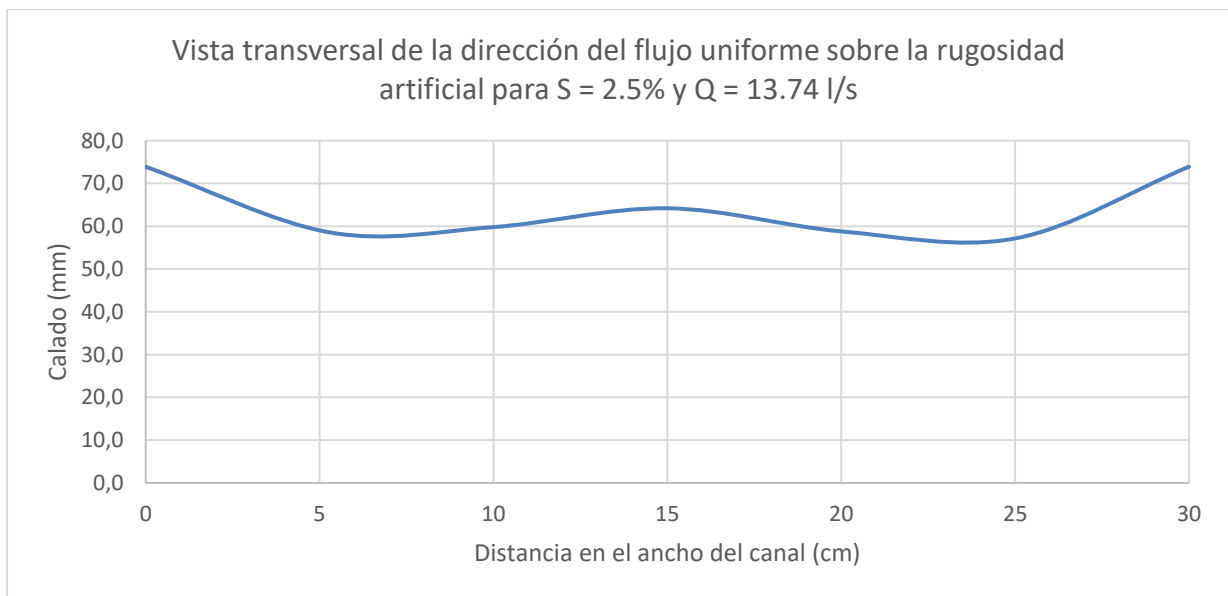


Figura 25. Calados medidos de manera transversal a la dirección del flujo uniforme sobre la rugosidad artificial para la pendiente de 2.5% y caudal de 13.74 l/s.

6.1 Evaluación del flujo sin rugosidad artificial

Mediante cálculos teóricos con el número de Manning del tramo de estudio de 0.098, se obtuvieron las velocidades de flujo para el canal sin rugosidad artificial (Tabla 5).

Tabla 5. Cálculo de la velocidad, del coeficiente de Chézy y factor de Darcy del flujo sin rugosidad artificial.

CÁLCULO DE VELOCIDAD Y COEFICIENTE DE CHÉZY SIN RUGOSIDAD ARTIFICIAL							
S (%) (1)	Q (l/s) (2)	y (m) (3)	A _m (m ²) (4)	P _m (m) (5)	R _H (m) (6)	v _{sr} (m/s) (7)	C _{sr} (8)
0.5%	8,95	0,0409	0,0123	0,382	0,03215	0,73	57,51
	13,74	0,0544	0,0163	0,409	0,03991	0,84	59,62
	16,34	0,0611	0,0183	0,422	0,04343	0,89	60,47
	20,12	0,0705	0,0211	0,441	0,04795	0,95	61,47
	23,33	0,0781	0,0234	0,456	0,05135	1,00	62,18
1.5%	8,95	0,0287	0,00860	0,357	0,0241	1,04	54,80
	13,74	0,0378	0,01134	0,376	0,0302	1,21	56,91
	16,34	0,0424	0,01271	0,385	0,0330	1,29	57,77
	20,12	0,0486	0,01458	0,397	0,0367	1,38	58,80
	23,33	0,0537	0,01610	0,407	0,0395	1,45	59,52
2.5%	8,95	0,0243	0,00730	0,349	0,02095	1,23	53,55
	13,74	0,0320	0,00961	0,364	0,02640	1,43	55,65
	16,34	0,0358	0,01075	0,372	0,02893	1,52	56,51
	20,12	0,0411	0,01232	0,382	0,03224	1,63	57,54
	23,33	0,0453	0,01358	0,391	0,03478	1,72	58,27
5.0%	8,95	0,0196	0,00587	0,339	0,01730	1,53	51,87
	13,74	0,0257	0,00770	0,351	0,02191	1,79	53,95
	16,34	0,0287	0,00860	0,357	0,02406	1,90	54,80
	19,78	0,0324	0,00972	0,365	0,02665	2,03	55,74
	22,88	0,0356	0,01068	0,371	0,02878	2,14	56,46
7.5%	8,95	0,0172	0,00517	0,334	0,01545	1,73	50,90
	13,74	0,0226	0,00677	0,345	0,01961	2,03	52,96
	16,34	0,0252	0,00755	0,350	0,02156	2,16	53,81
	19,78	0,0284	0,00853	0,357	0,02391	2,32	54,74
	22,88	0,0312	0,00937	0,362	0,02585	2,44	55,46

Ecuación obtenida de la regresión lineal múltiple

Con los datos obtenidos mediante la experimentación en laboratorio, se obtuvo un modelo empírico para la estimación del coeficiente de rugosidad de Chézy para la rugosidad artificial tipo B. Para obtener dicho modelo empírico, en función de variables adimensionales obtenidas en base al calado, la altura de la rugosidad, el ancho del canal y la pendiente del canal, se parte desarrolla el ajuste lineal múltiple descrito. En el Anexo A se encuentra el procesamiento detallado de los datos para obtener la ecuación por regresión lineal múltiple de los valores de la resistencia de Chézy. La ecuación de C se muestra en la Ecuación 6.1, la cual tiene un coeficiente de correlación R² =0.537.

$$C_{ecuación} = 7.59 + 3.48 \cdot \left(\frac{h}{k}\right) + 3.47 \cdot \left(\frac{b}{h}\right) - 176.36 \cdot S \tag{6.1}$$

6.2 Resultados del coeficiente de Chézy por el método de Pikalov

Para realizar la comparación entre el coeficiente de Chézy se obtuvo los resultados del coeficiente de Chézy medido, de la ecuación de regresión lineal múltiple (Ecuación 6.1), de manera teórica para la rugosidad tipo B y sin rugosidad artificial (Tabla 5). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación del coeficiente de Chézy obtenido por diferentes formas.

COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE CHÉZY C									
S (%) (1)	Q (l/s) (2)	v _{cr} (m/s) (3)	Rh (m) (4)	h/k (5)	b/h (6)	C medido (7)	C ecuación (8)	C teórico (9)	C sr (10)
0.5%	8,95	0,644	0,027	5,49	5,47	55,35	44,786	22,15	57,51
	13,74	0,722	0,034	7,07	4,25	55,16	46,032	24,25	59,62
	16,34	0,731	0,040	8,46	3,55	51,74	48,442	26,61	60,47
	20,12	0,788	0,044	9,47	3,17	53,35	50,639	28,69	61,47
	23,33	0,868	0,046	10,05	2,99	57,37	52,033	30,08	62,18
1.5%	8,95	0,837	0,022	4,55	6,59	45,66	43,676	21,18	54,80
	13,74	0,872	0,030	6,06	4,95	41,25	43,220	22,85	56,91
	16,34	0,899	0,034	6,96	4,31	39,94	44,126	24,09	57,77
	20,12	0,952	0,037	7,74	3,88	40,39	45,330	25,33	58,80
	23,33	0,984	0,042	8,89	3,37	39,43	47,588	27,46	59,52
2.5%	8,95	0,865	0,021	4,24	7,08	37,99	42,520	20,91	53,55
	13,74	0,987	0,027	5,42	5,54	38,15	41,261	22,08	55,65
	16,34	1,041	0,030	6,02	4,98	38,26	41,431	22,80	56,51
	20,12	1,096	0,034	6,91	4,34	37,84	42,297	24,02	57,54
	23,33	1,158	0,036	7,48	4,01	38,59	43,130	24,90	58,27
5.0%	8,95	1,083	0,017	4,56	6,57	37,10	40,410	21,20	51,87
	13,74	1,212	0,023	5,64	5,32	35,84	37,368	22,34	53,95
	16,34	1,329	0,025	6,01	4,99	37,81	37,001	22,78	54,80
	19,78	1,336	0,029	6,88	4,36	35,12	36,946	23,97	55,74
	22,55	1,440	0,030	7,13	4,21	37,10	37,095	24,35	56,46
7.5%	8,95	1,291	0,015	3,15	9,51	38,87	38,372	19,73	50,90
	13,85	1,373	0,021	4,25	7,06	34,75	33,671	20,45	52,96
	16,01	1,450	0,022	4,57	6,57	35,32	33,069	20,72	53,81
	19,78	1,574	0,025	4,98	6,02	36,64	32,610	21,12	54,74
	22,55	1,641	0,027	5,47	5,49	36,48	32,441	21,63	55,46

6.2.1 Resultados gráficos del método de Pikalov

En la Figura 26, se expresa gráficamente el coeficiente de Chézy vs el Caudal medido en la experimentación para los valores de C en la pendiente de 0.5% de la Tabla 6.

En la Figura 26, se puede observar que:

- Los valores de C medidos, se acercan a los valores de C en el canal sin rugosidad. Esto es debido a que, con menores pendientes, existen menos pérdidas de energía, por lo que, el canal colocado en una pendiente de 0.5% no genera grandes pérdidas con la rugosidad artificial, y consecuentemente, el valor de C medido con rugosidad artificial se acerca al valor de C en un canal sin rugosidad artificial.
- El valor máximo de C medido fue el de caudal 23.33l/s con un C de 57.37, mientras que el menor fue el de 16.34l/s con un C de 51.74; en promedio los valores de C para la pendiente de 0.5% están en 54.60.
- Los valores de C calculados con la ecuación están por debajo de los valores de C medidos, aunque tiene cierta similitud la forma de la ecuación con la forma de la ecuación teórica.
- Los valores teóricos están por debajo de los valores de C medidos de manera considerable, teniendo en cuenta que, en promedio, los valores de C medidos son 2.10 veces mayores que los teóricos.
- Para el menor caudal se genera una desviación de 19.08% en el coeficiente de C calculado con la ecuación con respecto al C medido, y es el valor que más se aleja del valor de C de la ecuación obtenida; mientras que los que más se acercan son los de caudal de 16.34l/s y 20.12l/s. En general, los valores de C medidos están por encima de los C calculados con la ecuación un 11.27% en promedio.

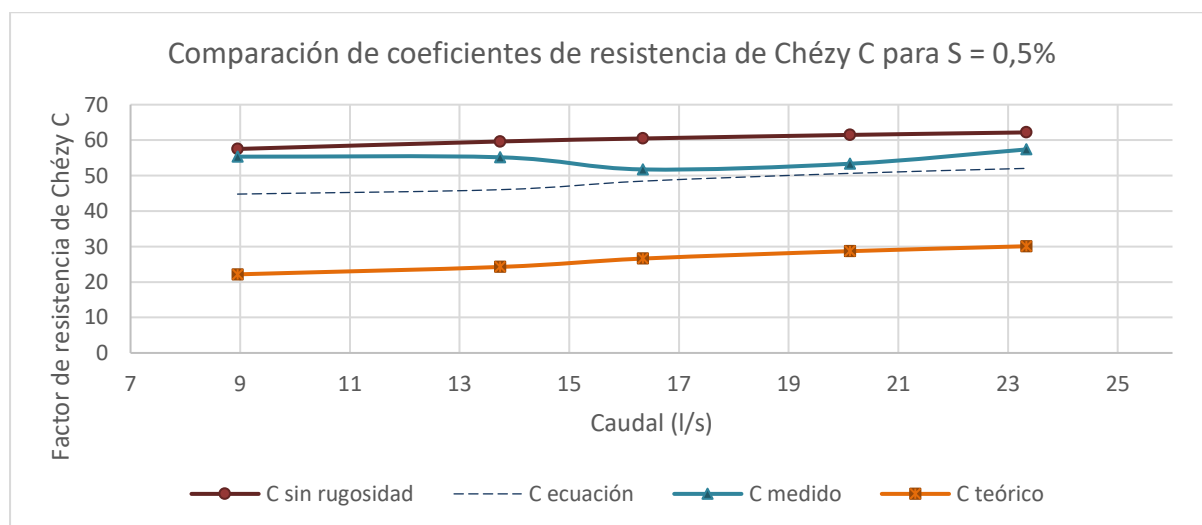


Figura 26. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 0.5%.

En la Figura 27, se expresa gráficamente el coeficiente de Chézy vs el Caudal medido en la experimentación para los valores de C en la pendiente de 1.5% de la Tabla 6.

En la Figura 27, se puede observar que:

- El valor máximo de C fue el de caudal 8.95 l/s con un C de 45.66, mientras que el menor fue el de 23.33l/s con un C de 39.43; en promedio, los valores de C medidos para la pendiente de 1.5% están en 41.33.
- Los valores de C calculados con la ecuación están por encima de los valores de C medidos a partir de 11.25l/s. También se nota que los valores de C medidos van disminuyendo conforme disminuye el caudal, los valores de C de la ecuación, en cambio aumentan.
- La ecuación obtenida tiene de igual forma que para la pendiente de 0.5%, similitud en la forma de la ecuación con respecto a la ecuación teórica.
- En promedio, los valores de C medidos son 172% mayores que los teóricos, lo que, indica una imprecisión por parte de la ecuación dada por Pikalov.
- Para el caudal de 8.95l/s se genera una desviación en el coeficiente de C medido con respecto a los medidos con otros caudales, puesto que es el que más se acerca al C sin rugosidad. En general, los valores de C medidos están por encima de los C calculados con la ecuación un 10.50% en promedio.

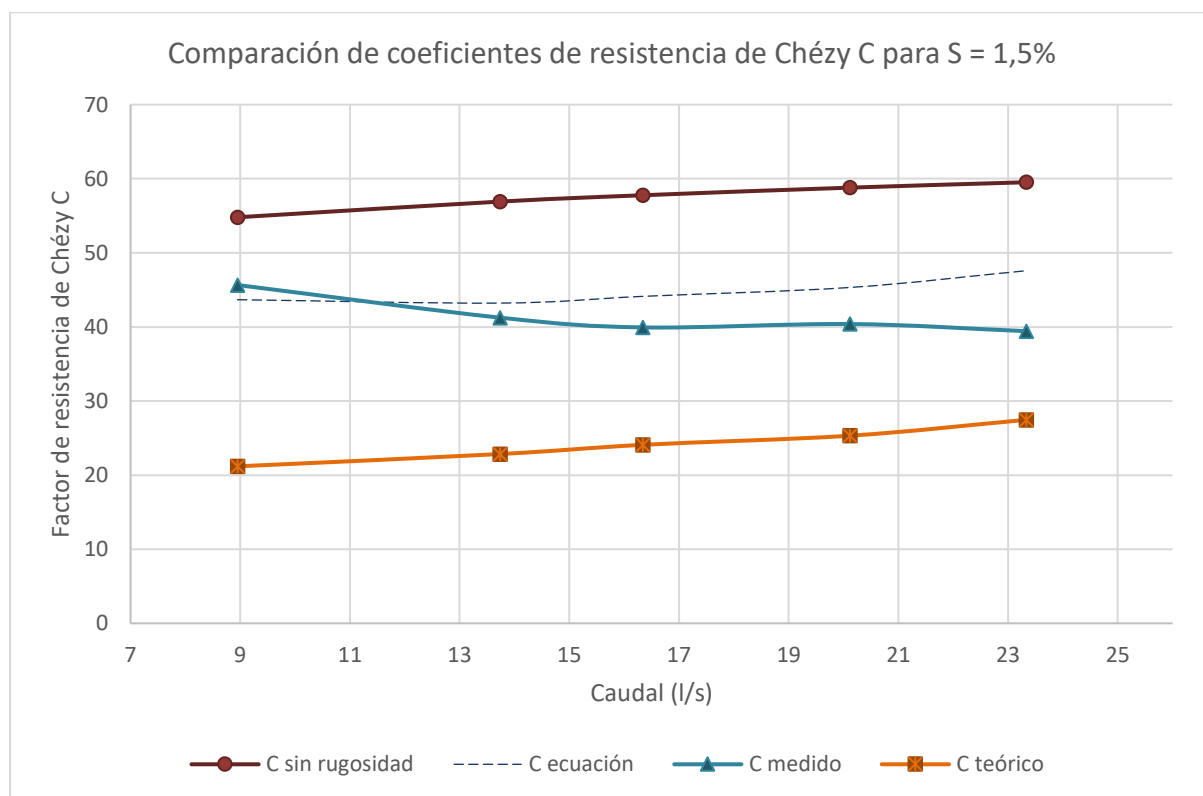


Figura 27. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 1.5%.

En la Figura 28, se expresa gráficamente el coeficiente de Chézy vs el Caudal medido en la experimentación para los valores de C en la pendiente de 2.5% de la Tabla 6.

En la Figura 28, se puede observar que:

- El valor máximo de C fue el de caudal 23.33 l/s con un C de 38.59, mientras que el menor fue el de 20.12l/s con un C de 37.84; en promedio los valores de C medidos para una pendiente de 2.5% están en 38.16.
- En promedio, los valores de C calculados con la ecuación difieren un 10.38% con respecto a los valores de C medidos.
- Se puede observar en los valores de C calculados con la ecuación una concavidad hacia arriba, con el punto más bajo de C cercano a los 14.75l/s.
- En promedio, los valores de C medidos son un 167% mayores, que los valores de C teóricos.
- Con respecto a los valores de C medidos, los valores de C en un canal sin rugosidad y los valores de C teóricos, las 3 gráficas guardan una relación que implica que, a mayor caudal, mayores valores de C.

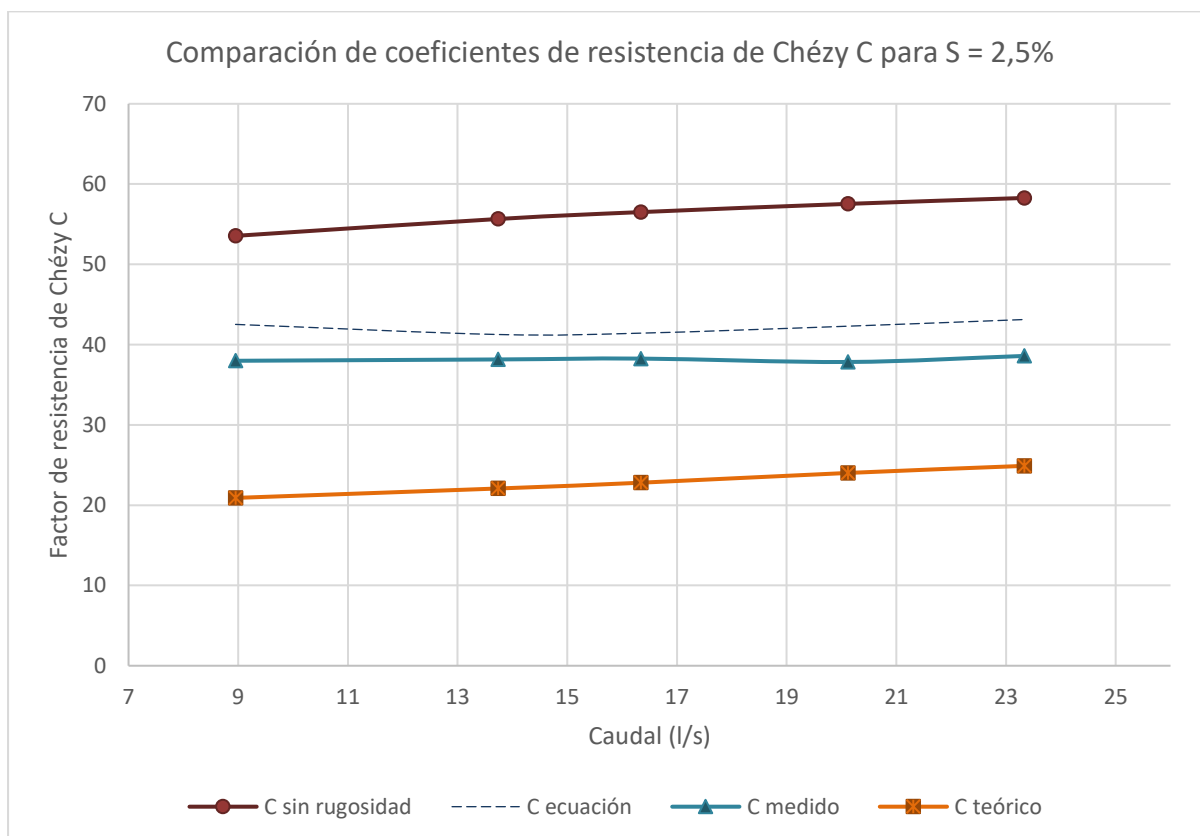


Figura 28. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 2.5%.

En la Figura 29, se expresa gráficamente el coeficiente de Chézy vs el Caudal medido en la experimentación para los valores de C en la pendiente de 5% de la Tabla 6.

En la Figura 29, se puede observar que:

- El valor máximo de C fue el de caudal 16.34 l/s con un C de 37.81, mientras que el menor fue el de 19.78l/s con un C de 35.12; en promedio los valores de C medidos para una pendiente de 5% están en 36.59.
- Para una pendiente del 5% se observa un mayor ajuste por parte de los valores de C calculados con la ecuación con respecto a los valores medidos en el laboratorio, con una diferencia entre valores de 4.10% en promedio.
- Para este caso, se sigue observando en los valores de C calculados con la ecuación una concavidad hacia arriba.
- En promedio, los valores de C medidos son un 160% mayores, que los valores de C teóricos.
- Con respecto a los valores de C medidos, los valores de C en un canal sin rugosidad y los valores teóricos, las 3 gráficas guardan una relación a partir del caudal de 16.34l/s, que implica que, a mayor caudal, mayores valores de C. Para los valores de C para caudales menores a 16.34l/s, el valor de C de la calculado con la ecuación se acerca a los valores de C en un canal sin rugosidad.

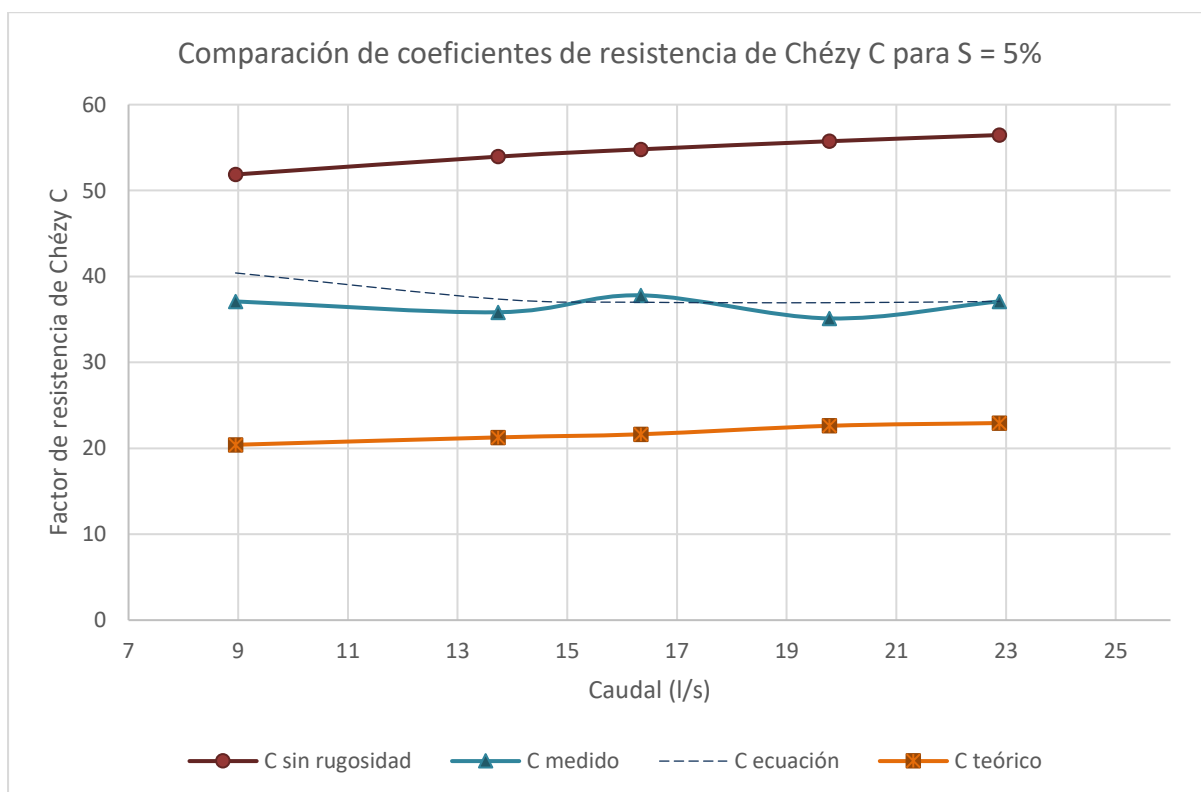


Figura 29. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 5%.

En la Figura 30 se expresa gráficamente el coeficiente de Chézy vs el Caudal medido en la experimentación para los valores de C en la pendiente de 7.5% de la Tabla 6.

En la Figura 30, se puede observar que:

- El valor máximo de C fue el de caudal 8.95 l/s con un C de 38.87, mientras que el menor fue el de 13.74 l/s con un C de 34.75; en promedio los valores de C medidos para una pendiente de 7.5% están en 36.41.
- Para una pendiente del 7.5% se observa un ajuste por parte de los caudales menores, entre los valores de C medidos y C calculados con la ecuación; en promedio, existe una diferencia de 6.56%.
- Se continúa observando en los valores de C calculados con la ecuación una concavidad hacia arriba, esto se debe al gran valor que tiene el coeficiente C para un caudal de 8.95l/s.
- En promedio, los valores de C medidos son un 176% mayores, que los valores de C teóricos.
- A partir del caudal de 13.74l/s, los valores de C medidos, C teóricos y C en un canal sin rugosidad empiezan a subir, sin embargo, los valores de C calculados con la ecuación disminuyen.

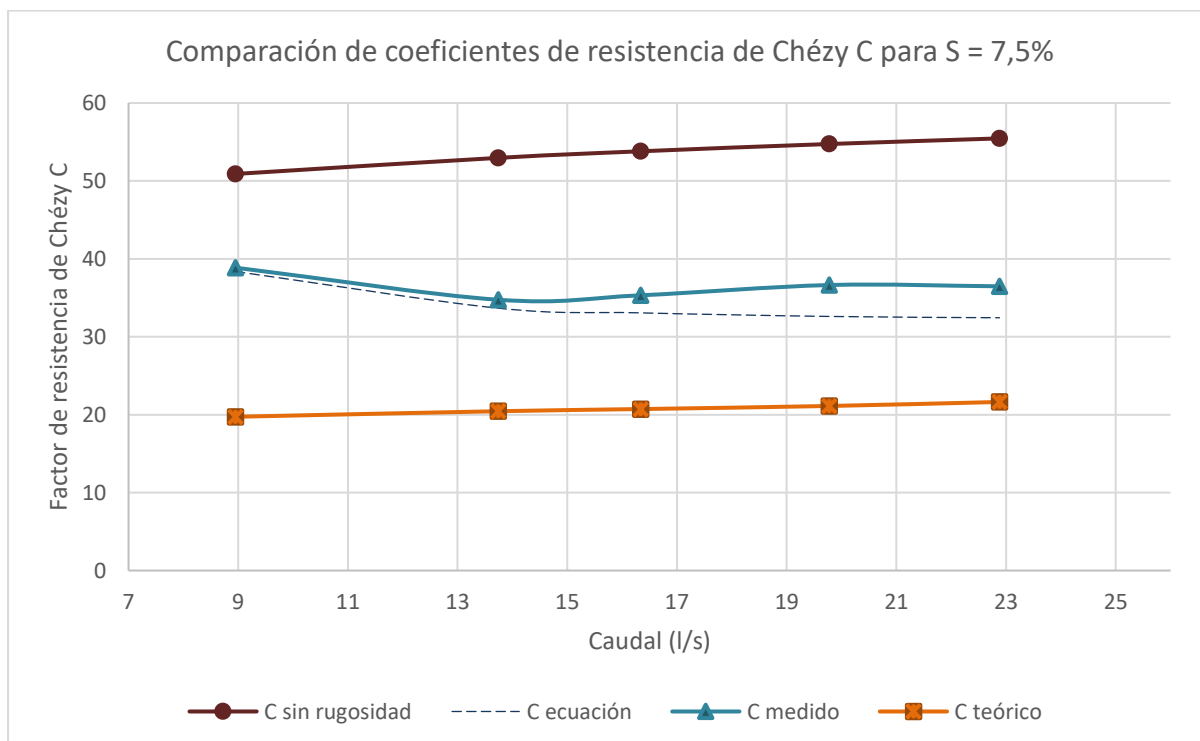


Figura 30. Comparación esquemática entre los coeficientes de Chézy para una pendiente del 7.5%.

6.3 Comparación de velocidades

En la Tabla 7 se muestran las velocidades sin rugosidad artificial (obtenida de la columna 7 de la Tabla 5) y la velocidad con rugosidad artificial calculada mediante el coeficiente de Chézy obtenido con la ecuación de regresión lineal múltiple (Ecuación 6.1). Se detalla también el porcentaje de velocidad reducido a causa de la rugosidad artificial.

Tabla 7. Comparación de velocidades entre la velocidad del flujo sin rugosidad artificial y la velocidad hallada con la Ecuación 6.1 de la regresión múltiple.

Comparación de velocidades						
S (%) (1)	Q (l/s) (2)	v_{sr} (m/s) (3)	R_H (m) (4)	C ecuación (5)	$v_{cr e}$ (m/s) (6)	% reducción (7)
0.5%	8,95	0,73	0,0271	44,79	0,5213	28,58%
	13,74	0,84	0,0342	46,03	0,6019	28,34%
	16,34	0,89	0,0399	48,44	0,6842	23,12%
	20,12	0,95	0,0437	50,64	0,7485	21,21%
	23,33	1,00	0,0457	52,03	0,7865	21,35%
1.5%	8,95	1,04	0,0224	43,68	0,8006	23,02%
	13,74	1,21	0,0298	43,22	0,9138	24,48%
	16,34	1,29	0,0338	44,13	0,9936	22,98%
	20,12	1,38	0,0371	45,33	1,0693	22,51%
	23,33	1,45	0,0416	47,59	1,1887	18,02%
2.5%	8,95	1,23	0,0207	42,52	0,9673	21,36%
	13,74	1,43	0,0268	41,26	1,0680	25,31%
	16,34	1,52	0,0296	41,43	1,1270	25,85%
	20,12	1,63	0,0336	42,30	1,2259	24,79%
	23,33	1,72	0,0360	43,13	1,2939	24,77%
5%	8,95	1,53	0,0171	40,41	1,1816	22,77%
	13,74	1,79	0,0229	37,37	1,2644	29,36%
	16,34	1,90	0,0247	37,00	1,3003	31,56%
	19,78	2,03	0,0289	36,95	1,4044	30,82%
	22,55	2,14	0,0301	37,09	1,4391	32,75%
7.5%	8,95	1,73	0,0147	38,37	1,2741	26,35%
	13,85	2,03	0,0208	33,67	1,3299	34,49%
	16,01	2,16	0,0225	33,07	1,3584	37,11%
	19,78	2,32	0,0246	32,61	1,4007	39,63%
	22,55	2,44	0,0270	32,44	1,4598	40,17%
Promedio						27,23%

En la Tabla 7 se muestra que la velocidad promedio entre todos los valores es de 27.23%.

La ecuación dada por Pikalov para la rugosidad tipo B (Ecuación 3.20) da resultados de velocidades menores. En promedio la reducción de velocidad según la Ecuación 3.20 es del

59.19%, mientras en promedio, la reducción de la velocidad usando la ecuación con regresión lineal es del 27.23%, dando una mayor reducción de velocidad la ecuación de Pikalov.

6.4 Comparación del método de Pikalov y validación

Para poder validar la ecuación obtenida por la regresión lineal (Ecuación 6.1), se realizó una comparación entre los errores obtenidos y los coeficientes de determinación ajustados para el método teórico y la ecuación hallada en función de h/k , b/h y S .

Tabla 8. Tabla comparativa entre el factor de resistencia de Chézy teórico y el obtenido por la Ecuación 6.1.

Tabla comparativa entre el factor de resistencia de Chézy								
Q (l/s) (1)	S (%) (2)	h/k (3)	b/h (4)	C medido (5)	C teórico (6)	% Error C teórico (7)	C ecuación (8)	% Error C ecuación (9)
8,95	0,5%	5,49	5,47	55,35	22,15	59,97	44,786	19,080
13,74		7,07	4,25	55,16	24,25	56,04	46,032	16,554
16,34		8,46	3,55	51,74	26,61	48,58	48,442	6,376
20,12		9,47	3,17	53,35	28,69	46,22	50,639	5,088
23,33		10,05	2,99	57,37	30,08	47,57	52,033	9,308
8,95	1,5%	4,55	6,59	45,66	21,18	53,60	43,676	4,339
13,74		6,06	4,95	41,25	22,85	44,61	43,220	4,775
16,34		6,96	4,31	39,94	24,09	39,68	44,126	10,493
20,12		7,74	3,88	40,39	25,33	37,30	45,330	12,227
23,33		8,89	3,37	39,43	27,46	30,35	47,588	20,692
8,95	2,5%	4,24	7,08	37,99	20,91	44,97	42,520	11,927
13,74		5,42	5,54	38,15	22,08	42,13	41,261	8,143
16,34		6,02	4,98	38,26	22,80	40,41	41,431	8,286
20,12		6,91	4,34	37,84	24,02	36,53	42,297	11,777
23,33		7,48	4,01	38,59	24,90	35,49	43,130	11,756
8,95	5%	4,56	6,57	37,10	20,41	44,98	40,410	8,936
13,74		5,64	5,32	35,84	21,27	40,64	37,368	4,270
16,34		6,01	4,99	37,81	21,63	42,78	37,001	2,127
19,78		6,88	4,36	35,12	22,62	35,59	36,946	5,204
22,55		7,13	4,21	37,10	22,94	38,17	37,095	0,019
8,95	7,5%	3,15	9,51	38,87	19,73	49,24	38,372	1,271
13,85		4,25	7,06	34,75	20,45	41,16	33,671	3,106
16,01		4,57	6,57	35,32	20,72	41,33	33,069	6,380
19,78		4,98	6,02	36,64	21,12	42,36	32,610	11,002
22,55		5,47	5,49	36,48	21,63	40,69	32,441	11,063
Promedio						43.21%		8.57%
Error total						1080.367		214.2

El coeficiente de determinación ajustado obtenido para la ecuación de C (Ecuación 6.1) fue de 0.537, que, según Rojo (2007), se considera como una buena ecuación predictiva.

7 Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo se planteó como objetivos: Determinar las condiciones de flujo en un canal con rugosidad artificial tipo B mediante ensayos de laboratorio. Partiendo de la literatura realizar un análisis de las condiciones de flujo en distintos escenarios y comparar la eficiencia en el desempeño de la rugosidad entre el modelo en laboratorio y la eficiencia descrita por la literatura.

7.1 Conclusiones

La configuración del modelo para evaluar las condiciones de flujo de un canal con rugosidad artificial tipo B, se fundamenta en un modelo físico realizado en laboratorio en un canal abierto de 30cm de ancho, con altura de 45cm y largo de 12m, del cual se usó 2.5m para implementar una base de acrílico con la configuración de la rugosidad artificial tipo B para poder evaluar las condiciones de flujo en el canal.

En el modelo se realizaron 25 ensayos con distintos caudales y pendientes: 5 caudales de 8.95l/s, 13.74l/s, 16.34l/s, 19.78 l/s y 22.88 l/s repartidos en 5 pendientes de 0.5%, 1.5%, 2.5%, 5% y 7.5%. Para cada ensayo se tomaron las medidas del calado y se midió la velocidad del flujo tomando datos de tiempo y distancia cuando el flujo sobre la rugosidad artificial es uniforme.

El diseño de los elementos de rugosidad artificial tipo B corresponde a la configuración dada por Pikalov para la rugosidad tipo B, donde para este trabajo se usó una altura constante de elementos de 1cm ($k=0.01m$). La separación entre elementos fue de 8cm, respetando la relación dada por Pikalov de $8k$ entre elementos. Los elementos de la rugosidad artificial tipo B se implementaron a lo largo de 2.5m para asegurar que se forme un flujo uniforme sobre la rugosidad artificial.

El estudio se analizó siguiendo las pautas dadas por Pikalov en la literatura, y se encontró una ecuación mediante regresión lineal múltiple, en base a los valores del coeficiente de resistencia obtenidos de manera empírica en el laboratorio. Luego, se realizó una comparación entre los valores de C que da la ecuación empírica obtenida para este estudio y los valores de C que da la teoría brindada por Pikalov.

Adicionalmente, se realizó un análisis del método de Aivazian donde se analizan los factores de Darcy proporcionados por la ecuación de Aivazian para rugosidad tipo B y los factores de Darcy obtenidos de manera empírica en el laboratorio.

- ❖ En los ensayos, se pudo notar que el flujo se regula y vuelve uniforme después de 2m desde que el flujo entra en la rugosidad artificial para todos los casos.
- ❖ A medida que la pendiente aumenta, la disipación de energía es mayor; según la pendiente, el calado del flujo sobre la rugosidad artificial con respecto al calado sin rugosidad artificial es:
 - para $S=0.5\%$ el rango de variación del calado está entre el 58% y 41% mayor con rugosidad artificial;
 - para $S=1.5\%$ el rango de variación del calado está entre 93% y 79% mayor con rugosidad artificial;
 - para $S=2.5\%$ el rango de variación del calado está entre 115% y 87% mayor con rugosidad artificial;
 - para $S=5\%$ el rango de variación del calado está entre 132% y 100% mayor con rugosidad artificial;
 - para $S=7.5\%$ el rango de variación del calado está entre 141% y 107% mayor con rugosidad artificial.

Por lo que, entre las pendientes estudiadas, la que genera mayor pérdida de energía es la pendiente de 7.5% con un aumento del calado de 1.23 veces en promedio, del calado sin rugosidad artificial. Mientras que, la que genera menor pérdida de energía es la pendiente de 0.5%, puesto que el calado del flujo sobre la rugosidad artificial aumenta un 0.5 veces en promedio, del calado del flujo en un canal sin rugosidad artificial.

En general, la rugosidad artificial tipo B genera un aumento del calado del 94.49% del calado del flujo en un canal sin rugosidad artificial.

- ❖ La reducción de la velocidad es evidente con la rugosidad tipo B, puesto que el calado del flujo de velocidad aumenta, al tener el caudal constante por flujo uniforme, la velocidad disminuye.
 - Para la pendiente de $S=0.5\%$ la velocidad disminuye conforme disminuye el caudal, entre un 28.58% de reducción (para un caudal 8.95l/s) hasta un 21.21% de reducción (para un caudal de 20.12l/s); en promedio disminuye un 24,52% para $S=0.5\%$.
 - Para la pendiente de $S=1.5\%$ la velocidad disminuye conforme aumenta el caudal: la velocidad se reduce entre un 23.02% (para un caudal de 8.95l/s)

hasta un 18.02% (para un caudal de 23.33l/s); en promedio disminuye un 22.20% para $S=1.5\%$.

- Para la pendiente de $S=2.5\%$ la velocidad disminuye conforme aumenta el caudal: la velocidad se reduce entre un 21.36.% (para un caudal de 8.95l/s) hasta un 24.77% (para un caudal de 23.33l/s); en promedio disminuye un 24.42% para $S=2.5\%$.
- Para la pendiente de $S=5\%$ la velocidad disminuye conforme aumenta el caudal: la velocidad se reduce entre un 22.77% (para un caudal de 8.95l/s) hasta un 32.75% (para un caudal de 23.33l/s); en promedio disminuye un 29.45% para $S=5\%$.
- Para la pendiente de $S=7.5\%$ la velocidad disminuye conforme aumenta el caudal: la velocidad se reduce entre un 26.35% (para un caudal de 8.95l/s) hasta un 40.17% (para un caudal de 23.33l/s); en promedio disminuye un 35.55% para $S=7.5\%$.

El valor promedio de todas las experimentaciones realizadas de velocidad fue de 27.33%, en promedio, menor a la reducción que indica la ecuación de Pikalov, puesto que la reducción según Pikalov fue de 59.19%.

- ❖ En las Figuras 27 – 31, se puede evidenciar una desviación de la ecuación obtenida mediante regresión lineal múltiple para el caudal de 8.95l/s, por lo que, se observa que el método de Pikalov es más efectivo para caudales mayores a 15 l/s.
- ❖ Poniendo como punto de observación el caudal, en este estudio se evidenció que, a medida que el caudal aumenta, el coeficiente de Chézy de la rugosidad tipo B se acerca más al C de un canal sin rugosidad. Esto se debe a que, a mayor caudal, el calado también aumenta para una misma base, por lo que, la altura de la rugosidad se vuelve menos influyente, y, por tanto, el coeficiente de Chézy de la rugosidad se aproxima más al coeficiente de Chézy de la rugosidad tipo B. Este razonamiento se ve demostrado en las Figuras 26 – 28, que para los caudales mayores a 15l/s, el coeficiente de C de la ecuación se acerca más al coeficiente sin rugosidad. Para las Figuras 29 y 30, la ecuación se ve disminuir a partir del caudal de 15l/s, esto puede ser causado por la desviación que generan el caudal de 8.95l/s sobre la ecuación calculada con la regresión lineal múltiple.
- ❖ Así mismo, poniendo como punto de observación la pendiente, se evidenció que, a mayor pendiente, el coeficiente de Chézy disminuye.
 - Para una pendiente de 0.5%, el promedio de los 5 caudales brinda un resultado de C medido=54.59 y C ecuación=48.39.

- Para una pendiente de 7.5%, en promedio se tiene que $C_{\text{medido}}=36.412$ y $C_{\text{ecuación}}=34.05$,

Con lo que se evidencia que, a mayor pendiente, menor coeficiente de Chézy. Esto se debe a que la pendiente marca la pérdida por energía, y la rugosidad artificial es una manera de disipar energía, por lo que la rugosidad tipo B como método de disipación de energía es factible por los resultados brindados de disminución de velocidad y aumento de calado para un mismo caudal.

❖ De manera general, para el coeficiente de Chézy teórico dado por la ecuación de Pikalov se observan los resultados más variantes (considerando los valores teóricos y los valores medidos), obteniéndose valores subestimados para la velocidad en todos los casos:

- Para una pendiente de $S=0.5\%$, el C calculado con la ecuación está entre 1.85 ($Q=20.12\text{l/s}$) y 2.49 ($Q=8.95\text{l/s}$) veces mayor que el C teórico, en promedio para una $S=0.5\%$ es de 2.09 veces mayor el C ecuación que C teórico.
- Para una pendiente de $S=1.5\%$, el C calculado con la ecuación está entre 1.44 ($Q=23.33\text{l/s}$) y 1.82 ($Q=8.95\text{l/s}$) veces mayor que el C teórico, en promedio para una $S=1.5\%$ es de 1.72 veces mayor el C ecuación que C teórico.
- Para una pendiente de $S=2.5\%$, el C calculado con la ecuación está entre 1.54 ($Q=23.33\text{l/s}$) y 1.81 ($Q=8.95\text{l/s}$) veces mayor que el C teórico, en promedio para una $S=2.5\%$ es de 1.67 veces mayor el C ecuación que C teórico.
- Para una pendiente de $S=5\%$, el C calculado con la ecuación está entre 1.47 ($Q=20.12\text{l/s}$) y 1.75 ($Q=8.95\text{l/s}$) veces mayor que el C teórico, en promedio para una $S=5\%$ es de 1.60 veces mayor el C ecuación que C teórico.
- Para una pendiente de $S=7.5\%$, el C calculado con la ecuación está entre 1.69 ($Q=23.33$) y 1.97 ($Q=8.95\text{l/s}$) veces mayor que el C teórico, en promedio para una $S=7.5\%$ es de 1.75 veces mayor el C ecuación que C teórico.

En general, el C medido es el 177% mayor que el C teórico. Con estos resultados se evidencia que los valores teóricos no representan de manera tan precisa las condiciones reales de flujo medidas, adicionalmente se establece que el coeficiente C de la ecuación se aproxima más al C teóricos para caudales mayores, puesto que a medida que el caudal aumenta, la diferencia entre C ecuación y C en el canal sin rugosidad, es menor, y por tanto el valor de C ecuación es también menor, mientras que para los caudales menores (de 8.95l/s y 13.74l/s) la diferencia entre el coeficiente C de la ecuación y C teórico es mayor.

- ❖ En todos los ensayos se generó un resalto hidráulico que denotó una pérdida de energía, al aumentar el calado y consecuentemente, perder velocidad dentro del flujo. El resalto hidráulico variaba en función de la pendiente y caudal: a menor caudal o menor pendiente, el resalto hidráulico se desplazaba aguas arriba; mientras que, a mayor caudal o mayor pendiente, el resalto hidráulico se desplazada aguas abajo.
- ❖ Considerando la sección transversal del canal con rugosidad artificial, la velocidad de flujo es menor en los lados del canal. En contraste con el patrón de flujo dado por Aivazian, el patrón de flujo que se genera para la rugosidad tipo B es similar al patrón generado por la rugosidad tipo A.

8 Referencias

- Aivazian, O. (1996). New investigations and new method of hydraulic calculation of chutes with intensified roughness. *Hydrotechnical Construction*, 30(6), 335-356.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw Hill, 2002.
- Devore, J. L. (2010). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. 7e*. Cengage Learning Editores, S.A. De C.V.
- Flechas, R. (2010). Efecto del uso de la ecuación de Darcy-Weisbach vs la ecuación de Hazen-Williams sobre los costos de diseños optimizados en acueductos, teniendo en cuenta la rugosidad de las tuberías, línea del gradiente hidráulico y temperatura. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- IBM, (2023). Regresión lineal múltiple. Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/docs/es/cognos-analytics/11.1.0?topic=tests-multiple-linear-regression>.
- Illescas J., Zhimnay W., (2022). Obtención de relaciones de diseño de canales con rugosidad artificial (Rugosidad Tipo A) mediante modelo numérico. Universidad de Cuenca, Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Krochin, 1986, S. (1986). *Diseño Hidráulico*. Tercera edición.
- Marco, F. J. (2018). R cuadrado ajustado (Coeficiente de determinación ajustado), 2023. Economipedia. Revisado el 17 de mayo de 2023 obtenido de: <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-ajustado-coeficiente-de-determinacion-ajustado.html>
- ¿Qué es la regresión lineal? - MATLAB & Simulink. (n.d.). MathWorks. Revisado el 17 de mayo del 2023, obtenido de: <https://la.mathworks.com/discovery/linear-regression.html>
- Merchán, P. (2019). Simulación numérica experimental de un canal con un nuevo modelo de rugosidad artificial. Universidad de Cuenca, Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Montaño Arnez, A., y Salazar Jimenez, J. P. (2009). *Texto guía para el curso de obras hidráulicas*.
- Montero Granados. R (2016): Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada. Universidad de Granada. España.

Mostkov. (1954). Manual de Hidráulica. Moscú, Unión Soviética.

Pacheco, E. A., Carrillo V. M. (2018). Coeficiente de resistencia.

Proaño, P. (2013). Bases para el diseño hidráulico de la estructura de entrada, cámara de desarenación y estructuras de limpieza, con caudales entre 20 m³/s Q 2 m³/s para desarenadores en aprovechamientos hidroeléctricos. Tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Quito.

Pikalov, F. I. (1935). Chutes with artificial roughness. Tr. VNIIGiM Sel'khozgiz.

Robinson, A. and Albertson, M. (1952). Artificial roughness standard for open channels. Eos, Transactions American Geophysical Union, 33(6):881–888

Rodríguez, P. (2020). *El error absoluto y el error relativo*. Retrieved May 23, 2023, from <https://www.unprofesor.com/matematicas/que-es-el-error-absoluto-y-el-error-relativo-1176.html>

Rojo, J. M., (2007). Regresión lineal múltiple. Madrid: Instituto de Economía y Geografía.

Saico, V., y Vivar, R. (2019). Evaluación de métodos de diseño para conductos con rugosidad artificial mediante experimentación en modelo físico. Universidad de Cuenca, Cuenca, Azuay, Ecuador.

Vásquez, B. (2022). Obtención de relaciones de diseño de canales con rugosidad artificial (Rugosidad Tipo B) mediante modelo numérico. Universidad de Cuenca, Cuenca, Azuay, Ecuador.

9 Anexos

9.1 Anexo A – Cálculos de los valores de la matriz de la Ecuación 5.8 para la regresión lineal múltiple con las variables explicativas: h/k, b/h y S.

Tabla 9. Cálculos para encontrar los elementos de la matriz de la Ecuación 5.8.

S	Caudal	h/k=x1	b/h=x2	S=x3	x1^2	x1-x2	x1-x3	x2^2	x2-x3	x3^2	Cemp=y	γ-x1	γ-x2	γ-x3
0,005	8,88	6,485	4,62606	0,005	42,0552	30	0,03243	21,40	0,02313	2,5E-05	55,3461	358,92	256,03	0,28
	13,38	8,065	3,71978	0,005	65,04	30,00	0,04	13,84	0,02	0,0000	55,1642	444,90	205,20	0,28
	16,60	9,455	3,17292	0,005	89,40	30,00	0,05	10,07	0,02	0,0000	51,7406	489,21	164,17	0,26
	20,29	10,465	2,8667	0,005	109,52	30,00	0,05	8,22	0,01	0,0000	53,3539	558,35	152,95	0,27
	23,86	11,05	2,71493	0,005	122,10	30,00	0,06	7,37	0,01	0,0000	57,3733	633,97	155,76	0,29
0,015	9,20	5,55	5,40541	0,015	30,8025	30	0,08325	29,22	0,08108	0,00023	45,6566	253,39	246,79	0,68
	13,53	7,06	4,24929	0,015	49,84	30,00	0,11	18,06	0,06	0,0002	41,2497	291,22	175,28	0,62
	16,39	7,96	3,76884	0,015	63,36	30,00	0,12	14,20	0,06	0,0002	39,9354	317,89	150,51	0,60
	19,58	8,74	3,43249	0,015	76,39	30,00	0,13	11,78	0,05	0,0002	40,3913	353,02	138,64	0,61
	23,64	9,89	3,03337	0,015	97,81	30,00	0,15	9,20	0,05	0,0002	39,4291	389,95	119,60	0,59
0,025	8,69	5,235	5,73066	0,025	27,4052	30	0,13088	32,84	0,14327	0,00063	37,9891	198,87	217,70	0,95
	13,42	6,42	4,6729	0,025	41,22	30,00	0,16	21,84	0,12	0,0006	38,154	244,95	178,29	0,95
	16,03	7,02	4,2735	0,025	49,28	30,00	0,18	18,26	0,11	0,0006	38,2609	268,59	163,51	0,96
	19,82	7,91	3,79267	0,025	62,57	30,00	0,20	14,38	0,09	0,0006	37,8401	299,32	143,51	0,95
	22,90	8,48	3,53774	0,025	71,91	30,00	0,21	12,52	0,09	0,0006	38,5929	327,27	136,53	0,96
0,05	8,70	4,5643	6,57275	0,05	20,8328	30	0,22821	43,20	0,32864	0,0025	37,095	169,31	243,82	1,85
	13,66	5,64295	5,31637	0,05	31,84	30,00	0,28	28,26	0,27	0,0025	35,8374	202,23	190,52	1,79
	16,44	6,0075	4,99376	0,05	36,09	30,00	0,30	24,94	0,25	0,0025	37,8054	227,12	188,79	1,89
	20,00	6,87641	4,36274	0,05	47,29	30,00	0,34	19,03	0,22	0,0025	35,1182	241,49	153,21	1,76
	22,65	7,13109	4,20693	0,05	50,85	30,00	0,36	17,70	0,21	0,0025	37,1016	264,57	156,08	1,86
0,075	8,79	4,15481	7,22055	0,075	17,2624	30	0,31161	52,14	0,54154	0,00563	38,8663	161,48	280,64	2,91
	13,85	5,24844	5,71598	0,075	27,55	30,00	0,39	32,67	0,43	0,0056	34,7504	182,39	198,63	2,61
	16,01	5,56638	5,3895	0,075	30,98	30,00	0,42	29,05	0,40	0,0056	35,3222	196,62	190,37	2,65
	19,34	5,98253	5,0146	0,075	35,79	30,00	0,45	25,15	0,38	0,0056	36,6406	219,20	183,74	2,75
	22,55	6,46692	4,63899	0,075	41,82	30,00	0,49	21,52	0,35	0,0056	36,4764	235,89	169,21	2,74
Sumatoria	177,43	112,43	0,85	1339,01	750,00	5,26	536,85	4,31	0,04500	1035,49	7530,12	4559,51	32,04	

9.2 Anexo B – Ondulaciones generadas en la pendiente del 0.5%.

Cuando la pendiente se encontraba en 0.5%, con el caudal de 8.95 l/s, las variaciones del calado fueron considerables debido a las ondulaciones que se generaban. En la Figura 9.1 se muestra las ondulaciones que se generaban en distintos tiempos.



Figura 31. Ondulaciones que se generaban cuando se tenía un S=0.5% y Q=8.95l/s.