

Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica



ISSN 0716-3746 Volumen 35 Número 1 Diciembre 2020

*REVISTA DE LA
SOCIEDAD CHILENA DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA*

SOCHID

*Sede Instituto de Ingenieros de Chile – San Martín 352 – Fono 2 2698 4028 –
Santiago CHILE*

*Revista de la
Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*

ISS 0716-3746

Volumen 35, Número 1, Diciembre 2020

DIRECTORIO

Presidente

José Vargas Baecheler

DIRECTORES

Raúl Demangel Castro

Cristian Escauriaza Mesa

Luis Estellé Aguirre

Francisco Romero

Aldo Tamburrino Tavantzis

Scarlett Vásquez Paulus

DIRECTORES HONORARIOS

Ernesto Brown Fernández

Bonifacio Fernández Larrañaga

Horacio Mery Mery

Humberto Peña Torrealba

Sergio Radrigán Vogel

Eduardo Varas Castellón

Jorge Bravo Soissa

Luis Ayala Riquelme

Ricardo González Valenzuela

EDITOR DE LA REVISTA

Aldo Tamburrino Tavantzis

San Martín 352, Santiago

Fono 2 2698 4028

www.sochid.cl

Imagen portada: Experimentos con macro-rugosidades. Gentileza de Francisco Martínez Carreaux, Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil (LEIC) de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Tabla de Contenidos

- Editorial	5
- Palabras del Presidente	7
- Formas de Fondo en Flujos de Fluidos Tipo Ley de Potencia Constanza Vásquez Díaz	11
- Esguimientos Subcríticos sobre un Tren de Cilindros en un Canal Horizontal Francisco Martínez, Matías Medina y Dayana Parra	23
- La Docencia Experimental de la Hidráulica en Tiempos de Pandemia: Un Caso Particular..... Aldo Tamburrino Tavantzis	41
- Ley de Resistencia en un Canal Rectangular con Macrorugosidades Cilíndricas Jerko Raffo Paniagua	45
- Hidro-Grafía	57

EDITORIAL

Sin lugar a dudas 2020 fue un año completamente inesperado y distinto a lo que hemos vivido. La pandemia de COVID-19 hizo cambiar todos nuestros planes y programas. La mayoría de nosotros debió pasar súbitamente al trabajo online. Sin mayor preparación debimos adaptarnos a una nueva modalidad de trabajo. Aún no está claro el impacto que tendrá la pandemia en nuestro país y en el mundo, pero nadie discute que la forzada digitalización a nivel global tendrá efectos en prácticamente todas las actividades de nuestra vida.

Las restricciones impuestas por la pandemia en las relaciones sociales y desplazamientos llevaron a postergar algunas de las actividades planificadas por la SOCHID y a desarrollar otras de manera remota u online, como lo describe nuestro Director en un artículo de este número.

Tres artículos de investigación se presentan en este ejemplar de la Revista. El primero reporta resultados de un estudio relacionado con las formas de fondo generadas en flujos con superficie libre de fluidos con reología tipo ley de potencia. Los otros dos corresponden a trabajos en flujos subcríticos con macro-rugosidades equiespaciadas. Es interesante que uno de ellos surgió como una tarea de un curso de Hidráulica, el que debido a la cuarentena impuesta por la pandemia no se realizó en un laboratorio sino en el patio de una casa. Por último, en la sección Hidro-Grafía, se responde la pregunta del número anterior y formula una nueva.

Aldo Tamburrino Tavantzis
Editor

PALABRAS DEL PRESIDENTE

Durante este año 2020, toda la humanidad ha estado afectada en una situación sin precedentes en la historia reciente con la pandemia del COVID-19, lo que ha modificado todas nuestras actividades profesionales y familiares. Aun cuando los desplazamientos y reuniones sociales se encuentran limitadas a raíz de la contingencia sanitaria derivada de esta pandemia, desde marzo, el Directorio de SOCHID continuó trabajando, esta vez de manera remota, en todas las actividades y compromisos que se derivan del quehacer de nuestra sociedad.

Ya hay indicios que la vacuna que nos inmunizará al COVID-19 está próxima a aplicarse en los países más desarrollados, por lo tanto esperamos que ya en el primer trimestre del próximo año, estemos en Chile en ese proceso, que nos facilitará avanzar hacia una normalización de nuestras actividades.

Como consecuencia de la pandemia tuvimos una serie de contratiempos que comentamos a continuación:

Durante los días 12 a 15 de mayo de 2020, tendría lugar en Santiago de Chile la octava versión del evento “International Symposium on Hydraulic Structures”, en cuya organización participó activamente SOCHID; este evento es convocado por el Comité Técnico de Estructuras Hidráulicas de la International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), y que tiene lugar cada dos años. Aun cuando, y derivado de la crisis sanitaria mundial, el evento tuvo que ser cancelado, se destaca que se encuentran disponibles en el sitio web del evento, en versión digital, los proceeding del evento original (www.ishs2020.cl). En nombre del Directorio de nuestra sociedad, nuevamente agradezco todo el trabajo y gestiones del Comité Organizador Local, liderado por el Ingeniero Civil, M.Sc., Sr. José Manuel Adriasola. Lamentablemente la cancelación del evento, implicó una merma económica importante en nuestra sociedad derivada de una serie de costos que tuvieron que ser solventados con un año de anterioridad como se hace típicamente en estos eventos internacionales.

El CChIASA (Congreso Chileno de Ingeniería Ambiental en Sistemas Acuáticos) nace de la conveniencia de abordar estos temas en un congreso

científico/profesional conjunto de las sociedades AIDIS Chile (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Capítulo Chileno) y SOCHID. A la fecha se han realizado 2 congresos, en los años 2016 y 2018. Correspondería la realización del tercero este año 2020. Sin embargo, debido a la contingencia producida por el COVID-19, se decidió suspender este evento, y esperamos reanudar la continuidad del mismo a partir del año 2022.

En mayo de este año y viendo el avance de la pandemia se decidió suspender las XVI Jornadas de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, que desde 1990, se desarrollaba cada dos años, los pares, sobre algún tema específico de ingeniería hidráulica y recursos hídricos; esperamos reanudar esta actividad el año 2022

Dada las mismas circunstancias ya descritas, se decidió que el SIOP9 (Noveno Seminario Internacional Ingeniería y Operación Portuaria) se realizará en Valparaíso y actuará como organizador la Empresa Portuaria de Valparaíso y está programado para mediados de 2021, si las circunstancias, así lo permiten

Si bien, todas las expectativas eran muy complejas, como Directorio optamos por seguir adelante con el desarrollo del XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica SOCHID, y hacer charlas telemáticas para nuestros socios y público general sobre temas de interés y actualidad.

Entre las principales actividades de la SOCHID se encuentra la organización de los Congresos Chilenos de la Especialidad, estos se realizan cada dos años en forma ininterrumpida desde 1970 (excepto el III Coloquio, que debió posponerse de 1975 a 1977), en las sedes de diferentes instituciones que han tenido a cargo su organización.

Es así como para los días 13 a 15 de noviembre de 2019, se encontraba programada la realización del XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, el cual era organizado por la Escuela de Ingeniería en Obras Civiles de la Universidad Diego Portales. Sin embargo, debido al contexto social que impera en nuestro país, el evento tuvo que ser postergado y, tentativamente, se esperaba su realización para comienzos de abril del 2020. No obstante, y producto de la crisis sanitaria, tuvo que ser nuevamente suspendido. Finalmente, y tras muchos esfuerzos del equipo organizador, comandado por el profesor Hernán Alcayaga, a quién se le agradece su esfuerzo y resiliencia, durante los días 11 y 12 de noviembre de 2020, tuvo

lugar el XXIV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, el que por primera vez en su historia fue desarrollado completamente en sistema online. Con este cambio de modalidad, se destaca la realización de sesiones de exposiciones en paralelo, lo cual permitió dinamizar la estructura de las presentaciones. Además, y en vista de la reducción de costos que implicaron una rebaja en los costos de inscripción, se observó un aumento en la participación tanto de profesionales como estudiantes interesados en la ingeniería hidráulica. En efecto, se contó con la participación de 286 inscritos, de los cuales 95 correspondieron a profesionales y 191 a estudiantes. Por otro lado, y al igual que en versiones anteriores, el Congreso contó con la participación de autoridades, lideradas por el Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Diego Portales y el Subsecretario de Obras Públicas. Además, tuvieron lugar las charlas magistrales del Profesor Rafael Tinoco, de la Universidad de Illinois Urbana-Champaign, y el Profesor René Garreaud, de la Universidad de Chile y el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia.

Cabe destacar también que, durante el evento se llevó a cabo la entrega de dos premios que consagran tanto la trayectoria profesional como de pregrado ligada a la ingeniería hidráulica, y que se otorgan cada dos años en el marco de los Congresos SOCHID. Así, el Premio Francisco Javier Domínguez, el cual destaca la trayectoria profesional, académica y científica en la ingeniería hidráulica, en su tercera versión, recayó en el destacado ingeniero Sr. Alejandro López Alvarado. Por otro lado, el Premio SOCHID, que destaca al mejor alumno de pregrado en el área de la ingeniería hidráulica fue otorgado al ingeniero Sr. Gonzalo Yáñez Moroni, estudiante de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Respecto a charlas se realizaron tres que a continuación detallamos:

El miércoles 27 de mayo, se realizó la charla Reforma Legal y Gestión de los Recursos Hídricos. Análisis Crítico, del consultor, exdirector de la Dirección General de Aguas y miembro del Directorio del Instituto de Ingenieros de Chile, ingeniero Sr. Humberto Peña, para aportar a un debate informado tanto desde el punto de vista legal como de quienes trabajan en la gestión de estos recursos. Se trató de la primera actividad desarrollada por la SOCHID a través de una plataforma virtual, la cual contó con la asistencia de cerca de 250 personas.

El miércoles 29 de julio, se llevó a cabo la charla Actualización del Balance Hídrico Nacional: ¿Qué nos depara el futuro? de los académicos del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, ingenieros Sra. Ximena Vargas y Sr. Pablo Mendoza. Al encuentro asistieron aproximadamente 280 personas.

El miércoles 4 de noviembre se llevó a cabo el foro Glaciares, Recursos Hídricos y Políticas Públicas, convocado por la SOCHID y el Instituto de Ingenieros de Chile. El evento, contó con la asistencia virtual de unas 120 personas, y con dos presentaciones: la primera estuvo a cargo de los ingenieros Sr. Álvaro Ayala, investigador del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (Ceaza); y Sr. James McPhee, académico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, quienes se refirieron al trabajo titulado “Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin (junio, 2020)”. En la segunda charla, el ingeniero Sr. Jaime Illanes, ex presidente del Instituto de Ingenieros de Chile y presidente de la Comisión de Glaciares de dicha institución; y el ingeniero Sr. Humberto Peña, director del Instituto de Ingenieros de Chile y ex presidente de SOCHID, expusieron los principales análisis y conclusiones del “Informe de Glaciares del Instituto de Ingenieros, (septiembre, 2020)”.

Consideramos necesario destacar que en el año 2021 se cumplirán 50 años de la fundación de nuestra sociedad y del Primer Coloquio Nacional de Ingeniería Hidráulica que se celebró entre los días 30 de Junio y 2 de Julio del año 1971, en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Chile, presidiendo entonces dicha convocatoria el primer socio y Presidente Provisional de SOCHID, el ingeniero Sr. Francisco Javier Domínguez Solar.

Corresponde el XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, que será organizado por la Universidad de Chile, y desde los primeros meses estaremos preparando otras actividades telemáticas. Por lo pronto, desde ya agradecemos el compromiso de cada socio para que, una vez que superemos esta crisis, volvamos a contar con su presencia y participación en las actividades sociales que esperamos prontamente retomar.

José Vargas Baecheler
Presidente SOCHID

FORMAS DE FONDO EN FLUJOS DE FLUIDOS TIPO LEY DE POTENCIA

CONSTANZA VÁSQUEZ DÍAZ

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Actualmente en GHD S.A

constanza.vasquezd@gmail.com

RESUMEN

Se presentan los resultados de un estudio experimental relativo a la generación de formas de fondo que pueden desarrollarse en un lecho granular no-cohesivo debido a la acción de un flujo laminar con superficie libre de fluido no-newtoniano, tipo ley de potencia. La autora no encontró estudios similares en la bibliografía disponibles. Las distintas formas de fondo que se identificaron se sintetizan en un diagrama de fase definido por la velocidad del flujo y el tamaño del sedimento.

Palabras claves: Formas de fondo, régimen laminar, fluido no-newtoniano, rizos, dunas

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La interacción entre un lecho granular no cohesivo y un fluido, bajo ciertas condiciones, puede generar ondas sedimentarias conocidas como formas de fondo. Estas formaciones pueden encontrarse en cauces naturales y artificiales con lechos de arena y en áreas costeras, alterando la geomorfología del terreno.

Al estudiar las formas de fondo, uno de los aspectos de interés es la predicción de las condiciones hidráulicas y sedimentológicas necesarias para su generación.

El objetivo de este trabajo es presentar algunas de las características de las formas de fondo generadas en flujos de fluidos no newtonianos, del tipo adelgazante o *shear thinning* en lechos de material granular no cohesivo y elaborar un diagrama de fase a partir de un trabajo experimental. El fluido utilizado puede caracterizarse como uno del tipo Ostwald de Waele, cuya ley constitutiva para el caso de un flujo bidimensional gradualmente variado está dado por:

$$\tau = K\gamma^n \quad (1)$$

En la relación anterior τ corresponde al esfuerzo de corte, γ es la tasa de deformación angular, K el coeficiente de consistencia y n el índice de flujo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

De acuerdo a Southard (1971), en flujos uniformes de fluidos newtonianos en canales con superficie libre sobre un lecho granular de tamaño uniforme, todos los aspectos del transporte de sedimentos pueden caracterizarse únicamente por siete variables: velocidad media de flujo u , altura media de flujo h , diámetro de la partícula d_s , densidad del fluido ρ , viscosidad del fluido μ , densidad del sedimento ρ_s , y el peso sumergido por unidad de volumen del sedimento $\gamma' = (\rho_s - \rho)g$.

$$\text{Configuración del lecho} = f(\rho, \rho_s, \mu, d_s, u, h, \gamma') \quad (2)$$

Este no es el único conjunto de variables que caracteriza completamente el flujo y el transporte de sedimentos. En particular, se podría sustituir la velocidad media u por el esfuerzo de corte de fondo τ_0 . Esto introduce un elemento de ambigüedad, donde ciertos valores de τ_0 son posibles para más de una configuración del lecho (Brooks 1958; Kennedy & Brooks, 1963). Además, en lechos con grandes formas de fondo, solo una pequeña parte de τ_0 representa directamente la resistencia que aporta la rugosidad del lecho y el resto corresponde al aporte de las formas de fondo (Costello & Southard, 1981).

Como el arrastre de sedimento está correlacionado con la velocidad, y esta última con las formas de fondo, las relaciones que predicen exitosamente la velocidad o el arrastre de sedimento en arroyos aluviales indicarían también la forma de fondo. (Vanoni, 1974)

Si se logra una correlación entre el estado del lecho y una combinación de variables que especifique la naturaleza del flujo, el sedimento y el fluido, se podría predecir el tipo de forma de fondo en el lecho a partir de gráficos y diagramas. Southard y Boguchwal (1990) consideran que u y d_s son las variables más apropiadas para describir un flujo uniforme, dado que por cada combinación de ellos hay un solo estado en términos de la estructura de la velocidad y las condiciones de borde.

Costello & Southard (1981) agrupan las variables de la relación funcional 2, reemplazando el peso específico γ' por g , en cuatro parámetros adimensionales:

$$h \left[\frac{\rho^2 g}{\mu^2} \right]^{1/3}, \quad u \left[\frac{\rho}{\mu g} \right]^{1/3}, \quad d_s \left[\frac{\rho^2 g}{\mu^2} \right]^{1/3}, \quad \left[\frac{\rho_s}{\rho} \right] \quad (3)$$

A partir de 39 experimentos en canales donde se registra la configuración del lecho, la temperatura del fluido, la altura y velocidad media del flujo y el tamaño de las

partículas del sedimento, Southard & Boguchwal (1990) generan un gráfico de tres ejes que clasifica los estados del lecho en seis fases: sin movimiento en lecho plano, rizos, dunas, lecho plano en régimen inferior del flujo, lecho plano en régimen superior del flujo y antidunas. Dado que la altura de flujo es constante en los experimentos y el fluido utilizado es agua en un rango de temperaturas acotado, los términos en paréntesis en el grupo de parámetros adimensionales en (2) son constantes, por lo que es posible visualizar los estados del lecho solamente en términos de la velocidad del flujo y el diámetro de la partícula, como se presenta en la Figura 1, en el que $D_{50,10}$ representa el tamaño D_{50} de la distribución granulométrica con agua a 10°C.

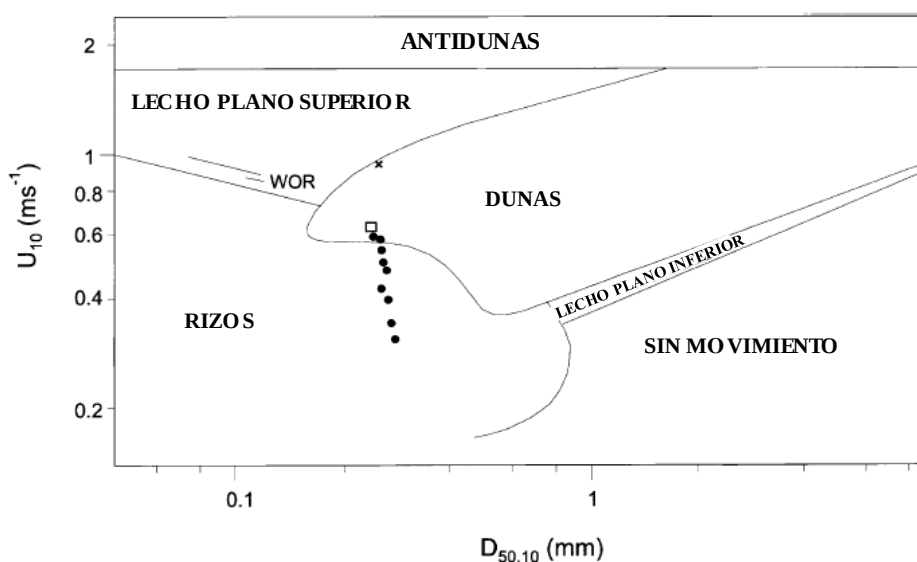


Figura 1. Diagrama de fase de formas de fondo en flujos uniformes y unidireccionales de agua en un gráfico de velocidad - diámetro de la partícula, a 10° C para alturas de flujo de 0,25-0,4 (m) (modificado de Southard & Boguchwal, 1990) . Los símbolos corresponden a los experimentos de Baas (1999).

Baas (1999) examinó la morfología de las formas de fondo en equilibrio en distintas condiciones de flujos uniformes de agua en régimen laminar en canales. Sus resultados indican que los distintos tipos de formas de fondo en equilibrio se componen de: rizos (que en su artículo denomina *current ripples* para diferenciarlos de aquellos generados por olas, *wave ripples*), las que se generaron para velocidades de flujo menores a 0,6 m/s. En sus experimentos identificó dunas con rizos superpuestos para velocidades del escurrimiento de 0,649 m/s y lecho plano en régimen de flujo superior a 0,974 m/s. El límite de velocidad para el desarrollo de dunas de 0,6 m/s coincide con el del diagrama de fase elaborado por Southard & Boguchwal (1990) de la Figura 1. Los experimentos con velocidades menores a 0,6

m/s muestran las siguientes etapas de desarrollo morfológico: (1) rizos incipientes, (2) rizos con un frente de tipo parabólico y recto, (3) rizos de forma linguoide fuera de equilibrio, y (4) rizos de forma linguoide en equilibrio. En la Figura 1 Bass (1999) grafica las etapas mencionadas obtenidas en sus experimentos, donde (•) representa los rizos de forma linguoide, (□) dunas con rizos superpuestos y (x) lecho plano de régimen superior con dunas removidas por el flujo.

Vanoni (1974), al igual que Southard (1971), considera las variables independientes de la relación funcional (2) para explicar el arrastre de sedimentos, agregando la desviación geométrica estándar del tamaño de las partículas σ_g , el ancho del canal b , la viscosidad cinemática del fluido ν en lugar de la viscosidad dinámica μ , la velocidad de sedimentación w y el caudal del flujo Q . En la relación funcional (4) se presentan los parámetros considerados en el análisis dimensional para el gasto sólido de fondo G_s y en forma adimensional en la relación (5).

$$G_s = f(\rho, \rho_s, \nu, d_s, \sigma_g, w, g, u, h, b) \quad (4)$$

$$\frac{G_s}{\rho Q} = \phi \left(Fr, \frac{h}{d_s}, Re_g, \sigma_g, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{w}{u}, \frac{b}{h} \right) \quad (5)$$

Donde $Fr = u/\sqrt{gh}$ es el número de Froude y $Re_g = d_s\sqrt{gd_s}/\nu$. Al despreciar el efecto de la forma de la partícula, la velocidad de sedimentación w se convierte en una función de ρ, ρ_s, ν, d_s y g ; y el término w/u se elimina de la relación funcional (4). También al considerar solo los sedimentos naturales usualmente presentes en cauces ($\rho_s/\rho = 2,65$), despreciar el efecto del ancho del canal y la variación en la distribución del tamaño de las partículas, las variables ρ_s/ρ , b/h y σ_g pueden omitirse, reduciendo la relación (5) a:

$$\frac{G_s}{\rho Q} = \phi \left(Fr, \frac{h}{d_s}, Re_g \right) \quad (6)$$

Blench (1969) muestra que cualquier conjunto de variables que determine el gasto sólido de fondo también define la forma de fondo, las cuales a su vez pueden ser graficadas como una función de $Fr, h/d_s$ y Re_g .

A partir de los adimensionales de la relación (6), Vanoni (1974) elaboró una serie de gráficos donde relaciona el número de Froude con el parámetro h/d_s , para distintos valores de Re_g , los cuales se muestran en la Figura 2. Adicionalmente, elabora un gráfico para ver detalladamente la transición de rizos a dunas, el que depende del número de Shields, de la densidad relativa sumergida del sedimento, $R = (\rho_s - \rho)/\rho$ y del número de Reynolds, Re_g , el que se presenta en la Figura 3. No se incorpora

una dependencia con el número de Froude ya que la transición rizo-duna se genera en régimen subcrítico.

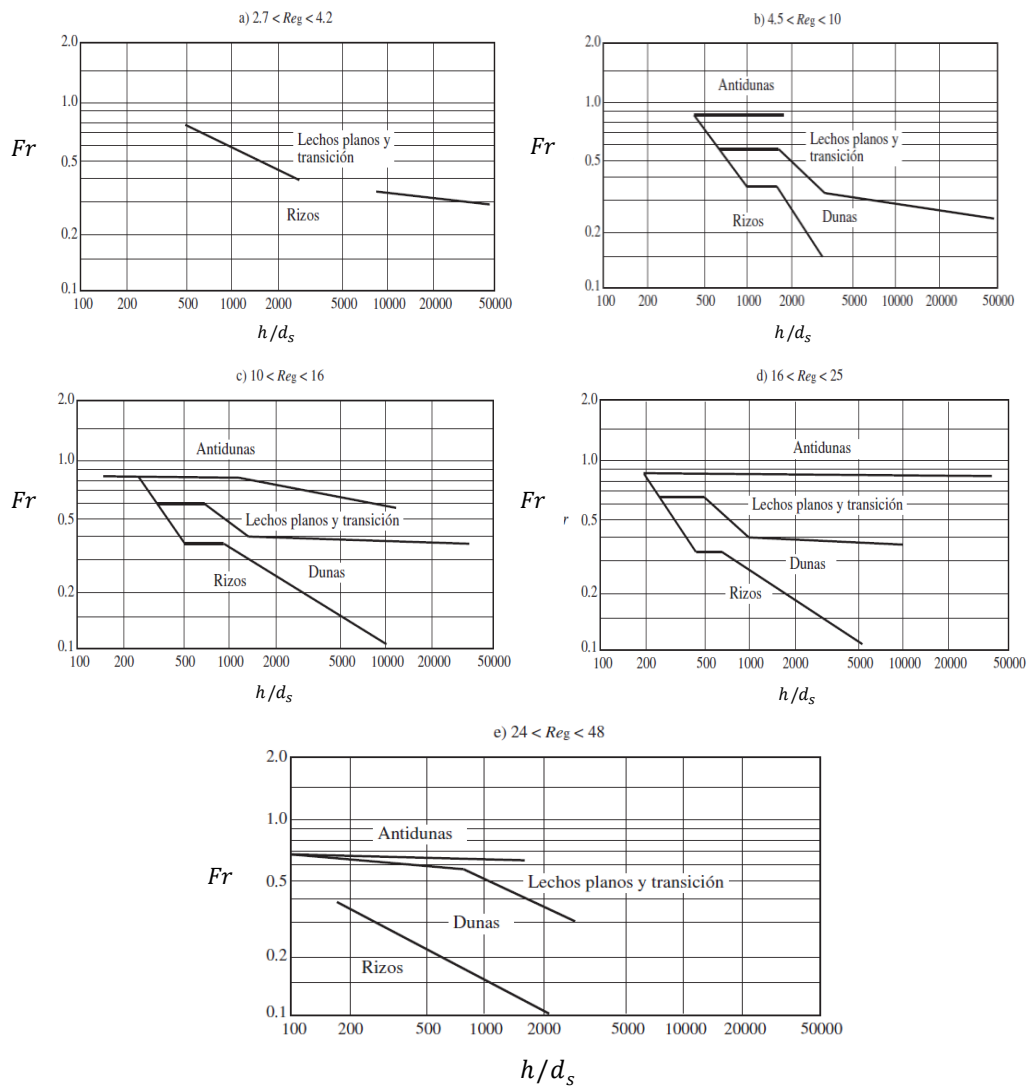


Figura 2. Diagramas de fase elaborados según Vanoni (1974) para la identificación de las distintas formas de fondo, para distintos valores de Reg . Fuente: Niño (2013).

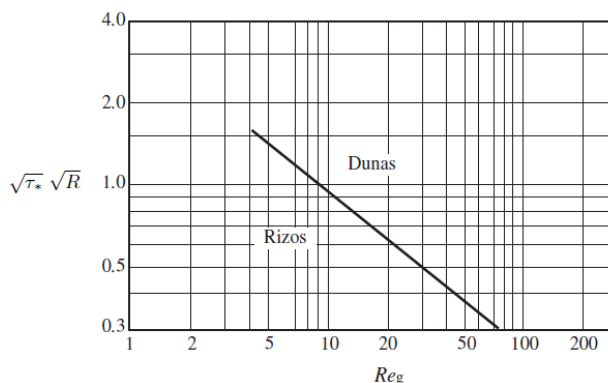


Figura 3. Diagrama de identificación de rizos y dunas elaborada por Vanoni (1974)
Fuente: Niño (2013).

Los diagramas anteriores han sido obtenidos para flujos de agua, no encontrando la autora sus equivalentes para flujos de fluidos no newtonianos, razón del presente estudio.

3. MONTAJE EXPERIMENTAL

Para este estudio se utilizó un canal de acrílico, de sección transversal rectangular de 360 centímetros de largo, 14 cm de alto y ancho modificable de 11,5 y 20 cm, con pendiente i variable. Desde su extremo de aguas arriba recibe un caudal Q , que es recirculado en un circuito cerrado gracias a la acción una bomba centrífuga. El lecho granular es contenido dentro del canal por dos gradas triangulares de 3 centímetros de altura, colocadas cerca de ambos extremos del canal. Para los experimentos se utilizaron muestras de arena y microesferas de vidrio de marca Ballotini y Lorenzini, tamizadas para generar cinco lechos con diámetro característico uniforme de gravedad específica $\rho_s/\rho=2,65$ ($d_s = 0,098$; $0,151$; $0,183$; $0,265$; $0,325$ mm).

Las formas de fondo generadas se registran al centro del canal mediante una cámara fotográfica Canon EOS REBEL T3i y dos láseres CivilLaser de potencia ajustable (máxima 300 mW). La cámara es colocada encima del canal con su eje de colimación inclinado respecto a la horizontal. Los láseres se colocan en posición perpendicular al fondo, separados a 1 cm de distancia en promedio, emitiendo dos rayos perpendiculares a la dirección del flujo, los que generan dos planos de iluminación al pasar por lentes cilíndricos. En la Figura 4 se presenta un esquema de la instalación experimental donde se observa la disposición de la cámara y los láseres.

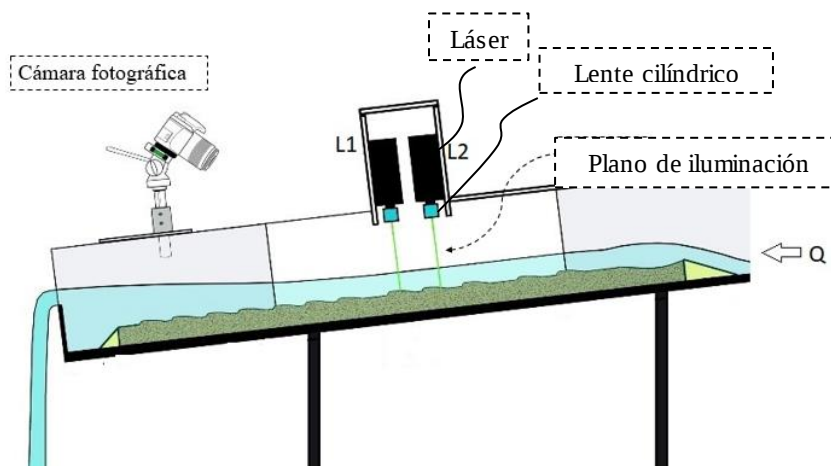


Figura 4: Esquema del montaje experimental.

Al establecer las condiciones hidráulicas de pendiente, caudal y reología del fluido que generan arrastre de fondo generalizado, se inicia el registro fotográfico cuando una forma de fondo se encuentra aproximadamente a un centímetro del láser de aguas arriba. El registro dura entre una y tres horas, tomando fotografías del lecho cada cinco segundos. Los planos de iluminación de los láseres al intersectar el lecho plano generan una proyección en dos líneas rectas de iluminación. Luego, la presencia de formas de fondo distorsiona las líneas proyectadas, marcando su contorno. La altura del lecho en el perfil transversal se extrae de las deformaciones capturadas con la cámara a través de un procesamiento digital de imágenes. Detalles de la metodología utilizada para cuantificar la deformación del lecho y características geométricas de las formas de fondo se presentan en Traslaviña et al. (2018).

Las condiciones experimentales se presentan en la Tabla 1, donde i es la pendiente del lecho y $\bar{h}$ la altura media del flujo. El criterio utilizado para definir el régimen del flujo corresponde al definido por Haldenwang et al. (2010).

Tabla 1. Condiciones experimentales.

PARÁMETRO	$d_s = 0,098$ [mm]	$d_s = 0,151$ [mm]	$d_s = 0,186$ [mm]	$d_s = 0,265$ [mm]	$d_s = 0,325$ [mm]
Q [l/s]	0,75-1,13	0,71-1,19	0,62-1,84	1,03-1,24	0,60-2,13
i	0,96-2,47	0,75-2,64	1,54-2,64	2,02-2,65	1,68-2,91
K [Pa · s ⁿ]	0,033-0,041	0,025-0,044	0,039-0,068	0,091-0,232	0,041-0,105
n	0,769-0,804	0,761-0,917	0,757-0,844	0,629-0,707	0,734-0,802
$\bar{h}$ [cm]	1,66-2,64	1,71-2,32	1,16-3,33	1,44-3,00	1,28-2,25
u [m/s]	0,27-0,4	0,36-0,45	0,29-0,67	0,18-0,36	0,36-0,59
Fr	0,49-0,91	0,91-0,96	0,66-1,68	0,36-1,11	0,98-1,32
Re	1031-1678	1071-1864	782-2059	204-622	475-1833
RÉGIMEN	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar	Laminar
τ_*	0,38-2,30	0,45-2,40	0,25-1,76	0,27-0,71	0,27-1,05
Re_g	0,18-0,19	0,33-0,37	0,21-0,54	0,16-0,49	0,48-1,01
MATERIAL LECHO	Microesferas de vidrio	Microesferas de vidrio	Arena	Microesferas de vidrio	Arena

4. RESULTADOS

En la mayoría de los experimentos, la morfología de las formas de fondo obtenidas se asemeja a lenguas que se extienden en el ancho completo del canal, con su máximo localizado al centro, como puede observarse en la Figura 5. Sin embargo, en algunos experimentos se presentan otros tipos de formas de fondo. Entre ellas, barras localizadas en los costados del canal, barras dobles con una geometría con un máximo localizado en la cercanía de cada pared, barras triples con un máximo extra al centro del canal y barras tipo transversales, ocupando el ancho total del canal.

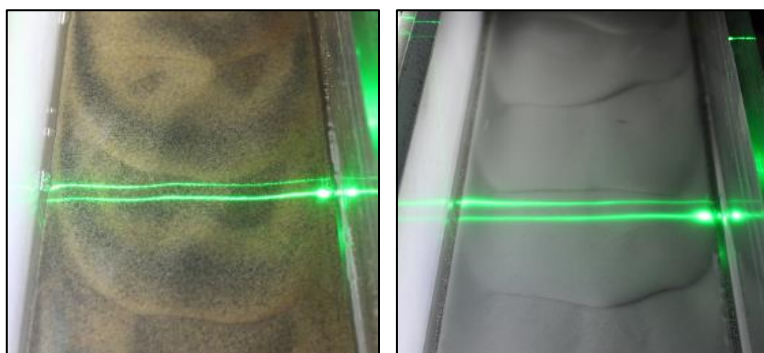


Figura 5: Formas de fondo obtenida en lecho inicialmente plano. a) Lecho de arena $d_s = 0,325$ mm, $Re = 1178$ (flujo laminar) b) Lecho de microesferas de vidrio. $d_{50} = 0,151$ mm, $Re = 1654$ (flujo laminar).

En la Figura 6 se muestran los diferentes tipos de barras antes mencionados. En otros casos se presentan rizos difíciles de identificar, pero que al observar el movimiento vertical de las líneas de iluminación láser sobre el fondo y descartar la presencia de ondulaciones en la superficie libre, es posible establecer su presencia.

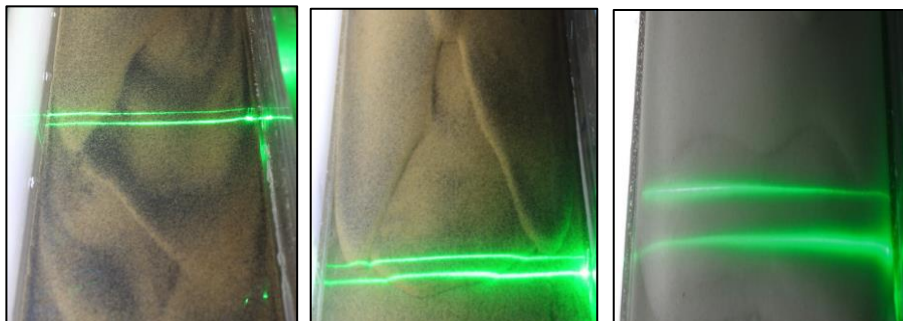


Figura 6. Tipos de barras presenciadas en los experimentos. a) Barras laterales. b) Barras dobles. c) Barras triples.

En este estudio se categorizan las formas de fondo observadas en cuatro grupos:

- Dunas centrales: Son todas aquellas formas de fondo con forma de lengua que se extienden desde ambos extremos del canal con su máximo al centro.
- Barras laterales: Son las formas de fondo que se encuentren junto a alguna pared con una geometría que presenta su máximo en el centro de alguna mitad del canal.
- Barras dobles y/o triples: Son aquellas que presenten dos máximos o tres, respectivamente, a la misma posición transversal en el canal.
- Rizos: Son formas de fondo poco claras que son identificables solo por el movimiento vertical de las líneas de iluminación sobre el fondo.

En función de estas categorías, se identifican los rangos de velocidad media en los que aparecen según el diámetro de la partícula del lecho. En analogía al diagrama de Southard & Boguchwal (1990), en la Figura 7 se presenta un diagrama de fase indicando los tipos de formas de fondo presenciados en el estudio, donde la superposición de las áreas indica que pueden presentarse más de un tipo de forma de fondo para esas condiciones experimentales. El área de color blanco corresponde a zonas sin datos experimentales.

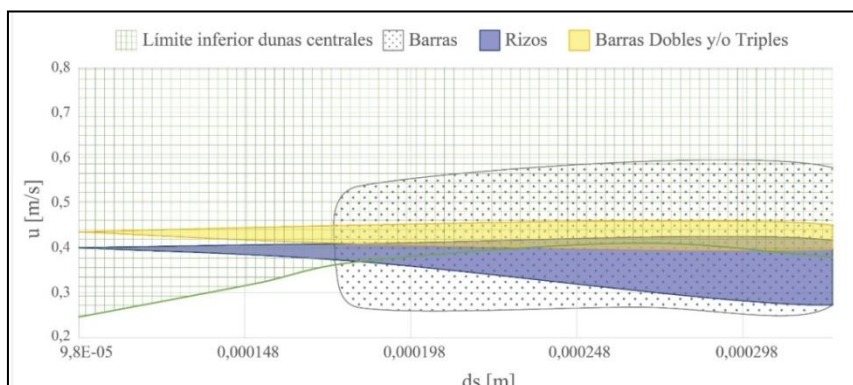


Figura 7. Diagrama de fase de formas de fondo presenciadas en los experimentos.

Comparando esta figura con los resultados obtenidos por Southard & Boguchwal (1990) en la Figura 1, en ambos se observa presencia de dunas en un rango de diámetros de la partícula entre 0,2 y 0,3 mm y velocidad media de flujo entre 0,35 y 0,8. Por otra parte, al observar la Figura 8, las dunas tipo linguoide presenciadas por Baas (1999) tienen características geométricas similares a las formas de fondo identificadas como barras en este estudio. Se nota de la Figura 1 que las condiciones para las que se generan las dunas tipo linguoide, corresponde a lechos de diámetro 0,2 mm y velocidades medias de flujo de 0,3 m/s a 0,6 m/s, lo que coincide con el área demarcada en la Figura 7 que representa la aparición de barras.

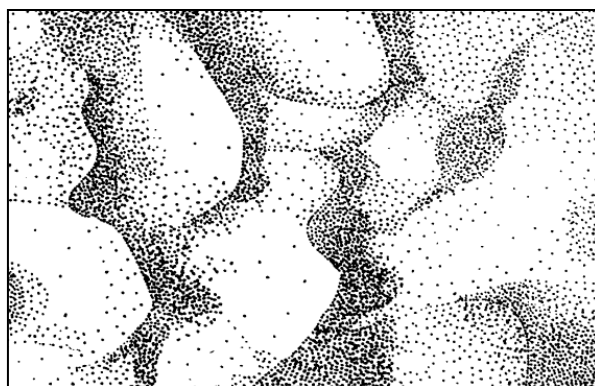


Figura 8. Dunas tipo linguoide identificadas por Bass (1999) en experimentos sobre lechos de arena de diámetro de partícula igual a 0.238 mm.

En este estudio, el parámetro adimensional Re_g , definido por Vanoni (1974) en el que se utiliza una viscosidad efectiva dada por $\mu_{eff} = K(2u/R_H)^{n-1}$, se encuentra en el rango entre 0,2 y 1,7; lo que es menor a los rangos identificados por Vanoni. Esto se debe a la alta viscosidad de los fluidos no newtonianos utilizados en el presente estudio.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se presentan los resultados de un estudio experimental de las formas de fondo que se generan en un lecho granular no-cohesivo en un flujo con superficie libre de un fluido tipo ley de potencia. Todos los escurrimientos se desarrollaron en régimen laminar, con números de Froude en el rango 0,36 – 1,32. Se identificaron cuatro tipos de formas de fondo, que en este estudio se denominaron rizos, dunas centrales, barras laterales y barras dobles y/o triples, similares a las que han sido observadas que se generan para flujos de agua. El tipo de forma de fondo susceptible de generarse en un determinado flujo se sintetiza en un diagrama de fase definido por la velocidad del flujo y el tamaño de sedimento. Como trabajo futuro se propine extender la base de datos y presentar el diagrama de fase en términos de parámetros adimensionales.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece el financiamiento otorgado por el proyecyo Fondecyt 1161751.

REFERENCIAS

- Baas, J. H. (1999) “An empirical model for the development and equilibrium morphology of current ripples in fine sand”. *Sedimentology* 46, 1 , 123–138.
- Blench, T. (1969) “Coordination in Mobile-Bed Hydraulics”. *J. Hyd. Div., ASCE*, Vol. 95, No. HY6, Proc. Paper 6884, Nov., 1969, pp. 1871-1898.
- Brooks, N. H., 1958. *Mechanics of streams with movable beds of fine sands*: Am. Soc. Civil Eng. Trans., Vol. 123, p. 526-549.
- Costello, W. R., & Southard, J. B. (1981). “Flume experiments on lower-flow-regime bed forms in coarse sand”. *J. Sedimentary Res.*, Vol. 51, No. 3, pp. 849-864.
- Haldenwang, R., Slatter, P., and Chhabra, R. (2010) “An experimental study of non-newtonian fluid flow in rectangular flumes in laminar, transition and turbulent flow regimes”. *J. South African Inst. Civil Eng.*, Vol. 52, No. 1, pp. 11-19.
- Kennedy, J. F., and Brooks, N. H. (1963) “Laboratory study of an alluvial stream at constant discharge”, US. Dept. Agric., Agric. Res. Service, Misc. Publ. 970, Proc. Federal Inter-Agency Sedimentation Conf., p. 320-330.
- Southard, J. B. (1971) “Representation of bed configurations in depth-velocity-size diagrams”, *Jour. Sed. Petrology*, Vol. 41, pp. 903-915.
- Southard, J. B., and Boguchwal, L. A. (1990). “Bed configuration in steady unidirectional water flows; Part 2, Synthesis of flume data”. *J. Sedimentary Res.*, Vol. 60, No. 5, pp. 658-679.
- Traslaviña, C., Varas, R., Vásquez, C., Tamburrino, A. (2018) “Estudio experimental de formas de fondo generadas por fluidos pseudoplásticos en

- canales”, XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina. Septiembre, 18-21. Trabajos Completos, pp. 438-448.
- Vanoni, V. A. (1974) “Factors determining bed forms of alluvial streams”. J. Hydr. Div., Vol 100, No. HY3, pp. 363-377.
- Vásquez, C. F. (2020). *Caracterización de las formas de fondo generadas en un lecho granular por el flujo de un fluido pseudoplástico en canales*. Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

ACERCA DE LA AUTORA

Constanza Vásquez es Ingeniera Civil Hidráulica de la Universidad de Chile, habiéndose titulado en junio de 2020. Durante sus estudios fue ayudante de los cursos de Mecánica de Fluidos e Hidráulica y ayudante de investigación en flujos de fluidos no newtonianos en el Laboratorio de Hidráulica Francisco Javier Domínguez de la Universidad de Chile, formando parte del grupo autodenominado “los pseudoplásticos”. Ha presentado sus trabajos en el Congreso Latinoamericano de Hidráulica en Buenos Aires y en el Congreso Mundial de Hidráulica en Panamá. Actualmente la ingeniera Vásquez se desempeña en GHD S.A.

ESCURRIMIENTOS SUBCRÍTICOS SOBRE UN TREN DE CILINDROS EN UN CANAL HORIZONTAL

FRANCISCO MARTÍNEZ ^{1,*}, MATÍAS MEDINA ^{1,†} Y DAYANA
PARRA ^{1,††}

¹ Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso,
Chile

* francisco.martinez@pucv.cl, [†] matiasmedina.ib@gmail.com, ^{††}
dayanna.p.t@gmail.com

(*) Autor de correspondencia.

RESUMEN

En el presente estudio se reportan mediciones del perfil hidráulico, la deformación de superficie libre y el factor de fricción para escurrimientos subcríticos, turbulentos y permanentes que atraviesan un tren de semi-cilindros colocados transversalmente a la corriente, en un canal rectangular de pendiente horizontal. Los cilindros se separan entre sí tal que la relación $\xi = D/e$ se mantiene constante en todo el estudio, donde D es el diámetro de los cilindros y e la distancia de separación. Se determina que la amplitud relativa de la deformación superficial ($\bar{\eta}/a$), depende tanto del número de Reynolds, como del número de Froude medio del flujo, donde a es el radio de los cilindros. Sorpresivamente, la longitud de onda de estas deformaciones es constante. Finalmente, el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach sigue una relación del tipo $f \propto Re^{-\beta}$, donde β depende de la turbulencia del flujo y de las asperezas, siguiendo una estructura muy similar a la reportada en el estudio pionero de Bazin de 1865. Se encuentra también que f decae logarítmicamente con $\bar{h}/a$ y muestra un decaimiento de tipo potencial respecto de $\bar{\eta}/a$, con un coeficiente de potencia fraccionario cercano a -4/5.

Palabras clave: macrorugosidad, factor de fricción, deformación superficial, resistencia al flujo

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Fricción en lechos macrorugosos de tipo fractal

La interacción de flujos con lechos cuyas asperezas siguen un patrón de distribución de tipo autosimilar, autoafín o fractal es un fenómeno que posee implicancias en varios problemas de geomorfología e ingeniería civil. Los flujos derivados de inundaciones de ríos y el paso de corrientes atmosféricas a través zonas urbanas o del propio relieve terrestre, son algunos ejemplos de interacciones hidro/aerodinámicas de esta naturaleza. Aunque sin proponérselo, Bazin (1865) fue uno de los primeros en abordar estas interacciones interesado en determinar las propiedades de resistencia hidrodinámica de escurrimientos subcríticos y uniformes generados en un gran canal de pendiente i . Adosando al fondo del canal listones transversales de altura k y equiespaciados una distancia e , Bazin determinó que el coeficiente de fricción f varía con el número de Reynolds Re siguiendo la relación (Chow, 1954):

$$f \simeq \frac{K}{Re^\beta} \quad (1)$$

Donde $Re = uR/\nu$, $u = Q/A$ es la velocidad media de la sección de escurrimiento de área A , R es el radio hidráulico y ν es la viscosidad cinemática del fluido. El factor de fricción estimado según la fórmula de Darcy-Weisbach, $f = 8gR J_f / u^2$, donde J_f representa la pendiente de la línea de energía ($= i$, la pendiente del canal, en régimen uniforme), K es una constante variable entre 0.86 y 1.36 según el espaciamiento de los listones y β un exponente que varía entre 0.23 y 0.28. En los experimentos de Bazin, el número de Reynolds varió entre 10^4 y 10^5 asegurando un flujo turbulento plenamente desarrollado, debido a la gran extensión del canal. Actualmente se reconocen estos experimentos como estudios en lechos de rugosidad tipo k y sobre ellos Chow (1954) describe tres tipos de comportamientos, dependiendo del espaciamiento e , los que se esquematizan en la Figura 1. El autor describe los flujos de tipo (1) como aquellos de rugosidad aislada, cuando las asperezas están muy apartadas una de la otra de forma que la estela de los vórtices no interfiere con la de las rugosidades subsecuentes. Los flujos de tipo (2) con interferencia de remolinos, cuando los elementos de rugosidad se colocan tal que las estelas de vórtices comienzan a interferir con las desarrolladas por las rugosidades posteriores y los de tipo (3) o de flujo cuasi-liso, cuando los elementos de rugosidad se colocan muy cerca

entre sí tal que el flujo prácticamente desliza por sobre la cresta de los elementos. Chow distingue los casos (1) y (2) como los de mayor incidencia tanto sobre la fricción hidrodinámica, como las ondulaciones que aparecen en la superficie del escurrimiento.

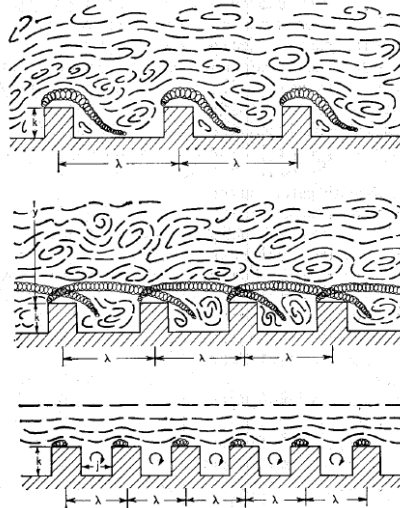


Figura 1. Regímenes de escurrimiento reportado por Chow (1954) en función de la relación de aspecto λ/k , donde λ es el espaciamiento interior entre obstáculos de altura k .

Estudiando flujos atmosféricos en zonas urbanas (*urban canopy*), Oke (1988) precisa los criterios tras estos regímenes reconociendo el caso (1) cuando $e/k > 2$, el caso (2) para $e/k \approx 1$ y el escenario (3) para $e/k < 1/2$. En este contexto, Lawrence (2000) experimentó con escurrimientos sobre lechos formados por semi-esferas equi-espaciadas de diámetro d , encontrando una fuerte dependencia entre f y la razón de aspecto $\Lambda = h/k$, donde h es la altura del escurrimiento uniforme. El autor identificó el régimen de inundación parcial ($\Lambda < 1$) donde $f = \frac{8}{\pi} P C_D \min \left(\Lambda, \frac{\pi}{4} \right)$ con P el perímetro mojado y C_D el coeficiente de arrastre de las asperezas; un régimen de inundación marginal ($\Lambda \sim 1$) donde $f \approx 10\Lambda^{-2}$ y finalmente, un régimen bien inundado ($\Lambda \gg 1$) que sigue una estructura similar a la ley de Nikuradse (1933), esto es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \approx 1.22 + 0.883 \ln \Lambda \quad (2)$$

Finalmente, Stewart et al. (2018) experimentó con escurrimientos en un canal cuyas asperezas poseen tamaños que siguen una distribución espectral de carácter auto-afín, de exponente β . De acuerdo con el autor, el coeficiente de fricción para este escenario puede ser caracterizado por una ley de potencia del tipo:

$$\left(\frac{8}{f}\right)^{1/2} = C_\beta \left(\frac{h}{\Delta}\right)^{m_\beta} \quad (3)$$

Donde Δ es una escala característica de las asperezas del lecho, h la altura normal de escurrimiento y C_β y m_β coeficientes de ajuste calibrados para cada experimento, que dependen del exponente espectral. De acuerdo con Stewart et al. el coeficiente de fricción decrece para valores crecientes de la profundidad relativa h/Δ y viceversa. Los estudios de Lawrence, Stewart et al, junto al pionero esfuerzo de Bazin, muestran que los efectos de la aspereza por sí solos no son los más significativos, sino que la aspereza relativa h/k puede jugar un rol aún más importante. Finalmente, si observamos la estructura del coeficiente de fricción reportado por Lawrence (1997, 2000) para un régimen de inundación marginal ($h \sim k$), o los propios resultados de Stewart y Bazin obtenidos en función del número de Reynolds, veremos que todos ellos pueden ser representados por funciones matemáticas tipo ley de potencia lo que podría ser interpretado, a priori, como un signo de la naturaleza autoafín/autosimilar de la distribución de asperezas sobre el lecho. En este contexto, el presente estudio experimental tiene por objeto explorar los efectos de rugosidad sobre la dinámica de un flujo subcrítico que atraviesa un tren de obstáculos semicilíndricos cuya distribución sigue un patrón autosimilar, colocados sobre el fondo de un canal de pendiente horizontal.

1.2 Breve análisis dimensional

Mediante herramientas de análisis dimensional podemos plantear relaciones de escala para predecir la dependencia funcional entre la deformación de la superficie libre en un flujo que escurre por un canal de pendiente horizontal ($i = 0$), respecto de otras variables hidráulicas que intervienen en el escurrimiento. Sea entonces $\tilde{\eta}$ una escala característica de estas deformaciones, podemos plantear la siguiente relación funcional:

$$\psi(\tilde{\eta}, \tilde{V}, \tilde{h}, \tilde{k}, \tilde{\lambda}, \rho, g, \mu) = C \quad (4)$$

Donde C es una constante, ρ la densidad del fluido y μ su viscosidad. $\tilde{V}$, $\tilde{h}$, $\tilde{\lambda}$ y $\tilde{k}$ denotan escalas características asociadas a la velocidad del flujo, la profundidad de escurrimiento, la longitud de onda superficial y el tamaño de las asperezas medias del lecho, respectivamente. La elección de estas escalas se detalla en la sección 3.1. Del teorema de Vaschy-Buckingham se infiere la participación de al menos cinco parámetros adimensionales en el fenómeno, a saber: el número de Froude $\mathcal{Fr} = \tilde{V}/\sqrt{g\tilde{h}}$, el número de Reynolds $Re = \rho\tilde{V}\tilde{h}/\mu$ y las relaciones de aspecto $\tilde{\eta}/\tilde{k}$, $\tilde{\lambda}/\tilde{k}$ y $\tilde{h}/\tilde{k}$, asociadas a las escalas relativas de deformación, longitud de onda y profundidad del escurrimiento, respectivamente. Un análisis similar puede conducirse para determinar la dependencia funcional respecto de la longitud media de onda $\tilde{\lambda}$, originada en las deformaciones de superficie ya señaladas. Aquí naturalmente surge el parámetro adimensional $\tilde{\lambda}/\tilde{k}$ que denota la longitud de onda relativa y que se relaciona con los parámetros anteriores a partir de la relación funcional:

$$\frac{\tilde{\eta}}{\tilde{k}}, \frac{\tilde{\lambda}}{\tilde{k}} = \varphi\left(\frac{\tilde{h}}{\tilde{k}}, Re, \mathcal{Fr}\right) \quad (5)$$

Donde φ es otra función cuya estructura se determina experimentalmente.

1.3 Energía y factor de fricción del escurrimiento

En condiciones de escurrimiento uniforme y también cuasi-uniforme en un canal abierto, se acepta la fórmula de Darcy-Weisbach como herramienta para estimar el factor de fricción hidrodinámico (Chow, 1954):

$$f = \frac{8gR J_f}{V^2} \quad (6)$$

Donde R , V y J_f corresponden a los valores medios del radio hidráulico, la velocidad y el coeficiente unitario de pérdida de energía, todos medidos en un tramo de largo L del escurrimiento donde se satisfagan las condiciones de flujo gradualmente variado. Por otra parte, el coeficiente unitario de pérdida de energía $J_f = -\overline{dE}/\overline{dx}$ se estima como la pendiente media de la línea de energía en el mismo tramo anterior. La función de energía específica $E(x)$ del flujo se calcula también para cada sección de medición. Para un flujo turbulento esta función se aproxima por la ecuación siguiente:

$$E(x) \approx h(x) + \frac{u(x)^2}{2g} \quad (7)$$

Donde $u(x) \approx Q/Wh(x)$ y $h(x)$ corresponden a la velocidad y profundidad media del escurrimiento en cada sección de monitoreo, respectivamente.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los experimentos fueron conducidos en el canal hidráulico del Laboratorio de la Escuela de Ingeniería Civil (LEIC) de la PUCV. Este canal posee 10 m de longitud, de sección rectangular de ancho interior $W = 0.358$ m y pendiente nula ($i = 0$). El canal posee paredes transparentes que permiten visualizar el flujo desde ambos costados y el caudal (Q) es un parámetro ajustable desde un panel de control automático ubicado a un lado del canal. El rango de Q varió entre 3.51 hasta 14.4 L/s, asegurando que los obstáculos operasen siempre en condición de total sumergencia. Estos obstáculos corresponden a semicilindros de diámetro $D = 2a$, variable en el rango 25 mm a 100 mm, donde a es el radio de los cilindros. Estos obstáculos son hechos en *plumavit* y fueron recubiertos por una pintura impermeabilizante que impide su deformación al estar en contacto con el agua. Los cilindros poseen un ancho ligeramente inferior al del canal asegurando, por un lado, su colocación en el fondo y por otra parte, que el escurrimiento solo se tiene por encima de ellos.



Figura 2. Vista superior del canal hidráulico ubicado en el LEIC. En la figura se pueden observar los obstáculos uniformemente distribuidos, como también el equipo computacional de registro a un costado del canal.

La medición de la profundidad en cada sección se realizó con un sensor ultrasonido marca MICROSONIC, modelo PICO+100/I, 120-1000. Esta variable se midió en alrededor de 80 posiciones fijas del canal, equiespaciadas una distancia de aproximadamente 60 mm. La transmisión de datos al computador se realiza mediante un sistema de adquisición basada en arduinos que permite el registro de esta variable a una frecuencia cercana a 100 Hz. Con ello se obtiene una serie temporal de datos para cada posición x a lo largo del canal. De dicha serie se obtiene un valor medio temporal que denotaremos por $h(x)$. Los cilindros, a su vez, se encuentran separados una distancia e medida centro a centro de cada objeto definiendo así la relación de aspecto $\xi = D/e \approx 0.138$, mantenida constante en toda la campaña experimental. De igual modo, se realizan registros filmicos de cada experimento desde un costado del canal, para visualizar la deformación de la superficie libre. La condición de borde en el extremo de aguas abajo del canal corresponde a una caída libre del flujo.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Deformación de la superficie libre

Tal como indica Chow (1954), la superficie libre del escurrimiento responde generando un patrón de deformación de carácter estacionario, cuya amplitud depende del espaciamiento, tamaño de los cilindros y el caudal circulante por el canal. Estos efectos se muestran en la Figura 3 obtenidas para los cilindros de diámetros $D=25$ y 50 mm. En el caso de la Figura 3a y 3d, notamos que esta deformación no es idénticamente nula, pero es levemente perceptible lo que realza la importancia de la medición de la superficie libre mediante equipamiento de precisión ultrasónico. A medida que aumentamos el caudal, se incrementa la altura de escurrimiento y con ello un incremento en la magnitud de la deformación (ver Figuras 3b y 3e). Esta situación se vuelve más patente en las Figuras 3c y 3f, obtenidos para el máximo caudal del sistema (14.4L/s). Como consecuencia del carácter subcrítico del flujo, las deformaciones máximas de la superficie no ocurren sobre la cresta de los cilindros, sino en un punto ubicado aguas abajo de ellos. Es de interés notar también que la deformación de la superficie tiende, en general, a ser bastante localizada en torno a cada obstáculo, luego de lo cual la superficie libre tiende a recuperar una condición de no perturbación, es decir, como si no existiesen obstáculos en el fondo.

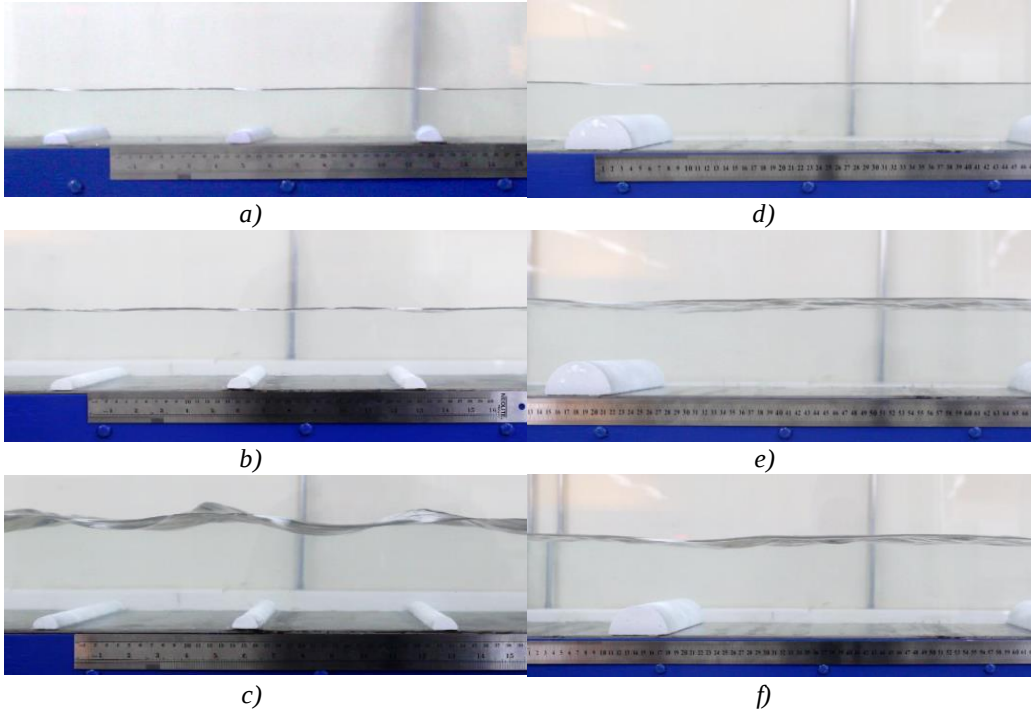


Figura 3. a), b) y c) secuencia de imágenes que muestran la deformación de la superficie libre para $D = 25\text{mm}$, para los caudales $Q = 3,51\text{ L/s}$, $8,95\text{ L/s}$ y $14,4\text{ L/s}$, respectivamente. En d), e) y f) se muestra la secuencia obtenida para $D = 75\text{ mm}$ y los mismos caudales anteriores.

Con todo lo anterior, los perfiles hidráulicos de cada experimento son del tipo $H2$ (ver clasificación en Chow, 1954). La profundidad local de cada perfil la denotaremos por $h(x)$. A partir de estas mediciones locales se ha trazado una curva de interpolación media $\tilde{h}(x)$ que pasa entre las cotas máximas y mínimas de cada eje hidráulico. Esta curva, que corresponde a un polinomio de orden 4, permite estimar la magnitud $\eta(x)$ de las deformaciones de la superficie, esto es, $\eta(x) = h(x) - \tilde{h}(x)$. De esta definición tenemos $\eta > 0$ cuando $h > \tilde{h}$ y $\eta < 0$ cuando $h < \tilde{h}$. De cada experimento podemos extraer un valor medio global de las variables hidráulicas de interés en el tramo de medición. Si ψ es esta variable, dicho valor medio se define como:

$$\bar{\psi} = \frac{1}{L} \int_0^L |\psi(x)| dx \quad (8)$$

Donde $L \approx 4\text{m}$ es la longitud del tramo del canal hasta donde se considera que el flujo escurre en condición de régimen gradualmente variado o cuasi-uniforme. A partir de la ecuación (8) obtenemos las variables medias $\bar{h}$, $\bar{\eta}$ y

con ello la velocidad media $V \simeq Q/W\bar{h}$ y el radio hidráulico $R = W\bar{h}/(W + 2\bar{h})$ del flujo. Siguiendo el análisis dimensional desarrollado en la sección 1.2, resulta natural adoptar las siguientes escalas características del flujo $\tilde{\eta} \sim \bar{\eta}$, $\tilde{h} \sim \bar{h}$, $\tilde{V} \sim V$ y $\tilde{k} \sim a = D/2$. La elección de estas escalas conduce a los adimensionales característicos $\bar{\eta}/a$, el número de Froude $Fr = V/\sqrt{g\bar{h}}$ y el número de Reynolds $Re = V\bar{h}/\nu$.

La Figura 4a muestra la distribución de datos que resulta de comparar $\bar{\eta}/a$ con Fr , para todos los obstáculos de radio a . De acuerdo con la figura, esta relación puede caracterizarse razonablemente por un escalamiento del tipo $\bar{\eta}/a \propto Fr^n$, donde $n=2.47 \sim 5/2$. En la Figura 4b, en cambio, se presentan las variables $\bar{\eta}/a$ versus Re , para todo el rango de caudales. Esta distribución también sugiere un escalamiento similar, aunque incorporando una constante adicional, esto es, $\bar{\eta}/a - (\bar{\eta}/a)_\infty \propto Re^m$, donde m depende tanto del caudal del sistema, como el tamaño de los cilindros y varía entre 1.4 y 1.8. Un elemento interesante de estas curvas es que su pendiente tiende a ser similar para el rango $Re > 30,000$ y las series de datos tienden a confundirse a medida que el diámetro de los obstáculos se incrementa. En consecuencia, si la deformación relativa tiende a seguir una relación potencial con Fr y Re , es razonable pensar que siga una tendencia similar con el producto $FrRe$. Esta distribución se muestra en la Figura 4c, cuyos puntos tienden a agruparse en torno a la curva dada por la ecuación siguiente:

$$\frac{\bar{\eta}}{a} \simeq \left(\frac{\bar{\eta}}{a}\right)_\infty + \tilde{r}(FrRe)^\epsilon \quad (9)$$

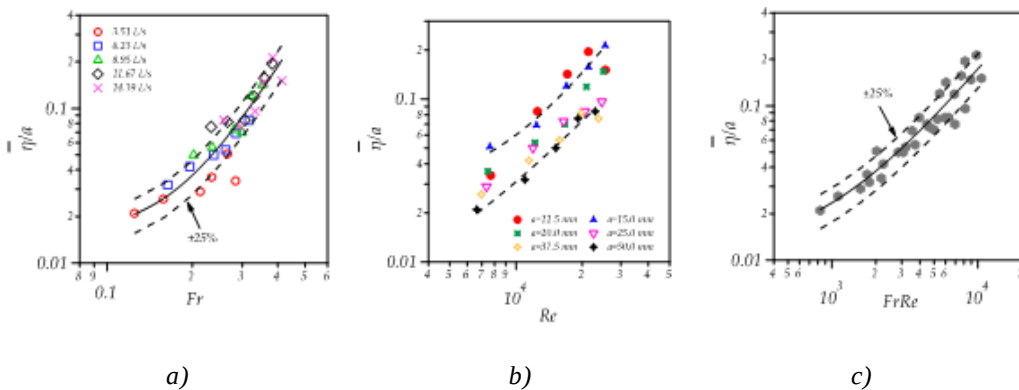


Figura 4. Distribución de la deformación relativa $\bar{\eta}/a$ en función de: a) Fr . La línea continua representa un ajuste tipo ley de potencia a los datos, dentro de una banda de error del 25% (banda indicada entre línea segmentadas). En b) tenemos $\bar{\eta}/a$

comparación con Re . Las líneas segmentadas también corresponden a ajustes en ley de potencia, donde el caudal aumenta de izquierda a derecha. En c) se compara la deformación relativa versus $FrRe$, todos los experimentos confundidos. La línea continua corresponde a un ajuste en ley de potencia y las líneas segmentadas denotan la banda de error de ancho 25%.

Donde $(\bar{\eta}/a)_{\infty} \approx 0.0115$, $\tilde{c} \approx 1.13$ y $\tilde{r} \approx 4.856 \times 10^{-6}$. Observemos que si $\tilde{c} \approx 1$ la ecuación (9) se puede reducir a $\bar{\eta}/a \approx (\bar{\eta}/a)_{\infty} + (h/\ell)^{-3/2}$, donde $\ell = \left(\frac{\tilde{r}q^2}{\nu\sqrt{g}}\right)^{2/3}$ es una cantidad que tiene dimensiones de longitud y $q = Q/W$ el caudal unitario del canal. La variable ℓ adopta valores en el rango 2.81 a 18.45 mm y se podría interpretar, a priori, como una escala de longitud asociada a la rugosidad de fondo. La participación de esta escala en la ecuación (9) revela la importancia tanto de los efectos gravitacionales, como de la rugosidad adicional introducida por los obstáculos, sobre la amplitud de las deformaciones de la superficie libre.

En la Figura 5 se muestra la distribución de la longitud relativa de las deformaciones superficiales medias $\bar{\lambda}/a$ en función del Fr . Sorprendentemente, salvo los dos puntos ubicados al extremo derecho de la figura, no se observa una variabilidad significativa de este parámetro. Cálculos adicionales también demuestran que esta longitud no varía con el número de Reynolds, ni $\bar{h}/a$, definiendo así una tendencia constante en torno al valor medio 14.5 ± 0.2 .

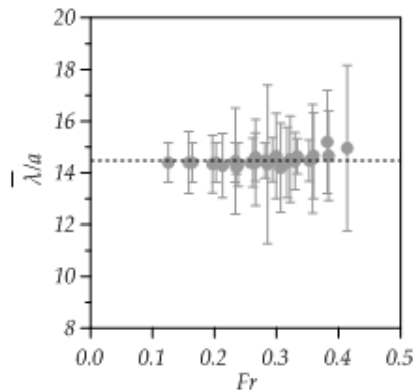


Figura 5. Longitud de deformación relativa $\bar{\lambda}/a$ en función de Fr para todos los datos experimentales. La línea segmentada horizontal denota el promedio aritmético de los datos ($=14.5 \pm 0.2$). Las líneas verticales muestran las bandas de error de cada medición.

3.2 Factor de fricción

Siguiendo a la ecuación (7) se ha estimado la energía específica $E(x)$ del flujo en cada experimento. La Figura 6a muestra dicha distribución para cilindros de tamaño $D = 40$ mm y distintos caudales. La reducción de E en la dirección del flujo es una consecuencia directa de las pérdidas de presión introducidas por el tren de obstáculos. La línea continua trazada sobre la figura corresponde a un ajuste lineal de cada curva, de cuya pendiente obtenemos el coeficiente unitario de pérdidas friccionales $J_f \approx -\overline{dE/dx}$ (el signo negativo nos permite operar con el valor positivo del parámetro). La distribución de este coeficiente se muestra en la Figura 6b, donde se compara en función de la altura de velocidad $h_v = V^2/2g$ media de cada experimento. Notemos que la relación entre ambas variables se encuentra lejos de ser considerada una función lineal, lo que sugiere que el coeficiente de fricción (que corresponde a la pendiente de esta curva) diste de ser un parámetro constante.

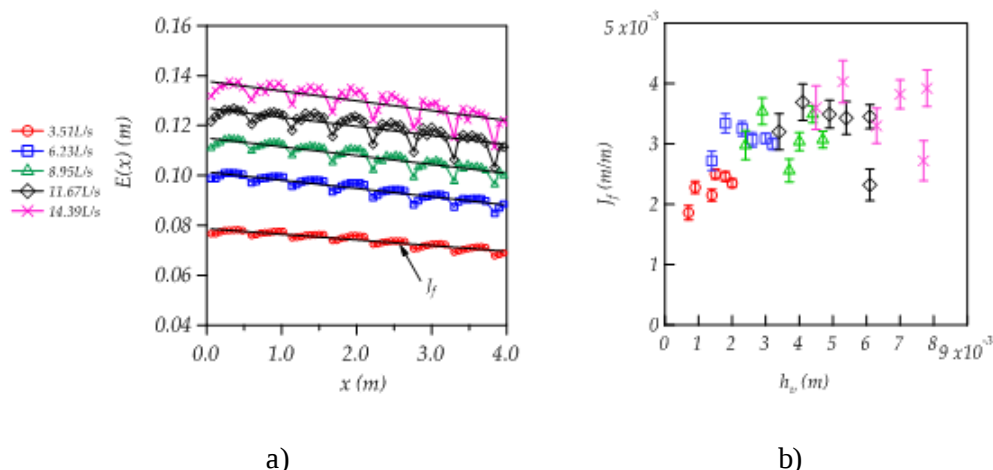


Figura 6. a) Distribución de la energía específica $E(x)$ a lo largo del canal para cilindros de diámetro $D = 75$ mm y caudales en el rango 3.5 L/s a 14.4 L/s. La línea continua corresponde a un ajuste lineal sobre cada serie, de cuya pendiente se extrae el valor de J_w . En b) se traza la distribución de J_w en función de la altura de velocidad h_v .

Siguiendo la argumentación previa, a partir de los valores de J_f se ha estimado el factor de fricción apoyándonos en la ecuación (6). La magnitud de este factor varía en el rango 0.093 a 0.64, que son valores acordes con la naturaleza rugosa-macrorugosa del flujo. A partir de estos valores, es de interés determinar su dependencia respecto de otros parámetros hidráulicos

del flujo. En este sentido, la Figura 7a muestra la dependencia de f respecto de la profundidad relativa $\bar{h}/a$ para distintos caudales. Inspirándonos en el estudio de Lawrence (2000), los valores de f tienden a confundirse entre sí siguiendo una distribución que puede representarse aproximadamente por la relación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.63 + 2.67 \ln\left(\frac{\bar{h}}{a}\right) \quad (10)$$

Del mismo estudio de Lawrence, nuestras mediciones se encuentran lejos del régimen de inundación marginal ($\bar{h} \sim a$). En la Figura 7b en cambio, se muestra la distribución de f en función de la deformación relativa de la superficie $\bar{\eta}/a$. Esta distribución también sigue una relación potencial de la forma:

$$f = f_{\infty} + \tilde{m} \left(\frac{\bar{\eta}}{a}\right)^{-\tilde{n}} \quad (11)$$

Donde $\tilde{m} \approx 0.025$ y $\tilde{n} \approx 0.79 \sim 4/5$ son parámetros de ajuste y $f_{\infty} \approx 0.023$ es el valor asintótico de la ecuación para la condición $\bar{\eta} \gg a$.

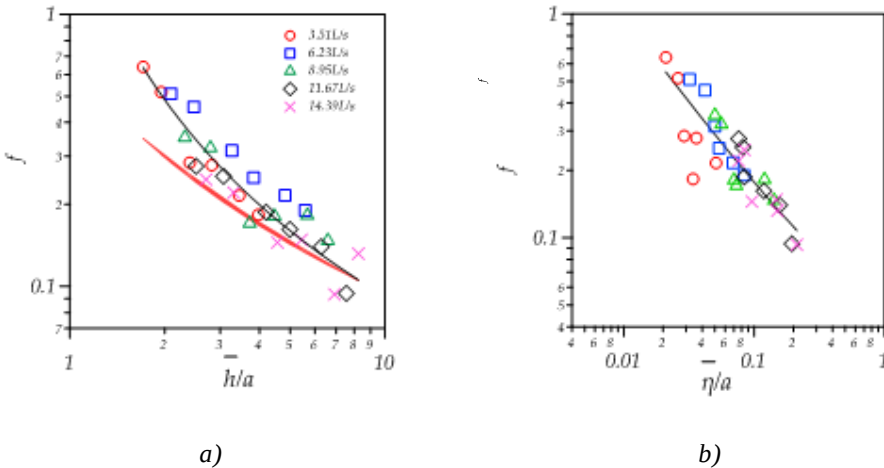


Figura 7. Distribución del coeficiente de fricción en función de: a) la profundidad relativa para distintos caudales (la simbología es la misma en ambos casos). La línea continua en negro corresponde al ajuste dado por la ecuación (10) y la línea continua roja corresponde a la ecuación (2), de acuerdo con Lawrence (2000). En el caso b) se grafica el factor de fricción versus la deformación relativa. La línea continua corresponde a un ajuste en ley de potencia dado por la ecuación (11).

Finalmente, en la Figura 8 se presenta la distribución que resulta de comparar el factor de fricción con el número de Reynolds, $f = \psi(Re)$. En la misma figura se incluyen además las mediciones de Bazin (1965). Este autor adosó al lecho de su canal de Bourgogne, listones de madera de 27 mm de ancho y espesor $a=10$ mm, cuyo largo era igual al ancho interior del canal. Bazin realizó mediciones bajo dos espaciamientos distintos ($e=10$ y 50 mm), medidos entre las paredes interiores de los listones. Con todos estos datos fue posible estimar la relación de aspecto ξ conducentes a los valores 0.13 y 0.27 , respectivamente. Notemos que en nuestro caso $\xi \approx 0.14$ que es constante para todos los experimentos, valor no lejano al 0.13 de Bazin. Del casi centenar de experiencias abordadas por el autor, solo las series N°12 a la N°17 corresponden a los experimentos que aquí nos interesan para efectos de comparación (siguiendo el ordenamiento propuesto en el texto original de Bazin). Se hace notar también que en el presente artículo se incluyen más datos del autor que los reportados típicamente en textos de hidráulica de canales (e.g. Chow, 1954). La Figura 8 muestra una diferencia importante en los coeficientes de fricción, con diferencias de magnitud desde 4 hasta casi 6 veces entre ambos factores. Sin embargo, hay que considerar que el rango de variación del número de Reynolds en ambos estudios es bastante distinto, siendo $6,636 < Re < 25,522$ para nuestros datos y $44,697 < Re < 89,240$, para los de Bazin, lo que hace presuponer que las intensidades turbulentas de los flujos generados por este último fueron mucho más significativas que en el presente estudio.

Ambos conjuntos de datos pueden representarse aproximadamente por funciones similares a la ecuación (1), esto es, $f = KRe^{-\beta}$ donde K y β son constantes de ajuste cuyos valores se muestran en la Tabla 1. El exponente β de presenta valores relativamente constantes para las series de Bazin, no así el parámetro K que muestra valores muy distintos entre sí, dependientes de ξ . En nuestras mediciones ocurre algo similar, donde β tampoco muestra una variabilidad significativa, pero sí el parámetro K que crece en función del diámetro de los obstáculos pasando de un valor cercano a 11 para $D=25$ mm a otro cercano a 860 para $D=100$ mm.

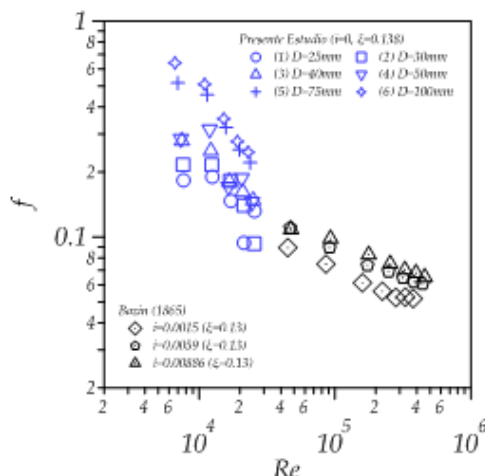


Figura 8. Factor de fricción en función del número de Reynolds para los datos experimentales del presente estudio y los obtenidos por Bazin (1865).

Tabla 1. Valores de K y β de la ecuación (1) para las series de Bazin (1865) y el presente estudio

Bazin (1865)					Presente Estudio				
Serie	i	ξ	K	β	Serie	i	ξ	K	β
12	0.0015	0.130	0.86	0.28	(1)	0.000	0.138	11.17	0.45
13	0.0059	0.130	0.67	0.24	(2)			71.60	0.63
14	0.0089	0.130	0.55	0.22	(3)			43.30	0.56
15*	0.0015	0.270	1.58	0.27	(4)			67.68	0.60
16*	0.0059	0.270	1.91	0.27	(5)			362.67	0.73
17*	0.0089	0.270	1.36	0.23	(6)			860.36	0.81

*Valores atingentes a este estudio.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente estudio se han reportado mediciones del eje hidráulico, de la deformación de superficie libre y del coeficiente de fricción de un escurrimiento generado en un canal horizontal, que atraviesa un tren de obstáculos formados por semi-cilindros colocados transversalmente a la corriente, de distintos tamaños caracterizados por una razón de escala $\xi = D/e = 0.138$ constante en todos los experimentos. Las deformaciones de la superficie libre se dependen tanto del número de Froude, como del número de Reynolds, caracterizados por funciones en ley de potencia que conducen a la relación más general del tipo $\bar{\eta}/a \approx (\bar{\eta}/a)_{\infty} + (h/\ell)^{-3/2}$, donde ℓ es una

cierta longitud de escala. Aunque aún se requiere profundizar en la naturaleza de esta longitud, se sospecha que ℓ podría contener información acerca de los efectos de rugosidad de fondo introducidos por los obstáculos sobre la deformación de la superficie libre, sugiriendo así que la ecuación para $\bar{\eta}/a$ y con ello la deformación misma de la superficie, surge de una competición entre los efectos la inercia del escurrimiento, y la rugosidad de fondo. Paradójicamente, la longitud de onda de las deformaciones muestra ser constante. Este último resultado, sin embargo, amerita ser analizado bajo otros valores de la razón de aspecto ξ o incluso, bajo otros números de Froude (e.g. $Fr > 1$)

Respecto del coeficiente de fricción, el rango de variación de f para nuestras mediciones arrojó valores entre 0.093 a 0.64. Estos valores al ser contrastados con la profundidad relativa $\bar{h}/a$ tienden a agruparse en una curva que sigue una forma similar a la relación de Nikuradse (1933) $1/\sqrt{f} \approx 1.22 + 0.883 \ln(\bar{h}/a)$. Esta curva posee la misma estructura que la reportada por Lawrence (2000) para el régimen *bien inundado*. Siguiendo dicho estudio, nuestros datos demuestran estar igualmente lejos del régimen de *inundación marginal* propuesto por el mismo autor. No deja de ser sorprendente que esta relación calce razonablemente bien a nuestras mediciones, aun cuando se haya obtenido bajo un régimen uniforme y donde las asperezas corresponden a semiesferas aisladas. Es posible que esto se relacione con el régimen turbulento del flujo, donde a partir de cierto rango la geometría individual de las asperezas del lecho tiene un efecto secundario en la resistencia al flujo, en comparación a los efectos relacionados con el patrón de distribución espacial que estos siguen en el fondo del canal, como se desprende de varios estudios conducidos en lechos heterogéneos formados por sedimentos naturales (e.g. Bathurst et al. 1981 ; Bathurst, 1985; Fuentes y Aguirre-Pe, 1990). Sin embargo, si la relación entre f y $\bar{h}/a$ es de tipo logarítmica, la relación respecto de $\bar{\eta}/a$ resulta ser de tipo potencial, con un coeficiente de potencia cercano a -4/5. Con ello se expresa que valores decrecientes de $\bar{\eta}/a$ conducirán a valores crecientes de f y viceversa, lo que invita a pensar que el problema de la fricción hidrodinámica en flujos en canales no está condicionado solo por la magnitud de la escala relativa $\bar{h}/a$, sino además por las deformaciones de la superficie libre, las que podrían estar contribuyendo al balance de cantidad de movimiento del flujo.

Finalmente, de la comparación del factor de fricción con el número de Reynolds se desprende que estos siguen también una distribución en ley de potencia dada por la ecuación (1), caracterizada por un coeficiente de

potencia que no varía dramáticamente con el diámetro de los obstáculos, lo que no ocurre con la constante K que aumenta significativamente con a . Los valores de este coeficiente difieren en hasta seis veces respecto de los obtenidos por Bazin (1865), aunque este último experimentó con listones equiespaciados que ocupaban todo el ancho del canal. Creemos que en estas diferencias se encuentra anidado no solo un efecto de la geometría de los obstáculos y su espaciamiento, sino que principalmente la turbulencia del flujo. Como perspectiva, este estudio propone que el problema de la fricción hidrodinámica en canales abiertos no solo está condicionado por algunas condiciones individuales (e.g. aspereza, profundidad, caudal, etc.), sino que por el valor de las escalas relativas que se pueden definir entre ellos. En este sentido, se plantea la necesidad de continuar este trabajo experimental explorando estos patrones de distribución para distintos valores de ξ y otros regímenes de flujo, aunque esta última condición puede ser más difícil de abordar. También se enfatiza en la necesidad de realizar mediciones de la distribución vertical de velocidad y con ello mejorar la descripción de su relación con el factor de fricción del escurrimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso por el apoyo financiero parcial dado a través del instrumento *Investigador Emergente 039.371/19*. De igual manera se agradece al Laboratorio de Sistemas Electrónicos (LABSEI) y a Hugo Tapia (LEIC-PUCV) por el apoyo técnico prestado durante el montaje experimental.

REFERENCIAS

- Aguirre-Pe J. and Fuentes R. (1990). "Resistance to flow in steep rough streams", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 116, No. 11, pp. 1374-1387.
- Bathurst, J.C., Li R. and Simons, D. (1981). "Resistance Equation for Large-Scale Roughness", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 107, No. 12, pp.1593–1613.
- Bathurst, J.C. (1985). "Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers", J. Hyd. Eng., ASCE, Vol. 111, No.4, pp. 625–643.
- Chow, V. T. (1988). *Open-channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
- Darcy, H et Bazin, H. (1865). *Recherches hydrauliques entreprises par M. Henry Darcy continuées par M. Henri Bazin. Première partie. Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts*. Imprimerie Impériale, París,

- Darcy, H. et Bazin, H. (1865). *Recherches hydrauliques entreprises par M. Henry Darcy continuées par M. Henri Bazin. Deuxième partie. Recherches Experimentales familières au remous et à la propagation des Ondes*. Imprimerie Impériale, Paris.
- Lawrence, L. (1997). "Macroscale surface roughness and frictional resistance in overland flow", *Earth Surf. Proc. and Landforms*, Vol. 22, pp. 365-382.
- Lawrence, L. (2000). "Hydraulic resistance in overland flow during partial and marginal surface inundation: Experimental observations and modeling", *Water Res. Res.*, Vol. 36, No. 8, pp. 381-393.
- Lim, H.S (2018). "Open channel flow friction factor: Logarithmic law". *J. Coastal Res.*, Vol.34, No.1, pp. 229-237.
- Nikuradse, J. (1933). "Stromungsgesetze in rauhen Rohren." *VDI-Forschungsheft 361*. Beilage zu "Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens" Ausgabe B Band 4, Juli/August. Traducido al inglés como "Laws of Flow in Rough Pipes", *NACA TM 1292*, November 1950.
- Oke, T. (1988) "Street design and urban canopy layer climate." *Energy and Buildings* Vol. 11, Nos. 1-3, pp. 103-113.
- Stewart, M., Cameron, S., Nikora, V., Zampiron, A. and Marusic, I. (2018). "Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds", *J. Hyd. Res.*, Vol. 57, No. 2, pp. 183-196.

ACERCA DE LOS AUTORES

Francisco Martínez es Ingeniero Civil Hidráulico de la Universidad de Chile y Ph.D. en Física de la Université Paris-Sud. Sus áreas de interés se centran en la mecánica de medios granulares y la dinámica de flujos con superficie libre. Ha ejercido profesionalmente en la industria minera, el sector público y ahora desde la academia en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Dayanna Parra y Matías Medina son ambos Ingenieros Civiles de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y realizaron su memoria titulación con un tema experimental en el Laboratorio de Ingeniería Civil de dicha universidad, parte del cual se presenta en el presente artículo.

LA DOCENCIA EXPERIMENTAL DE LA HIDRÁULICA EN TIEMPOS DE PANDEMIA: UN CASO PARTICULAR

ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad de Chile

atamburr@ing.uchile.cl

La Hidráulica es una ciencia eminentemente experimental y no se concibe su enseñanza sin el apoyo docente de trabajos de laboratorios o terreno que sirvan de complemento a la formación conceptual y teórica, ya sea mostrando los fenómenos descritos en clases o verificando la teoría o relaciones empíricas usadas en la práctica profesional. Sin embargo, la pandemia de COVID-19 que nos está afectando, impuso en la comuna de Santiago una cuarentena que impidió muy tempranamente las actividades presenciales en el Campus Beauchef de la Universidad de Chile, debiendo transitar la docencia presencial a la modalidad online, siendo imposible de este modo el trabajo experimental en los laboratorios del campus. Además, este cambio de modalidad de enseñanza fue súbito y tanto profesores como estudiantes no estábamos preparados, debiendo aprender y adaptarnos a nuevas modalidades de enseñanza y aprendizaje sobre la marcha, tarea que no ha sido fácil para profesores y estudiantes y en la cual todavía estamos afanados.

De este modo, el curso Hidráulica, obligatorio para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile que dicté el primer semestre del año 2020 se vio afectado cuando varias comunas de la Región Metropolitana entraron a cuarentena. Para suplir la actividad de laboratorio tradicional, se le pidió a los estudiantes que, con su conocimiento de los cursos previos Mecánica de Fluidos y Métodos Experimentales, buscaran un problema de Hidráulica, lo desarrollaran, construyeran la instalación experimental solo con los elementos disponibles en su casa, llevaran a cabo la experimentación y reportaran las conclusiones en un informe. Como la tarea se dio en las primeras semanas de clases, antes de haber pasado la mayor parte de la materia, los estudiantes no tenían el bagaje conceptual del curso, por lo que el objetivo del trabajo era, a partir de los conocimientos de asignaturas previas, estudiar un fenómeno relacionado con la materia del

curso. Lo que importaba no era si el resultado concordaba con la teoría o respaldaba lo enseñado en clases, sino la metodología experimental y el análisis de datos. También era propósito de la tarea mostrar que es necesario literalmente “mojarse las manos” en el aprendizaje de la Hidráulica.

Sin una guía de laboratorio que definiera el experimento a realizar, instalación a ocupar, variables a medir y análisis posterior, para muchos alumnos la mayor dificultad fue definir qué fenómeno estudiar experimentalmente. Incluso, ya avanzado más de la mitad del semestre, algunos estudiantes decían “no se me ocurre qué hacer”. Otros, buscaron en *youtube* y repitieron algunas actividades que allí vieron. Dos o tres insistieron en construir mini bombas centrífugas, siguiendo las instrucciones de videos disponibles en la red, a pesar que la tarea no era solamente construir algo, sino que sacar información cuantitativa de los experimentos. Hubo ingeniosos experimentos, realizados en los más diversos ambientes, lo que mostró la gran diversidad de condiciones de trabajo y estudio de los distintos estudiantes, evidenciando realidades de estudio desde unas muy favorables a otras muy desventajosas. Parte del informe final incluía un video de 5 minutos en el que se debía presentar la instalación experimental, instrumentos de medición, pero muy especialmente el proceso de medición, mostrando particularmente las fluctuaciones de la superficie del agua u otra variable considerada. Especial énfasis debía darse en la determinación de los errores experimentales y su propagación a través de los cálculos realizados.

El resultado fue muy variado, desde experimentos realizados en departamentos pequeños, hasta en casas que permitían disponer un gran espacio para ubicar la instalación experimental. Hubo muchos trabajos relacionados con vertederos de pared gruesa y delgada, así como ensanches y contracciones en canales, probablemente influidos por los temas que se abordan en semestres presenciales y para los cuales hay guías de laboratorio. Varios de los buenos trabajos se hicieron en la cocina, entre los que destacan la determinación del coeficiente de gasto en un vertedero circular (generado por el rebalse del agua que se suministra de manera permanente a una olla), y algunos relacionados con el resalto axisimétrico, generado por el chorro del lavaplatos que incide sobre una bandeja circular. Uno, de mayor escala fue la determinación del coeficiente de fricción y de Manning cuando en un canal se instalan de manera equiespaciada tubos cilíndricos en el fondo. Es importante destacar que el alumno propuso el problema antes que comenzáramos a abordar en el curso la parte de flujos en canales abiertos.

Una vez entregado el informe final y terminado el curso, invité a un par de estudiantes a repensar el trabajo que habían hecho, incorporando lo aprendido en el curso y agregando alguna bibliografía básica. Sólo uno de ellos, Jerko Raffo, pudo terminar esta tarea adicional, fuera de toda exigencia del curso. Su trabajo, ya no como un informe de laboratorio docente, sino como un artículo para una revista se presenta en este número. La idea de la tarea a desarrollar en el curso fue original del alumno y dio origen al artículo titulado “Ley de Resistencia en un Canal Rectangular con Macrorugosidades Cilíndricas”. Coincidentemente, a comienzos de año, guiados por el Prof. Francisco Martínez, la dupla Matías Medina y Dayana Parra habían obtenido, respectivamente, su título de Ingeniero e Ingeniera Civil de la PUCV, con un trabajo experimental en el mismo tema. El profesor Martínez y sus alumnos también contribuyen en este número con un artículo, por lo que el trabajo de Jerko Raffo puede verse como un pequeño complemento al de Martínez et al.

Evidentemente, varias objeciones pueden hacerse al artículo de Raffo, como por ejemplo no separar los efectos de las paredes y de fondo en la cuantificación de los coeficientes de roce, no visualizar el flujo en torno a los cilindros ubicados en el fondo, no haber hecho más mediciones de la altura a lo largo del canal, etc., pero parte de eso es materia que escapa al curso de Hidráulica, así como del objetivo de la tarea a partir de la cual se originó el artículo.

Jerko Raffo debe recibir todos los méritos por el artículo, así como me atribuyo todo error que pueda existir en él, al no haber hecho una revisión adecuada de su tarea.

Mi intención con la publicación del artículo de Raffo es mostrar que, con pocos elementos, pero con ganas de hacer cosas de manera independiente, prácticamente sin guía, el potencial de los alumnos es enorme y no debemos desaprovecharlo, menos aún en estos tiempos de pandemia. Solo basta acercarnos a ellos y mostrar interés por lo que hacen, lo que valoran mucho.

LEY DE RESISTENCIA EN UN CANAL RECTANGULAR CON MACRORUGOSIDADES CILÍNDRICAS

JERKO RAFFO PANIAGUA

Alumno Ingeniería Civil

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad de Chile

jhrp1996@gmail.com

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados de un estudio experimental respecto al efecto que tienen en los coeficientes de resistencia en el flujo que se desarrolla en un canal rectangular horizontal, en el que se instalan tubos cilíndricos equiespaciadamente en el fondo del canal. Los resultados obtenidos siguen la tendencia de estudios previos, realizados con otros tipos de macrorugosidades. El trabajo experimental fue parte de una de las actividades evaluadas del curso Hidráulica, de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y se desarrolló durante el confinamiento que imponía la cuarentena debido a la pandemia de COVID-19. Una de las restricciones de la actividad era que debía realizarse en casa y solo con los materiales y elementos disponibles en ella.

Palabras clave: ley de resistencia, macrorugosidad, factor de fricción

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Es de conocimiento general en hidráulica que las pérdidas friccionales siempre están presentes tanto en tuberías como en canales de cualquier material, existiendo relaciones de cálculo para determinar estas pérdidas, en términos de que relacionan un coeficiente de fricción con las características del flujo. Sin embargo, las expresiones usuales de cálculo como lo son el factor de fricción de Darcy-Weisbach (f) o el coeficiente de rugosidad de Manning (n) pierden su validez si el tamaño de las rugosidades del canal es muy grande en comparación con la altura de escurrimiento. La rugosidad se

clasifica principalmente comparado la altura de escurrimiento o el radio hidráulico del flujo con el tamaño de la aspereza (Niño, 2005). De este modo, el escurrimiento se denomina macrorugoso cuando $R_h/d_s < 10$, siendo d_s el tamaño de la aspereza y R_h es radio hidráulico. En este caso, la resistencia al flujo queda determinada por la fuerza de arrastre que se genera sobre los elementos de rugosidad del lecho, la que se agrega a la resistencia friccional clásica de la pared (Niño, 2005).

El objetivo de este trabajo es determinar el efecto en el coeficiente de fricción f y en el coeficiente de rugosidad n debido a la presencia de macrorugosidades equiespaciadas instaladas sobre el fondo de un canal de sección rectangular. Un aspecto importante del estudio es que constituyó un trabajo experimental del curso Hidráulica de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y debió realizarse bajo condiciones de cuarentena debido a la pandemia, es decir en la casa y utilizando solo materiales e instrumentación disponibles en ella.

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Se construyó un canal de sección rectangular hecho de policarbonato vegetal, al cual se le instalaron equiespaciadamente, tubos cilíndricos de metal dispuestos de manera perpendicular a la dirección del flujo, los cuales actuaban como macrorugosidades en el escurrimiento. Una fotografía del canal se muestra en la Figura 1. El canal se instaló en el espacio exterior de la casa y tenía un ancho b de 7.0 ± 0.5 cm y una longitud total de aproximadamente 2 metros. Los tubos que correspondían a las macro rugosidades, tenían un diámetro D de 1.6 ± 0.5 cm y estaban posicionados a una distancia e de 11.4 ± 0.5 cm uno del otro con respecto a sus centros, teniendo así una razón D/e igual a 0.14 ± 0.04 . La pendiente nominal del canal es nula. Para suministrar los caudales, se utilizaron dos mangueras que eran dirigidas a un bidón que servía de aquietador del flujo en su inicio, para luego desembocar en el canal. Los aforamientos se llevaron a cabo utilizando un contenedor graduado en 200 mL y un cronómetro, mientras que las alturas de escurrimiento se midieron usando una regla metálica con una graduación de 0.5 mm. El agua se suministraba con una manguera de jardín conectada a la red pública de agua potable. En la Figura 2 se presenta un esquema de la instalación experimental con sus dimensiones.



Figura 1. Fotografía del canal experimental. No se muestra el bidón utilizado como aquietador que se instalaba en el extremo aguas arriba del canal durante los experimentos.

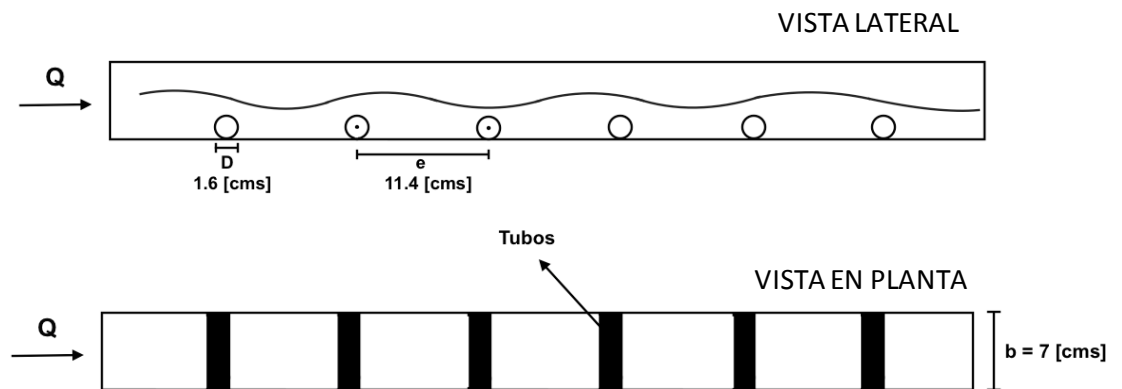


Figura 2. Esquema de la instalación experimental.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Una vez que el flujo alcanzaba su estado de régimen permanente, lo primero que se llevaba a cabo era el aforo del caudal, el cual se realizaba al final del canal. Las alturas de escurrimiento se midieron antes y después de cada tubo, con la regla metálica posicionada de manera perpendicular al fondo del canal, y registrando tanto el valor mínimo como el máximo de las fluctuaciones de la altura del flujo. El procedimiento se realizó para dos caudales distintos en régimen subcrítico, con condición de borde la caída libre del flujo en el extremo de aguas abajo del canal

4. RESULTADOS

En la Tabla 1 se presentan los valores resultantes de los aforos para los dos caudales que se utilizaron en los experimentos, con sus respectivos errores.

Las Figuras 3 y 4 muestran los ejes hidráulicos medidos para los caudales experimentados. La línea punteada en cada figura corresponde al ajuste de las alturas medidas. El error máximo de las alturas es de 2 mm, por lo que no se distinguen las barras de error en la figura.

Tabla 1. Volumen, tiempo y caudal con sus errores (para los dos caudales)

VOLUMEN mL	ERROR VOLUMEN mL	TIEMPO s	ERROR TIEMPO s	CAUDAL i L/s	ERROR CAUDAL i L/s	CAUDAL L/s	ERROR CAUDAL L/s
1580	50	2.90	0.03	0.545	0.004	0.54	0.06
1630	50	2.96	0.03	0.55	0.01		
1570	50	2.93	0.004	0.536	0.005		
1450	50	2.72	0.21	0.533	0.007		
1700	50	3.16	0.23	0.538	0.003		
970	50	2.93	0.01	0.331	0.003	0.33	0.06
1000	50	3.00	0.08	0.333	0.005		
920	50	2.86	0.06	0.322	0.006		
920	50	2.89	0.03	0.32	0.01		
980	50	2.92	0.00	0.336	0.008		

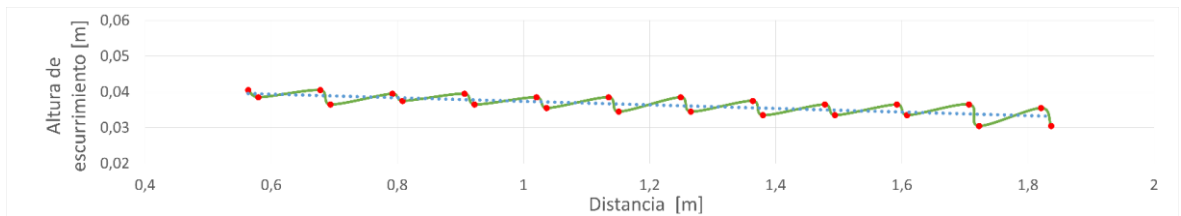


Figura 3. Eje hidráulico para el caudal de 0,33 L/s

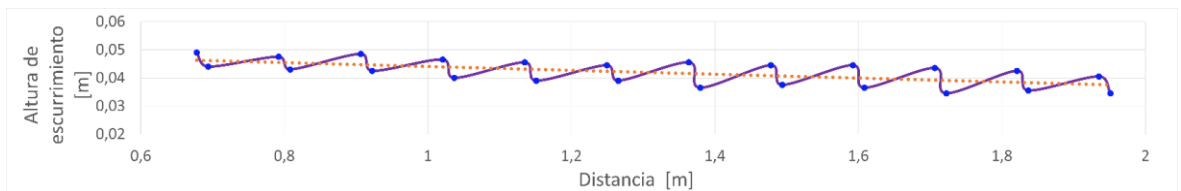


Figura 4. Eje hidráulico para el caudal de 0,54 L/s

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de las alturas de escurrimiento se determinó la velocidad V y energía específica E a lo largo del canal mediante las ecuaciones (1) y (2):

$$V = \frac{Q}{bh} \quad (1)$$

$$E = h + \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

donde Q es el caudal, b es el ancho del canal, h es la altura del flujo y g es la aceleración de gravedad. Con la energía específica en función de la distancia

x a lo largo del canal, se determinó la pérdida unitaria de energía J , la que para un canal horizontal está dada por:

$$J = -\frac{dE}{dx} \quad (3)$$

Cabe mencionar que el ajuste de E en función de la distancia x resulta ser una recta (dentro de los errores experimentales), por lo que J es constante en el tramo de las mediciones consideradas y mostradas en las Figuras 3 y 4. Estos tramos se definieron considerando la región en la que el flujo puede considerarse como gradualmente variado. De este modo tramos con gran curvatura de las líneas de corriente al comienzo del canal y en su extremo de aguas abajo (caída libre) fueron descartados del análisis.

A partir del valor de J se calculó el factor de fricción f y el coeficiente de rugosidad de Manning n para la condición promedio del flujo en el tramo considerado del canal. El factor de fricción se determinó a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach utilizando el radio hidráulico promedio $\bar{R}_h$ y velocidad promedio $\bar{V}$ del eje hidráulico en el tramo (ecuación (4)):

$$f = \frac{8g\bar{R}_h J}{\bar{V}^2} \quad (4)$$

A través de la ecuación de Manning se calculó el coeficiente de rugosidad n . En este caso, se calculó un valor de n local, asociado a la ubicación de cada macrorugosidad y a partir de esos valores se determinó un coeficiente de rugosidad característico asociado al eje hidráulico de cada caudal. En cada posición x el coeficiente de rugosidad n_x está dada por la ecuación (5) y el valor característico n se calculó como el promedio de los n_x .

$$n_x = \frac{R_h^{2/3} J}{V} \quad (5)$$

En la Tabla 2 se presentan los valores resultantes de f y n , así como otros parámetros característicos del flujo y en la Tabla 3 están sus errores asociados. El valor del número de Reynolds presentado en la tabla se obtuvo promediando el valor del número de Reynolds en cada ubicación ($Re =$

VR_h/ν , siendo ν la viscosidad), razón por la que resulta diferente si se calcula usando $\bar{R}_h$ y $\bar{V}$. Al ser $Re > 1000$ se verifica que los flujos son turbulentos. El número de Froude ($Fr = V/\sqrt{gh}$) indica que los flujos son subcríticos o de río. En la tabla también se ha incluido el parámetro de inundación $\Lambda = h/D$ (Lawrence, 1997) y el número de Strickler $St = n\sqrt{g}/D^{1/6}$ (Niño, 2005), parámetros que serán discutidos más adelante.

Tabla 2. Coeficientes de resistencia y parámetros asociados a las condiciones de flujo experimentadas

Q [L/s]	J	$\bar{h}$ [m]	$\bar{R}_h$ [m]	$\bar{V}[\frac{m}{s}]$	f	n	Λ	$\frac{R_h}{D}$	Re	Fr	St
0.33	0.0047	0.036	0.0178	0.13	0.39	0.036	2.3	1.11	2051	0.22	0.19
0.54	0.0061	0.042	0.0190	0.19	0.26	0.030	2.6	1.19	3110	0.28	0.23

Tabla 3. Errores asociados a los coeficientes de resistencia y a los parámetros asociados a las condiciones de flujo experimentadas

Q [L/s]	$\bar{h}$ [m]	$\bar{R}_h$ [m]	$\bar{V}[\frac{m}{s}]$	f	n	Λ	$\frac{R_h}{D}$	Re	Fr	St
0.06	0.003	0.0005	0.01	0.09	0.003	0.2	0.05	86	0.03	0.02
0.06	0.004	0.0006	0.01	0.06	0.003	0.3	0.05	178	0.05	0.02

Recientemente, Medina y Parra (2020) y Martínez et al (2020, en este número de la revista) presentaron los resultados de un estudio en el que estudiaban el efecto de macrorugosidades consistentes en semicilindros adheridos al fondo de un canal rectangular. Estos autores determinaron el factor de fricción en función del número de Reynolds del flujo y del parámetro de inundación dado por h/a , donde $a = D/2$, siendo D el diámetro del semicilindro. Los gráficos de las Figuras 5 y 6 fueron tomados de los trabajos antes mencionados y a ellas se han agregado los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio. En la Figura 5 Medina y Parra incluyen también los datos de Bazin (1865) obtenidos con listones de sección cuadrada equiespaciados adheridos al fondo del canal. En la Figura 6 los autores incorporan curvas límites del trabajo de Lawrence (1997).

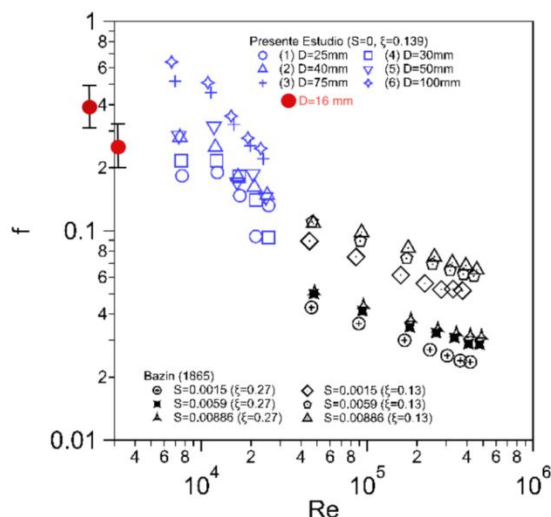


Figura 5. Factor de fricción en función del número de Reynolds según el estudio de Medina y Parra, 2020 (símbolos azules). Los símbolos negros corresponden a los de Bazin (1865). Los símbolos llenos, con su banda de error, son los obtenidos en el presente estudio.

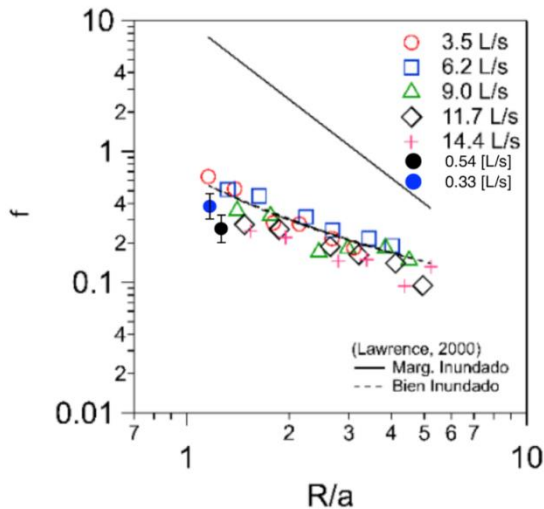


Figura 6. Dependencia del factor de fricción con el parámetro de inundación según Medina y Parra (2020). Los símbolos vacíos y cruces corresponden a los datos obtenidos por Medina y Parra (2020), donde R es el radio hidráulico (R_h) y a el radio del semicilindro. Las líneas son condiciones límites según Lawrence (1997). Los círculos llenos, con su banda de error, son los obtenidos en el presente estudio.

En las Figuras 7 y 8 se presentan las relaciones para el factor de fricción en función del parámetro de inundación según Lawrence (2020). La Figura 7 incluye conjuntos de datos obtenidos por distintos autores, los que muestran una gran dispersión, que puede llegar a dos órdenes de magnitud. La Figura 8 muestra datos experimentales en un rango más limitado de Λ e incluye el valor del número de Reynolds del flujo. En ambas figuras se ha agregado los datos obtenidos en el presente estudio.

Por último, en la Figura 9 se presenta el número de Strickler, el que corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning expresado en forma adimensional. Los datos experimentales de este estudio se comparan con distintas relaciones obtenidas para flujos macrorugosos (Niño, 2005)

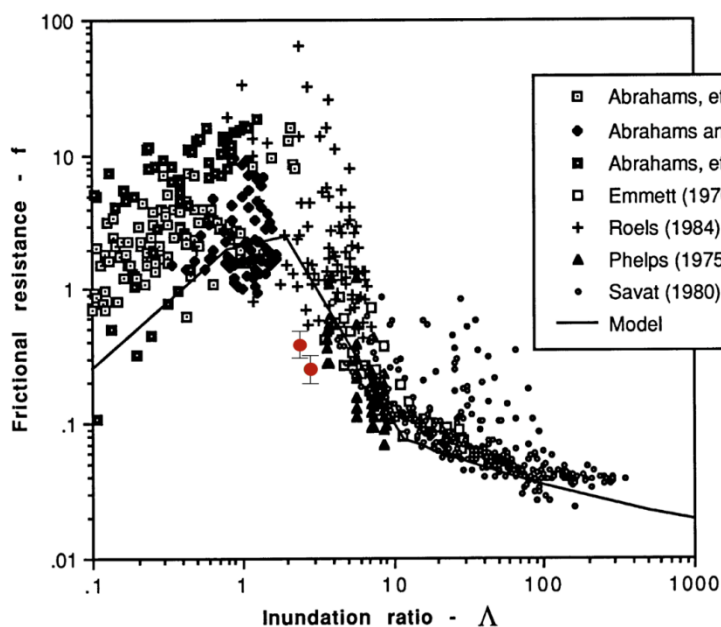


Figura 7. Factor de fricción en función del parámetro de inundación, según Lawrence (1997). Los datos experimentales del presente estudio son aquellos que presentan banda de error.

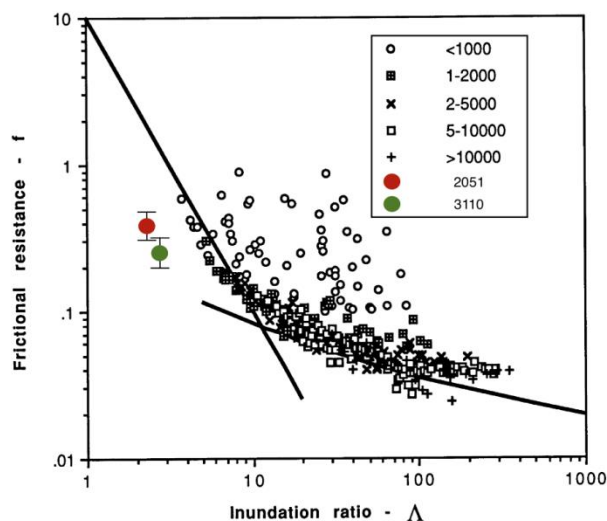


Figura 8. Factor de fricción en función del parámetro de inundación, según Lawrence (1997). Los valores del inserto corresponden al valor del número de Reynolds del flujo. Los datos experimentales del presente estudio son aquellos que presentan banda de error. El símbolo de color rojo corresponde a $Re \approx 2000$ y el de color verde $Re \approx 3100$.

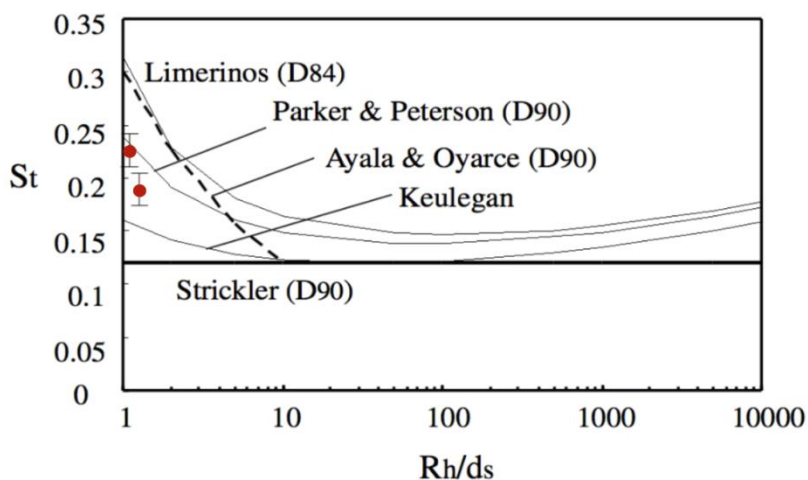


Figura 9. Número de Strickler en función de las características geométricas del flujo y del tamaño del sedimento (Niño, 2005). Se incluyen los datos experimentales del presente estudio.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

En general, los resultados obtenidos en este trabajo siguen la tendencia de los obtenidos en otros flujos macrorugosos, a pesar de que las condiciones experimentales no son las mismas. En efecto, la macrorugosidad en el trabajo de Medina y Parra (2020) y de Martínez et al (2020) corresponde a semicilindros equiespaciados y los de Bazin (1865) a listones cuadrados equiespaciados. En cambio, en el artículo de Lawrence (1997), así como aquellos presentados en Niño (2005), los flujos son en lechos de sedimento natural de granulometría extendida. De este modo, es esperable que los resultados no sean directamente comparables y presenten diferencias. Por último, es importante destacar que el presente estudio se llevó a cabo bajo condiciones de cuarentena, realizando el experimento en la casa y construyendo una instalación experimental lo más simple posible, solo con los materiales y elementos que se disponían en el hogar del autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Francisca y Jerko por prestarme el patio para realizar el experimento, a mi hermano Felipe por ayudarme a construir el canal, y a mis amigos por el apoyo en mi formación profesional.

REFERENCIAS

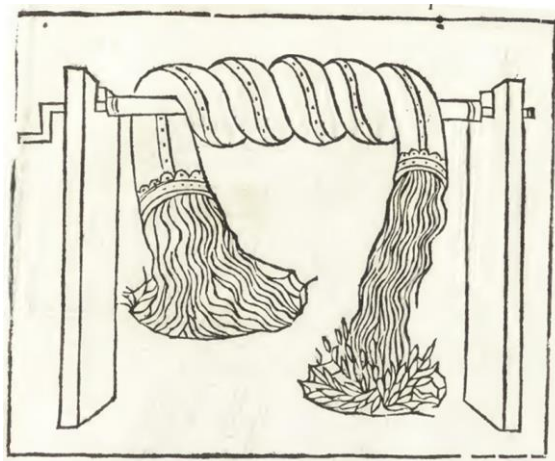
- LAWRENCE, D.S.L. (1997) “Macroscale Surface Roughness and Frictional Resistance in Overland Flow”, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol 22, pp. 365–382.
- Martínez, F., Medina, M. y Parra, D. (2020) “Esguimientos Subcríticos sobre un Tren de Cilindros en un Canal Horizontal”, *Revista SOCHID*, Vol. 34, No. 1.
- Medina, M. y Parra, D. (2020) *Esguimientos a Superficie Libre Sobre Lechos Horizontales-Rugosos*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

Niño, Y. (2005) *Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos*. Apuntes del curso Transporte Hidráulico de Sólidos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

ACERCA DEL AUTOR

Jerko Raffo Paniagua, proveniente de la ciudad de Rancagua, es estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, mención Estructuras y Construcción, en la Universidad de Chile. Jerko es un fanático del deporte y entre sus aficiones se encuentran estar en contacto con la naturaleza, los viajes y la fotografía.

HIDRO-GRAFÍA



La imagen de la figura corresponde a:

- a) Una máquina para estrujar velas o tejidos de grandes dimensiones
- b) Una máquina para elevar agua
- c) Una máquina para enroscar tuberías

NÚMERO ANTERIOR



La imagen fue tomada de la primera versión impresa ilustrada de la obra *De Architectura*, escrita por Marcus Vitruvius Pollio, ingeniero y arquitecto romano del siglo I a.C. Su obra, en forma de manuscrito, circuló hasta la Edad

Media y fue impreso por primera vez en 1486. La cuarta impresión realizada en Venecia en 1511 fue la primera con ilustraciones. Consta de 10 libros y el octavo está dedicado al agua y a obras hidráulicas. La ilustración aparece en el primer capítulo del libro octavo, en la parte dedicada a cómo encontrar fuentes de agua. Respecto a las aguas subterráneas, Vitruvius indica que ellas pueden detectarse si antes de la salida del Sol la persona se acuesta y, con la barbilla fija y la vista rozando el suelo, en los lugares donde se observe vapores elevándose en el aire deberá excavar para encontrar agua. (ATT)

