

Estudio del Flujo Uniforme en Canales

Por: Rodrigo Cano Gallego

1. INTRODUCCION

1.1 Resumen

Se denomina flujo uniforme en canales al estado de movimiento que se presenta cuando las fuerzas de fricción generadas entre el agua en movimiento y la superficie del canal, se equilibran con la componente del peso del agua en la dirección del movimiento.

El movimiento uniforme se caracteriza porque la masa se mueve en línea recta y con velocidad constante.

En los canales naturales o artificiales el agua tiende a fluir con movimiento uniforme, cuando la rugosidad del canal es muy alta como ocurre en los canales naturales, el flujo uniforme se alcanza en tramos cortos del canal, cuando ésta es muy baja como ocurre en los canales artificiales, se requiere un sector muy largo de canal para alcanzar el flujo uniforme.

El flujo uniforme constituye la base para el estudio y diseño de canales, este fenómeno se ha estudiado mucho desde hace varios siglos, pero el estado actual del conocimiento en este campo es muy empírico.

Este artículo presenta un resumen de una experimentación efectuada en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Minas sobre flujo uniforme en canales, por Rodrigo Cano Gallego con la colaboración de varios grupos de estudiantes, y los resultados obtenidos.

1.2 Reseña histórica sobre el estudio del flujo uniforme en canales

En 1768 la Administración de la ciudad de París encomendó al ingeniero Antoine Chezy estudiar la desviación del río Yvette, para mejorar el sistema de acueducto de la ciudad. Chezy no encontró en la información existente ecuaciones que le permitieran calcular el tamaño de la sección del canal y decidió investigar experimentalmente el problema.

En 1769 experimentó con un canal en tierra, el Courpalet, en el área del río Sena.

Chezy planteó el problema del flujo uniforme en canales en la forma que se conoce actualmente, como un equilibrio entre la resistencia creada por la superficie del canal y la componente de la fuerza de la gravedad en la dirección del movimiento; ignoró la resistencia del aire en la superficie al movimiento del agua, y encontró que la fuerza de resistencia al movimiento es proporcional al cuadrado de la velocidad.

La ecuación planteada por Chezy en su reporte es una ecuación de similitud hidráulica y difiere de la que hoy se conoce con su nombre. Hace la resistencia del canal proporcional al cuadrado de la velocidad y el perímetro, $V^2 P$, y la fuerza de la gravedad proporcional al área de la sección y la pendiente del canal, $A S$. Cuando en un canal se conocen: la velocidad, el perímetro, el área, y la pendiente, V, P, A, S , se puede calcular para otro canal la velocidad v si se conoce su perímetro p , área a , y pendiente s con la ecuación:

$$\frac{V^2 P}{A S} = \frac{v^2 p}{a s}$$

En reportes posteriores redujo el lado izquierdo de la ecuación a un factor numérico para simplificar los cálculos, pero no estableció que este valor fuera una constante para todas las corrientes: por el contrario, estableció que este valor cambia de una corriente a otra.

Si se denomina C^2 a este factor numérico se puede obtener la ecuación

$$V = C \sqrt{a s / p}$$

y al hacer $a/p = r$ se obtiene

$$V = C \sqrt{r S}$$

forma con la cual se conoce la ecuación denominada "Chezy" actualmente.

El reporte con el trabajo de Chezy se presentó en 1775 poco antes de la revolución francesa, y desapareció, esta ecuación fue presentada en libros de hidráulica solamente un siglo más tarde, en 1876.

El cuadro siguiente presenta un resumen de las principales ecuaciones propuestas para el cálculo de flujo uniforme y sus autores.

AUTOR	AÑO	ECUACION
Antonie Chezy	1775	$V = C\sqrt{RS}$
Johann Albert Eytelwein	1801	$V = 50,9\sqrt{RS}$
Julius Weisbach	1845	$V = \sqrt{8gRS/f}$
Henry Philibert Gasparod Darcy	1845	$V = \sqrt{8gRS/f}$
Emile Oscar Ganguillet y Willem Rudolf Kutter	1869	$C = \frac{a + b/S + m/n}{1 + (a+b/S)n/\sqrt{R}}$
Robert Manning	1889	$V = (1/n) R^{2/3} S^{1/2}$
Henry Emile Bazin	1897	$V = \left(\frac{87}{1 + m/\sqrt{R}} \right) \sqrt{RS}$
A. Strickler	1923	$V = (1/n) R^{2/3} S^{1/2}$
Phillips Forchheimer	1927	$V = \lambda R^{0,7} S^{1/2}$

Entre 1957 y 1961 laboró un Comité de Trabajo creado por la División de Hidráulica de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles. Este Comité compuesto por: R.W. Carter, H.A. Eistein, Julian Hinds, R.W. Powell y E. Silberman, tuvo como tarea investigar toda la información existente a la fecha sobre "Factores de Fricción" en canales, y proponer ecuaciones para el cálculo de flujo uniforme. Después de cuatro años de investigación y tras estudiar más de 200 documentos, el Comité de Trabajo presentó su reporte, el cual fue publicado en marzo de 1963 en la revista de hidráulica de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles.

La conclusión principal de este reporte es que la mejor ecuación para el cálculo del flujo uniforme en canales con fondo fijo, es la conocida como Darcy

Weisbach, $S = V^2 f / (8gR)$, pero que a la fecha (1961) no se dispone de ecuaciones confiables para calcular el factor de fricción f . La comisión propuso investigar los siguientes tópicos:

- Definir la rugosidad equivalente del material del lecho del canal.
- Definir la transición de superficie hidráulicamente lisa a superficie totalmente rugosa.
- Estudiar factores de fricción para grandes rugosidades especialmente en corrientes supercríticas, como se presenta en canales pedregosos de alta pendiente.
- Estudiar canales compuestos, como los formados por un río y sus zonas de inundación.
- Estudiar factores de fricción en canales con fondo móvil, y determinar cuándo un canal de fondo fijo se convierte en un canal con fondo móvil.

El análisis de diferentes estudios experimentales hechos por la "Comisión de Trabajo" muestra que el factor de fricción de la ecuación Darcy Weisbach se puede calcular con una ecuación similar a la obtenida por Von Karman y Prandtl para tuberías,

$$1/\sqrt{f} = b + a \log(D/K) \quad (1)$$

donde K es la rugosidad absoluta de la pared, D el diámetro equivalente (el cual para canales se hace igual a $4R$), R es el radio hidráulico. Los coeficientes a y b son valores numéricos que se deben determinar experimentalmente; para superficies muy lisas estos valores pueden tomarse iguales a los propuestos para tuberías.

Trabajos experimentales posteriores estudiaron el factor de fricción " f " para rugosidad en el fondo del canal, con elementos de geometría uniforme (esferas, semi-esferas, cubos), y con materiales aluviales. Los elementos se instalaron en forma regular sobre el fondo del canal para estudiar el efecto de la densidad, y las paredes se conservaron lisas. Los resultados de estos trabajos no produjeron ecuaciones generalizadas para calcular el factor de fricción " f ".

1.3 Descripción de la experimentación

Desde 1975 el autor de este trabajo inició el estudio y recopilación de literatura sobre el tema; posteriormente hizo el planteamiento, para una investigación generalizada sobre el factor de fricción de la ecuación Darcy-Weisbach para canales aluviales con gran rugosi-

dad. Se decidió utilizar rugosidades de altura conocida, formadas por arenas y cascajo de origen aluvial y tamaño conocido, pegados al fondo y paredes del canal.

En 1980 para estudiar la factibilidad de efectuar esta investigación en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional en Medellín, se ofreció como tema para proyecto de grado parte de este trabajo, el cual fue tomado por los estudiantes Carlos Felipe Londoño y Juan Carlos Correa.

En esta etapa se experimentó en un canal rectangular de pendiente constante, $S = 0.0256$, longitud 14 m, ancho 0.80 m. Se utilizaron cinco materiales rugosos con tamaño entre 1.19 mm, y 19.2 mm. Los resultados de este trabajo fueron muy satisfactorios y mostraron el camino y la factibilidad de la investigación.

En 1982 los estudiantes Margarita María Arango y Carlos Mario Tamayo investigaron otra área de este tema, en el mismo canal, con modificación de la forma; experimentaron sección trapezoidal y sección triangular. Ambas investigaciones fueron dirigidas por el autor de este trabajo.

Se experimentó con cinco materiales rugosos de tamaño variable entre 0.6 mm, y 19.2 mm.

Los resultados de los dos proyectos de grado fueron muy satisfactorios y mostraron las áreas que debían investigarse.

Con posterioridad a 1982 el autor de este trabajo continuó la investigación con las siguientes áreas de trabajo.

1. Análisis de los datos experimentales obtenidos en los dos trabajos.
2. Estudio detallado de cada dato de laboratorio, y supresión de los encontrados erróneos.
3. Elaboración de programas en computador, para el cálculo de las funciones que relacionan las variables medidas en el laboratorio.
4. Cálculo de funciones con base en los datos de laboratorio.
5. Planeamiento de nuevas áreas de investigación.
6. Experimentación en canal de pendiente variable.
7. Análisis e interpretación de resultados.

8. Cálculo de funciones que relacionan las variables estudiadas.

9. Informe general con los resultados de la investigación.

2. TRABAJO EXPERIMENTAL

Si se considera la fuerza de fricción ejercida por la superficie del canal sobre el agua proporcional al cuadrado de la velocidad, y se plantea el equilibrio entre la fuerza de fricción y la componente del peso del agua en la dirección del movimiento, se obtiene la siguiente ecuación para la velocidad media del agua en el canal:

$$V = \sqrt{8 g R S / f} \quad (2)$$

Esta ecuación se conoce con el nombre de Darcy-Weisbach, y sirve para el cálculo de tuberías y canales. En ella:

- g = Aceleración de la gravedad.
- R = Radio hidráulico
- S = Pendiente del canal
- f = Factor de fricción

El factor de fricción depende de la rugosidad absoluta de la pared, el radio hidráulico, y las características del flujo. El flujo en canales es generalmente de alta turbulencia. Por esta razón la experimentación se limitó a flujo turbulento con turbulencia total.

La experimentación se dirigió a obtener ecuaciones que permitan calcular el factor de fricción " f ", conocidas las características del canal.

Dada la similitud existente entre el flujo en tuberías y canales, muchos autores sugieren calcular el factor de fricción con la ecuación (1), tomando los coeficientes correspondientes a tuberías $a = 2.00$, $b = 1.14$.

Este trabajo se orientó a comprobar si el modelo matemático representado por la ecuación (1) es correcto y los coeficientes utilizados en tuberías son aplicables a canales.

2.1 Resumen de las experimentaciones efectuadas

La parte experimental de este trabajo se efectuó en tres etapas:

1. Canal rectangular con pendiente fija efectuado por Carlos Felipe Londoño y Juan Carlos Correa.

2. Canales trapezoidal y triangular con pendiente fija efectuado por Margarita María Arango y Carlos Mario Tamayo.
3. Canal rectangular con pendiente variable efectuado por Rodrigo Cano.

Para las dos primeras etapas se utilizaron las mismas instalaciones, compuestas por: Canal de sección rectangular con dimensiones: ancho 0.80 m, profundidad total 0.40 m, largo 14 m, pendiente 0,0256; construido en mampostería, y recubierto interiormente con mortero de cemento esmaltado y pulido a mano, para conseguir la superficie más lisa posible.

Estructura de entrada un tanque de dimensiones: ancho 0.80 m, largo 2.50 m, profundidad 1.30 m. El tanque se dividió en dos cámaras por una cortina aquietadora de cascajo colocado a 0.50 m, de la entrada. El agua entra al primer compartimiento por una tubería de 6", pasa al segundo compartimiento a través de la cortina de cascajo y luego entra al canal. Las condiciones de aquietamiento del flujo a la entrada del canal, conseguidas con esta estructura fueron óptimas.

En el extremo inferior, el canal derrama mediante caída libre a un tanque aquietador, y de allí el agua pasa a través de una cortina de cascajo a un tanque aforador con vertedero triangular de 120° . El vertedero se calibró con un tanque volumétrico de 22 m^3 de capacidad.

En la tercera etapa se utilizó un canal de pendiente variable y sección rectangular con dimensiones: ancho 0.40 m, largo 7.00 m. El canal está formado por una estructura de ángulo de acero, recubierto interiormente con lámina de acrílico transparente en paredes y fondo. El caudal se midió en un vertedero de sección trapezoidal, el cual se calibró primero por comparación con otros vertederos existentes en el laboratorio, y posteriormente con aforo volumétrico.

Los materiales utilizados en toda la experimentación, para reproducir la rugosidad, fueron arena y cascajo aluviales de cuarzo con redondez media. En la primera etapa se pegaron los cascajos y arenas directamente al fondo y paredes del canal mediante pegante de caucho. En la segunda y tercera etapa los materiales rugosos se pegaron a tableros de madera, que posteriormente se instalaban dentro de los canales, con la forma geométrica deseada para la sección transversal del canal.

Se utilizaron ocho granulometrías con tamaño entre 0.6 mm, y 19.1 mm.

2.2 Trabajos en Laboratorio

La parte inicial de la experimentación, se dedicó a definir tres parámetros acerca de los cuales no ha habido uniformidad de criterio entre los experimentadores anteriores que han estudiado este tema: Rugosidad equivalente, fondo de referencia y densidad de la rugosidad.

2.2.1 Rugosidad equivalente

El trabajo se orientó a experimentar en canales con rugosidad absoluta conocida; para ello se utilizaron cascajo y arena de origen aluvial. Un grano cualquiera de estos materiales presenta forma irregular y dimensiones diferentes según se mida; su forma puede aproximarse a un elipsoide. Para seleccionar los materiales se utilizó la serie de mallas estandar, utilizando la fracción que pasa por una malla y se retiene en la siguiente. Todo grano al caer trata de colocar su centro de gravedad lo más bajo posible, lo cual hace que en general su dimensión menor quede vertical. Con base en estas consideraciones se pegaron los granos al fondo del canal, y en varias secciones típicas se midió con la aguja de precisión (utilizando para medir el nivel del agua) la altura de todos los granos de la sección. Se calculó la altura promedio de los granos en cada sección y el promedio para todas las secciones medidas. Este valor promedio se comparó con el tamaño de los orificios de las mallas, y se encontró que en general coincide con el orificio de la malla que retiene.

Con base en esta consideración se tomó como tamaño del material el de la malla que retiene; no obstante se midió la altura de los granos en la forma indicada anteriormente, y cuando ésta difería del tamaño de la malla, se utilizó para los cálculos el valor medido.

Para todos los cálculos se toma como rugosidad absoluta del material la altura que éste sobresale del fondo: en a experimentación, medida como se indicó anteriormente; en aplicaciones a casos reales, medida como la parte que el grano sobresale del fondo, cuando está parcialmente sumergido en éste.

2.2.2 Fondo de referencia

Los investigadores que han estudiado anteriormente este tema no han estado de acuerdo con respecto al nivel a partir del cual se debe medir la profundidad del flujo. Unos proponen como nivel de referencia el fondo del canal, otros el plano paralelo al fondo que pasa por la cúspide de los granos, y otros varias posiciones intermedias.

Con el fin de estudiar y definir este nivel se calcularon correlaciones lineales con datos experimentales entre las variables $1/\sqrt{f}$ y $\log(4R/K)$, en donde f es el factor de fricción, R el radio hidráulico y K la rugosidad absoluta del material. Se tomaron varios planos de referencia para medir la profundidad y se encontró que la mejor correlación entre las variables se obtiene cuando el nivel de referencia coincide con el fondo físico del canal.

Posteriormente se colocó arena fina sobre el material rugoso del fondo del canal, se compactó hasta llenar todos los vacíos entre granos, y se puso el canal en funcionamiento. El agua, al fluir por el canal, rápidamente arrastró toda la arena colocada dentro de los granos. Lo anterior muestra la existencia de una corriente por dentro de los espacios de los granos. Esta experiencia y los cálculos numéricos indicados anteriormente, muestran que el nivel de la referencia debe ser el fondo del canal y que desde allí se debe medir la profundidad del agua.

2.2.3 Densidad y localización de la rugosidad

Investigadores anteriores encontraron que el factor de fricción varía con la posición relativa de los granos, y aumenta cuando crece la densidad de granos hasta un cierto valor; de allí en adelante permanece constante.

En esta experimentación los granos se colocan con agrupación densa y distribuidos al azar.

2.2.4 Mediciones en el canal

Se efectuaron las siguientes experimentaciones:

Canal con pendiente fija sección rectangular ensayos con 5 granulometrías: 19,1 mm, 12,3 mm, 4,8 mm, 3,5 mm y 1,19 mm.

Canal con la pendiente fija secciones triangulares y trapezoidal ensayos con 5 rugosidades: 19,1 mm, 12,3 mm, 4,8 mm, 2,25 mm y 0,6 mm.

Canal con pendiente variable sección rectangular ensayos con granulometría 11,08 mm.

La anterior da 15 canales experimentados con pendiente fija; en el canal de pendiente variable, se experimentaron 6 pendientes pero debido a que el canal es muy corto y las condiciones de entrada muy deficientes, no se pudo establecer flujo uniforme.

En total se experimentaron 21 canales. En cada canal se hicieron en promedio 11 corridas con caudales

variando entre 1 l/s y 120 l/s, para un total aproximado de 230 corridas.

En cada corrida se colocaron en el caudal de pendiente fija 5 secciones para medida de nivel de agua, y en el canal de pendiente variable 3 secciones.

En cada sección se midió el nivel del agua en el centro y en los medios de las zonas laterales. Se calculó la profundidad media para cada sección y de acuerdo con los valores obtenidos se decidió cuáles secciones se promediaban para calcular la profundidad media de la corrida. Algunas veces fue necesario ignorar la sección inicial o la final. Simultáneamente se midió el caudal en el vertedero de control.

Las formas estudiadas fueron: rectángulo de 0,8 mm de ancho, rectángulo de 0,39 m de ancho, trapecio con lados inclinados 1,0 horizontal por 1,0 vertical ancho de fondo 0,25 m, y triángulo con taludes a 45°.

El canal de pendiente fija tenía $S = 0,0256$, el de pendiente variable trabajó con pendiente entre 0.010 y 0,120.

2.3 Cálculos

Con los valores medidos en el laboratorio se calculó para cada canal:

$$1/\sqrt{f} = Q / (A \sqrt{8 g R S}) \quad (3)$$

En donde Q es el caudal, A área transversal, g aceleración de la gravedad, R radio hidráulico, y S pendiente del canal. Cálculos teóricos y mediciones experimentales efectuados en el Departamento de física de la Universidad Nacional, Seccional Medellín, por el Profesor Jorge Alberto Naranjo dan $g = 9,78 \text{ m/s}^2$ para Medellín, valor que se utilizó en todos los cálculos.

$$\alpha = 4 R / K \quad (4)$$

En donde K = rugosidad absoluta del material

$$F = Q / (A \sqrt{g \cdot D}) \quad (5)$$

En donde D es la profundidad hidráulica, F número de Froude.

$$n = (AR^{2/3} S^{1/2}) / Q \quad (6)$$

En donde n es el coeficiente de fricción de Manning. Se hizo ajuste por mínimos cuadrados entre

las variables $1/\sqrt{f}$ y $\log \alpha$, para obtener ecuaciones de la forma

$$1/\sqrt{f} = b + a \log \alpha \quad (1)$$

Para todos los canales estudiados la correlación entre variables $1/\sqrt{f}$ y $\log \alpha$ fue casi perfecta con coeficientes de correlación muy cercanos a la unidad.

Los cálculos y gráficos mostraron la existencia de una correlación lineal entre las variables estudiadas; se observó que $1/\sqrt{f}$ crece al aumentar $\log \alpha$, pero cuan-

do el número Froude alcanza un cierto valor, en forma súbita $1/\sqrt{f}$ se vuelve constante lo cual indica un cambio de régimen en el flujo.

Los cuadros N° 1 al N° 10 presentan los cálculos canales rectangular y trapezoidal con pendiente fija. Se experimentó en un canal de pendiente variable con ancho 0,40 m, sección rectangular y longitud 7 m, pero no se pudo obtener flujo uniforme porque las condiciones de entrada eran muy deficientes y el canal muy corto; en este canal se puede demostrar el cambio de régimen de flujo para rugosidad absoluta 11,08 mm.

CUADRO N° 1

NUM.	SECCION RECTANGULAR					
	ANCHO = 8 M	RUGOSIDAD = 19.1 MM	PENDIENTE = .0256			
	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	5.74E-03	.0379	.720036	7.243	.312	.08962
2	.01111	.0471	1.015541	8.821	.436	.06567
3	.01957	.0584	1.312402	10.666	.556	.05245
4	.02942	.0706	1.503689	12.561	.629	.04704
5	.04312	.0837	1.728931	14.498	.713	.0419
6	.05413	.0935	1.858536	15.866	.759	.03957
7	.06629	.1038	1.964309	17.262	.794	.03797
8	.09164	.1235	2.132525	19.767	.845	.03577
9	.10523	.1338	2.194668	20.993	.862	.03511
	a = 3.2045761	b = - 2.01268057	CORRELACION = .999142211	b/a = - .62767279		

CUADRO N° 2

NUM.	SECCION RECTANGULAR					
	ANCHO = 8 M	RUGOSIDAD = 12.3 MM	PENDIENTE = .0256			
	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	5.25E-03	.0306	.897934	9.25	.392	.06956
2	7.56E-03	.0349	1.067884	10.439	.464	.05968
3	8.69E-03	.037	1.128095	11.008	.489	.057
4	.012	.0418	1.302487	12.313	.562	.0503
5	.0194	.0515	1.55589	14.848	.664	.04344
6	.02833	.0607	1.794788	17.144	.758	.03857
7	.03356	.0657	1.900035	18.347	.799	.03685
8	.03701	.0693	1.942441	19.199	.813	.03632
9	.04202	.0739	2.01007	20.29	.837	.03542
10	.04711	.0786	2.063944	21.372	.856	.0348
11	.05193	.0833	2.097743	22.416	.865	.03451
12	.05902	.0887	2.180432	23.614	.895	.03349
13	.06701	.0956	2.227456	25.101	.907	.03312
14	.07293	.1006	2.257769	26.145	.915	.0329
15	.08075	.1047	2.364747	26.985	.955	.03157
16	.09164	.1132	2.405975	28.701	.963	.03135
17	.10242	.1205	2.467516	30.111	.981	.03082
	a = 3.06997079	b = - 2.0407453	CORRELACION = .997786956	b/a = - .664744208		

CUADRO N° 3

SECCION RECTANGULAR RUGOSIDAD = 4.8 MM PENDIENTE = .0256						
ANCHO = 8 M						
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	4.42E-03	.0181	1.639042	14.43	.727	.03508
2	6.79E-03	.0222	1.862709	17.527	.822	.03189
3	0.1111	.0279	2.183573	21.698	.957	.02819
4	.01644	.034	2.412537	26.114	1.05	.02631
5	.01888	.037	2.453815	28.188	1.065	.0262
6	.0244	.0419	2.641049	31.606	1.139	.02481
7	.02811	.0456	2.693251	34.095	1.157	.02464
8	.0338	.0497	2.858939	36.823	1.223	.02351
9	.03934	.0546	2.901479	40.051	1.234	.02349
10	.04566	.0593	2.992593	43.037	1.266	.02305
11	.05349	.0649	3.080569	46.533	1.296	.02269
12	.06593	.0737	3.167227	51.861	1.32	.02247
13	.07955	.0825	3.257915	56.98	1.345	.02219
14	.08948	.0886	3.313374	60.431	1.36	.02203
15	.09694	.0929	3.355368	62.839	1.371	.0219
16	.10808	.1001	3.372656	66.693	1.368	.02201

a = 2.64684402

b = -1.37129391

CORRELACION = .99638864

b/a = -.518086408

CUADRO N° 4

SECCION RECTANGULAR RUGOSIDAD = 3.5 MM PENDIENTE = .0256						
ANCHO = 8 M						
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	4.86E-03	.0173	1.930928	18.926	.857	.02956
2	8.48E-03	.0229	2.225901	24.729	.982	.02681
3	.01506	.0306	2.584435	32.437	1.13	.02416
4	.02209	.0378	2.780098	39.446	1.205	.0232
5	.02811	.0429	2.945158	44.233	1.269	.02233
6	.03551	.0494	3.029982	50.228	1.296	.02217
7	.04256	.0549	3.120444	55.126	1.327	.02186
8	.04829	.0591	3.180352	58.848	1.346	.02168
9	.05318	.0625	3.232435	61.776	1.363	.02151
10	.06139	.0681	3.304054	66.464	1.385	.0213
11	.06993	.0732	3.39537	70.675	1.416	.02094
12	.07757	.0778	3.453736	74.396	1.433	.02076
13	.08991	.0848	3.543259	79.923	1.46	.02048
14	.09829	.0894	3.590952	83.527	1.472	.02036
15	.10713	.0942	3.640455	87.099	1.485	.02022

a = 2.52941282

b = -1.27559331

CORRELACION = .998814538

b/a = -.504304121

CUADRO N° 5

NUM.	SECCION RECTANGULAR					
	ANCHO = .8 M	RUGOSIDAD = 1.19 MM		PENDIENTE = .0256		
	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	2.57E-03	9.5E-03	2.499951	31.032	1.121	.02071
2	5.57E-03	.0148	2.7755	48.051	1.236	.02007
3	8.48E-03	.0184	3.069097	59.129	1.361	.01879
4	.01175	.022	3.272152	70.019	1.445	.01812
5	.01755	.0279	3.435712	87.74	1.506	.01792
6	.02284	.0322	3.629111	100.171	1.583	.01735
7	.02942	.037	3.812403	113.91	1.654	.01687
8	.03551	.0415	3.89753	126.384	1.682	.01679
9	.04257	.0464	3.980269	139.62	1.709	.01672
10	.051	.0518	4.066299	154.023	1.735	.01663
11	.06173	.0584	4.138205	171.23	1.753	.01663
12	.0718	.064	4.216153	185.516	1.775	.01655
13	.07717	.0673	4.221821	193.577	1.771	.01664
a = 2.30935256 b = -1.00472603 CORRELACION = .996223888 b/a = -.435068272						

CUADRO N° 6

NUM.	SECCION TRAPEZOIDAL					
	ANCHO = .236 M	RUGOSIDAD = 19.1 MM		PENDIENTE = .0256		
	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	3.8E-03	.0517	.910247	8.136	.39	.07228
2	5.01E-03	.0559	1.056308	8.674	.451	.06295
3	7.66E-03	.0682	1.175114	10.13	.498	.05807
4	.01506	.0866	1.56278	12.17	.656	.04502
5	.02601	.1126	1.736869	14.838	.721	.04187
6	.03526	.1264	1.927779	16.194	.797	.03828
7	.04566	.1391	2.113982	17.392	.87	.03532
8	.0554	.1519	2.192994	18.59	.9	.03443
9	.06416	.1626	2.247832	19.575	.92	.03388
10	.07217	.1723	2.279694	20.438	.931	.03365
a = 3.48063695 b = -2.2586967 CORRELACION = .995718175 a/b = -.648932						

CUADRO N° 7

SECCION TRAPEZOIDAL						
RUGOSIDAD = 12.3 MM : PENDIENTE = .0256						
ANCHO = .247 M						
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	2.95E-03	.0359	1.200917	9.473	.521	.05222
2	4.07E-03	.0422	1.290572	10.824	.557	.04968
3	5.74E-03	.0488	1.449441	12.186	.622	.04512
4	7.46E-03	.0539	1.610583	13.199	.689	.04115
5	9.8E-03	.0602	1.779434	14.389	.758	.03778
6	0.1334	.0698	1.905971	16.182	.807	.03597
7	0.1821	.0818	2.01169	18.286	.846	.03478
8	.02117	.0869	2.120711	19.139	.889	.03325
9	.0256	.0947	2.223567	20.436	.929	.03206
10	.03168	.1047	2.330286	22.033	.97	.03098
11	.03752	.1125	2.444171	23.264	1.014	.0298
12	.05349	.1338	2.587456	26.508	1.066	.02877
13	.076	.1569	2.785836	29.849	1.14	.02726
a = 3.25723427 b = - 2.040591 CORRELACION = .997469624 b/a = - .526479653						

CUADRO N° 8

SECCION TRAPEZOIDAL						
RUGOSIDAD = 4.8 MM PENDIENTE = .0256						
ANCHO = .268 M						
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	3.86E-03	.0289	2.035374	20.369	.892	.02992
2	5.5E-03	.0354	2.124812	24.213	.925	.0295
3	6.98E-03	.039	2.317745	26.292	1.006	.02742
4	8.71E-03	.0435	2.434559	28.841	1.053	.02651
5	.01213	.052	2.575192	33.289	1.107	.02567
6	.01707	.0622	2.724709	38.465	1.164	.02485
7	.02135	.0698	2.83461	42.132	1.205	.02425
8	.0251	.0758	2.91865	44.929	1.237	.02381
9	.03502	.0895	3.103433	51.113	1.307	.02288
10	.04918	.1065	3.27103	58.33	1.367	.02219
11	.05835	.1172	3.304712	62.701	1.376	.02223
12	.06993	.1274	3.436303	66.782	1.426	.0216
13	.08319	.1383	3.555026	70.993	1.47	.02109
a = 2.79559159 b = - 1.67734452 CORRELACION = .997240785 b/a = - .599996269						

CUADRO N° 9

SECCION TRAPEZOIDAL RUGOSIDAD = 2.25 MM						
ANCHO = .244 M			PENDIENTE = .0256			
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	2.78E-03	.0218	2.468867	33.61	1.086	.02363
2	3.87E-03	.0262	2.586194	39.537	1.132	.02318
3	4.71E-03	.288	2.722902	42.894	1.189	.02232
4	6.16E-03	.0335	2.830722	48.68	1.231	.02193
5	7.76E-03	.038	2.93669	54.057	1.271	.02151
6	.01051	.044	3.156822	61.078	1.36	.02042
7	.01419	.0523	3.256916	70.145	1.394	.02025
8	.01788	.0596	3.333249	77.84	1.419	.02014
9	.02209	.0662	3.483267	84.515	1.477	.01953
10	.03009	.0774	3.684984	95.377	1.552	.01884
11	.04066	.0914	3.787875	108.35	1.584	.01872
12	.05224	.1048	3.872758	120.182	1.611	.01863
13	.06346	.1171	3.899935	130.632	1.614	.01876
14	.07915	.1332	3.898841	143.883	1.605	.01907
a = 2.48991151		b = -1.34309746	CORRELACION = .99369343		b/a = -.539415739	

CUADRO N° 10

SECCION TRAPEZOIDAL RUGOSIDAD = .6 MM						
ANCHO = .24 M			PENDIENTE = .0256			
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	3.61E-03	.0197	3.778822	115.511	1.666	.01522
2	5.74E-03	.0255	4.064944	144.606	1.78	.01469
3	8.48E-03	.0323	4.17789	176.967	1.817	.01478
4	.01227	.04	4.349296	211.266	1.878	.01462
5	.01675	.0479	4.467974	245.02	1.917	.01459
a = 2.04242955		b = -.401020519	CORRELACION = .992493584		b/a = -.196344848	

En los cuadros referidos anteriormente la columna N° 1 presenta el número de ensayo, la N° 2 el caudal, N° 3 la profundidad media, N° 4 el factor $1/\sqrt{f}$, N° 5 el factor α , N° 6 número de Froude, y N° 7 coeficiente de n Manning.

Estos cuadros excluyeron los puntos experimentales que produjeron $1/\sqrt{f}$ constante para no afectar los coeficientes a y b de las regresiones. Los cuadros N° 15 al N° 17 presentan los cálculos con todos los puntos experimentados, allí se aprecia el cambio de régimen de flujo.

3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con base en planteamientos teóricos es posible obtener la ecuación:

$$1/\sqrt{f} = \frac{l_{n 10}}{C\sqrt{8}} \log(4R/K) + \frac{l_{n 10}}{C\sqrt{8}} \log\left(\frac{Y}{Y^0} \times \frac{K}{4R} e^{-(1+\delta)Y^2/4A}\right) \quad (7)$$

En donde:

- c = Coeficiente de turbulencia de Von Karman.
 R = Radio hidráulico.
 K = Rugosidad del material.
 y = Profundidad de flujo en el canal.
 y₀ = Profundidad para la cual la velocidad es cero.
 δ = Factor de forma de la sección.
 A = Area de la sección del canal.
 e = Base de los logaritmos naturales.

Por comparación de las ecuaciones (1) y (7) se obtiene:

$$a = \ln 10 / (c \sqrt{8}) \quad (8)$$

$$b = \ln 10 / (c \sqrt{8}) \times \log \left(\frac{Y}{Y_0} \times \frac{K}{4R} e^{-(1+\delta) Y^2 / 4A} \right) \quad (9)$$

Las ecuaciones (8) y (9) muestran que el coeficiente "a" es función únicamente del coeficiente de turbulencia de Von Karman. El coeficiente "b" es función de a, de la rugosidad, porque $Y / (4 Y_0 R)$ es aproximadamente constante, y de la forma del canal.

La ecuación (9) puede transformarse a

$$b = a \log \left(\frac{Y}{Y_0} \times \frac{K}{4R} e^{-(1+Y/R)/2} \right) \quad (10)$$

Esta ecuación muestra que b es una función de a y de la rugosidad absoluta, porque Y/R varía muy poco al variar la profundidad.

3.1 Cálculos de Ecuaciones para los Coeficientes a y b

El Cuadro N° 11 presenta los valores de a y b calculados para los canales experimentados con pendiente fija.

El valor de a crece al aumentar la rugosidad absoluta, el valor de b es siempre negativo y su valor absoluto crece al aumentar la rugosidad.

"a" solamente toma valores cercanos a 2 para la rugosidad menor experimentada. "b" no se acerca al 1,14 en ningún caso. Esto muestra un comportamiento diferente, al obtenido en tuberías según las experiencias de Nikuradse.

3.1.1 El coeficiente a

Los valores experimentales obtenidos muestran que a es función de la rugosidad absoluta; se estudiaron varios modelos matemáticos para la función $a = F(K)$. Se tomó como criterio de selección el mayor índice de correlación lineal y el menor error absoluto promedio. El error se definió con la ecuación:

$$i = ((a_i - \bar{a}) / \bar{a}) \times 100 \quad (11)$$

CUADRO N° 11

K mm	Rectángulo		Trapezio	
	a	b	a	b
19,1	3,2065761	- 2,01268057	3,48063695	- 2,2586967
12,3	3,06997079	- 2,0407453	3,25723427	- 2,040591
4,8	2,64684402	- 1,37129391	2,79559159	- 1,67734452
3,5	2,52941282	- 1,27559331		
2,25			2,48991151	- 1,34309746
1,19	2,30935256	- 1,00472603		
0,60			2,04242955	- 0,401020519

En donde a_i es el valor calculado con las medidas experimentales y a_i el valor calculado con la función. Como los valores de e_i son positivos y negativos, se tomó su valor absoluto para calcular el error promedio.

Para la misma rugosidad los valores de a de las secciones rectangulares y trapezoidal son muy similares, pero los de la triangular difieren de los anteriores, para calcular la función $a = f(K)$ se utilizaron los valores de a de las secciones rectangulares y trapezoidal cuando existen las dos medidas para una misma rugosidad.

El Cuadro N° 12 presenta los valores de a utilizando para calcular la regresión lineal.

El mejor modelo matemático de los estudios fue: $a = \log n + m \log K$, el cual produjo la función:

$$a = 5,779811 K^{0,139633} \quad (12)$$

coeficiente de correlación lineal 0,993815, error absoluto promedio 1,39%. En esta función K es la rugosidad absoluta, se expresa en metros.

3.1.2 El coeficiente b

Los valores que aparecen en el Cuadro N° 11 muestran que el coeficiente b es negativo y su valor absoluto tiene un amplio rango de variación.

La ecuación (10) muestra que b es igual a a multiplicado por un factor función de la forma y la rugosidad absoluta. Para estudiar este último factor se calculó la variable b_o definida por la ecuación:

$$b_o = b/a \quad (13)$$

El Cuadro N° 13 presenta los valores de b_o para las diferentes granulometrías estudiadas en las secciones rectangular y trapezoidal con pendiente fija. Se tomó el valor promedio de b_o para las secciones rectangular y trapezoidal, cuando se calcularon los dos valores para una misma rugosidad.

Al final de la experimentación se trabajó con el canal de pendiente fija sección rectangular, con el fondo y paredes en mortero pulido sin arenas; como para este canal no se conoce la rugosidad absoluta, se supuso un valor inicial para ésta, y se calculó la regresión de $1/\sqrt{f} = a \log \alpha + b$. Al variar la rugosidad supuesta en esta regresión, varía b pero a permanece constante; con el valor obtenido para a y la ecuación (12) se calculó $k = 0,14$ mm, valor muy adecuado a esta superficie. Se repitió la regresión de los valores experimentales con $K = 0,14$ mm y se obtuvo el valor de b_o para esta rugosidad que aparece en los Cuadros 13 y 14.

Se estudiaron varios modelos matemáticos para relacionar los valores de b_o y K del Cuadro N° 13, se consiguió un buen modelo que relaciona los 7 puntos de

CUADRO N° 12

K	=	19,1	12,3	4,8	3,5	mm
a	=	3,3436065	3,16360253	2,72121781	2,52941282	
K	=	2,75	1,19	0,6		mm
a	=	2,48991151	2,30935256	2,04242955		

CUADRO N° 13

K	19,1	12,3	4,8	3,5
b_o	- 0,63830240	- 0,64561193	- 0,55904134	- 0,50434121
K	2,25	1,19	0,6	0,14
b_o	- 0,539415739	- 0,435068272	- 0,19644848	- 0,106061819

rugosidad mayor; al tratar de incluir el punto con la rugosidad 0,14 mm la curva de regresión se aparta mucho de varios puntos experimentales. La función obtenida para los primeros 7 puntos es:

$$bo = -0,891719 - 0,139138 \log (K - 0,00059) \quad (14)$$

En esta función K está en metros.

El coeficiente de correlación es 0,988937 y el error absoluto promedio 3,03%.

Para rugosidad entre 0,60 mm y 0,14 mm puede obtenerse el valor de bo por interpolación lineal entre los valores calculados para estas rugosidades, los cuales aparecen en el Cuadro N° 13.

La ecuación para calcular bo puede transformarse a

$$bo = -\log (7,793436 (K - 0,00059)^{0,139138})$$

El exponente de K en esta ecuación es aproximadamente igual al de K en la ecuación para calcular a; tomando estos dos exponentes como iguales, e ignorando la corrección de K, se puede transformar la ecuación de bo a la forma;

$$bo = -\log (1,348a) \quad (15)$$

Para una mejor coincidencia con los valores experimentales, se modifica el coeficiente de a en la ecuación anterior, y se obtiene la ecuación

$$bo = -\log (1,34a) \quad (16)$$

Esta ecuación puede utilizarse para calcular bo con rugosidades iguales o mayores a 2 mm; para rugosidades menores produce mucho error.

3.2 Coeficiente de Turbulencia de Von Karman

Con la ecuación (8) se puede despejar:

$$c = \ln 10 / (a \sqrt{8})$$

Al reemplazar la ecuación (12) en la ecuación (8) y simplificar se obtiene:

$$c = 0,14085 K^{-0,139633} \quad (17)$$

La ecuación (17) permite calcular el coeficiente de turbulencia de Von Karman, utilizando la rugosidad absoluta expresada en metros. Si se toma $c = 0,4$ en esta ecuación, se obtiene $K = 0,57$ mm; este valor es ligeramente inferior a 0,60 mm tamaño de la arena más pequeña utilizada en la experimentación.

La ecuación (17) muestra que la llamada constante de turbulencia de Von Karman, es realmente una variable con amplio rango de variación, por esta razón se propone el nombre de "Coeficiente de turbulencia" para esta variable.

3.3 Coeficiente de Rugosidad de Manning

En los Cuadros N° 1 a N° 10 y N° 14 a N° 17 aparece el coeficiente de rugosidad de la fórmula de Manning, calculados con base en los datos de las experimentaciones.

CUADRO N° 14

SECCION RECTANGULAR						
ANCHO = .8 M RUGOSIDAD = .14 MM PENDIENTE = .0256						
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	8.91E-03	.0155	4.143137	427.219	1.843	.01354
2	.01149	.0178	4.355303	487.777	1.932	.01317
3	.01691	.0224	4.568016	606.915	2.016	.01302
4	.02284	.0269	4.732244	719.306	2.077	.01293
5	.03122	.0333	4.722876	878.309	2.058	.0134
6	.04174	.0401	4.821503	1040.535	2.085	.0135
7	.051	.045	4.971769	1156.468	2.137	.01332
a = 1.67952065 b = -.178133016 CORRELACION = .964549995 b/a = -.106061819						

CUADRO N° 15

SECCION TRAPEZOIDAL RUGOSIDAD = .6 MM						
ANCHO = .24 M						
PENDIENTE = .0256						
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	3.61E-03	.0197	3.778822	115.511	1.666	.01522
2	5.74E-03	.0255	4.064944	144.606	1.78	.01469
3	8.48E-03	.0323	4.17789	176.967	1.817	.01478
4	.01227	.04	4.349296	211.266	1.878	.01462
5	.01675	.0479	4.467974	245.02	1.917	.01459
6	.02303	.0585	4.482673	287.187	1.908	.01493
7	.03122	.0702	4.538084	331.096	1.917	.0151
8	.04174	.0842	4.520324	380.388	1.895	.01552
9	.05224	.0962	4.533202	421.093	1.89	.01574
10	.06228	.1068	4.538877	455.483	1.884	.01593
11	.07384	.1184	4.518161	492.104	1.867	.01621
12	.09164	.1336	4.55317	538.768	1.872	.01633
a = 1.01561021 b = - 1.8845265 CORRELACION = .905938585 b/a = - 1.85556081						

CUADRO N° 16

SECCION RECTANGULAR RUGOSIDAD = 1.19 MM						
ANCHO = .8 M						
PENDIENTE = .0256						
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	2.57E-03	9.5E-03	2.499951	31.032	1.121	.02071
2	5.57E-03	.0148	2.7755	48.051	1.236	.02007
3	8.48E-03	.0184	3.069097	59.129	1.361	.01879
4	.01175	.022	3.272152	70.019	1.445	.01812
5	.01755	.0279	3.435712	87.74	1.506	.01792
6	.02284	.0322	3.629111	100.171	1.583	.01735
7	.02942	.037	3.812403	113.91	1.654	.01687
8	.03551	.0415	3.89753	126.384	1.682	.01679
9	.04257	.0464	3.980269	139.62	1.709	.01672
10	.051	.0518	4.066299	154.023	1.735	.01663
11	.06173	.0584	4.138205	171.23	1.753	.01663
12	.0718	.064	4.216153	185.516	1.775	.01655
13	.07717	.0673	4.221821	193.577	1.771	.01664
14	.08336	.071	4.22517	202.619	1.766	.01675
15	.09207	.076	4.231984	214.733	1.759	.01689
16	.10808	.0851	4.238115	235.755	1.745	.01713
a = 2.1725374 b = -.752425049 CORRELACION = .991264803 b/a = -.346334682						

CUADRO N° 17

SECCION RECTANGULAR RUGOSIDAD = .14 MM PENDIENTE = .0256						
ANCHO = .8 M						
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	8.91E-03	.0155	4.143137	427.219	1.843	.01354
2	.01149	.0178	4.355303	487.777	1.932	.01317
3	.01691	.0224	4.568016	606.915	2.016	.01302
4	.02284	.0269	4.732244	719.306	2.077	.01293
5	.03122	.0333	4.722876	878.309	2.058	.0134
6	.04174	.0401	4.821500	1040.535	2.085	.0135
7	.051	.045	4.971769	1156.468	2.137	.01332
8	.06207	.0523	4.878513	1320.755	2.081	.01382
9	.07446	.0582	5.00904	1452.369	2.122	.01374
10	.0882	.0661	4.951817	1620.042	2.08	.01415
11	.10242	.0746	4.83907	1795.723	2.015	.01472
a = 1.15676367		b = - 1.28480524	CORRELACION = .904132424		b/a = - 1.11068948	

El análisis de estos valores muestra que para un canal dado, el coeficiente n no es constante, presenta valores altos para profundidades pequeñas y va disminuyendo al aumentar la profundidad hasta alcanzar un valor mínimo aproximadamente constante. Para canales con rugosidad muy baja el valor de n crece al aumentar la profundidad, después de alcanzar el valor mínimo.

Con las ecuaciones de Chezy, Darcy-Weisbach y Manning se puede obtener la siguiente relación:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (18)$$

La relación anterior permite despejar el coeficiente de Manning.

$$n = \frac{(R/K)^{1/6} \sqrt{f}}{\sqrt{8g}} \times K^{1/6} \quad (19)$$

Con las ecuaciones (1), (12), (14) y (19) se puede calcular el coeficiente de Manning para un canal con una rugosidad K conocida. Esta ecuación es muy similar a la obtenida por Strickler para canales aluviales con base en experimentaciones en ríos de Suiza.

$$n = 0,0342 K^{1/6} \quad (20)$$

En la ecuación (19) K está en metros, en la (20) en pies.

Al aplicar las ecuaciones (19) y (20) a varios ejemplos de canales se obtuvo que: la ecuación (19) produce un valor de n que varía con R , K , toma altos valores para R pequeño y disminuye al aumentar esta variable hasta tomar un valor aproximadamente constante para una rugosidad y canal dados.

La ecuación (20) produce un valor n constante para una rugosidad dada, independiente de la forma, tamaño y profundidad del canal.

Los resultados de la ecuación (19) presentan una variación que corresponde a la obtenida con la experimentación.

Para los canales pequeños como los utilizados en el laboratorio el n calculado con la ecuación (19) es siempre mayor que el calculado con la (20). Para canales medios y grandes como los utilizados para conducir quebradas y ríos, los valores de n calculados con las ecuaciones 19 y 20 son muy similares, para $\alpha < 70$ la ecuación 19 da valores mayores que la (20); al aumentar α se invierte la relación.

La ecuación 18 presenta una forma más simple para calcular n .

3.4 Cambio de régimen de flujo

Al estudiar la correlación entre $1/\sqrt{f}$ y $\log \alpha$, con base en los datos experimentales, se encuentra que a partir de cierto valor de α , $1/\sqrt{f}$ toma en forma

súbita un valor aproximadamente constante. Este fenómeno se observó en el canal rectangular de pendiente fija con rugosidad 0,14 mm, Cuadro N° 17, canal trapezoidal de pendiente fija con rugosidad 0,60 mm, Cuadro N° 15, canal rectangular de pendiente fija con rugosidad 1,19 mm, y Cuadro N° 16, canal rectangular de

pendiente variable con 11% y rugosidad 11,08 mm, Cuadro N° 18. El mismo fenómeno se observó en otros trabajos experimentales efectuados en el canal de pendiente variable con elementos en el fondo de alta rugosidad y utilizando grandes pendientes.

CUADRO N° 18

ANCHO = .389 M		SECCION RECTANGULAR RUGOSIDAD = 11.08 MM		PENDIENTE = .1136		
NUM.	Q M3/S	YM M	FACTOR	ALFA	FROUDE	MANNING
1	7.02E-03	.0327	1.107932	10.104	.979	.05623
2	.01274	.0392	1.553705	11.775	1.354	.04113
3	.0209	.0531	1.666317	15.043	1.411	.03995
4	.03113	.0626	1.975471	17.081	1.641	.03442
5	.03762	.0701	2.041555	18.596	1.672	.03378
6	.04353	.0734	2.220555	19.222	1.807	.03123
7	.05436	.0843	2.296268	21.223	1.832	.0307
8	.05685	.0897	2.210629	22.144	1.747	.03212
9	.06192	.0939	2.262912	22.852	1.775	.03154
a = 3.17957305		b = - 1.98455295	CORRELACIÓN = .973093637		b/a = - .624157057	

Este fenómeno muestra un cambio en el régimen de flujo, que se produce cuando la longitud de los vórtices de turbulencia generados en cada elemento rugoso alcanza a los vórtices creados por el siguiente elemento rugoso; de ahí en adelante la superficie del canal queda cubierta por una "manta de vórtices de turbulencia" y el coeficiente de fricción permanece aproximadamente constante.

Cuando el coeficiente de fricción "f" se hace constante el coeficiente C de la ecuación de Chezy se hace constante; lo anterior indica que en este nuevo régimen de flujo que se propone denominar "rápido" la ecuación de Chezy es exactamente válida, en cambio la ecuación de Manning y las de otros autores, que dan coeficiente de Chezy C creciente con el radio hidráulico, dan valores para la velocidad mayores de los reales.

El punto a partir del cual se produce el cambio de régimen de flujo es función del número de Froude y la rugosidad absoluta; el Cuadro N° 19 presenta los números de Froude a partir de los cuales se produjo este cambio.

CUADRO N° 19

Rugosidad	0,14	0,60	1,19	mm
Número de Froude	2,14	1,92	1,77	:

Con los valores del cuadro anterior se obtuvo la función:

$$F = 1,813 K - 0,086486 \quad (21)$$

Con coeficiente de correlación $r = 0,992493$ y error absoluto promedio 0,88%, en esta función la rugosidad está en milímetros, pero se requiere más experimentación para limitar este cambio de régimen de flujo.

4. CONCLUSIONES

Se hizo un estudio experimental de la ecuación conocida como de Darcy-Weisbach, para el cálculo del flujo uniforme en canales. El estudio experimental se hizo en canales de sección rectangular y trapezoidal con rugosidad absoluta variando entre 0,14 mm y 19,1 mm.

Se utilizó inicialmente un canal de 14 m, de largo y de pendiente constante 2,56%; también se utilizó un canal de pendiente variable y 7 m, de largo, pero en este último no se pudo establecer flujo uniforme por deficiencias en las condiciones de entrada y longitud muy corta.

Con base en los datos de laboratorio se estudió el coeficiente de fricción f y se encontró una buena corre-

lación entre este factor y ∞ , asociados con la ecuación 1. Igualmente se identificó un cambio en el régimen de flujo para números de Froude cercanos a 2; a partir de este cambio de régimen se produce un flujo "rápido" y el coeficiente C de la ecuación de Chezy toma un valor constante para un canal dado.

La velocidad media de flujo uniforme, se calcula con la ecuación:

$$V = \sqrt{8/f} \times V_f$$

El factor de fricción f puede calcularse con las ecuaciones:

$$1/\sqrt{f} = a (b_0 + \log \infty) \quad (22)$$

$$a = 5,779811 K^{0,139633} \quad (12)$$

$$K \geq 0,60 \text{ mm } b_0 = -0,891729 - 0,139138 \log (K - 0,00059) \quad (14)$$

$$K = 0,60 \text{ mm } b_0 = -0,196345 ; K = 0,14 \text{ mm } b_0 = -0,106062$$

$$\infty = 4 R / K \quad (4)$$

Para rugosidades absolutas iguales o mayores de 2 mm el factor de fricción f se puede calcular con la ecuación:

$$1/\sqrt{f} = a (-\log (1,34 a) + \log \infty) \quad (23)$$

El coeficiente de turbulencia de la ecuación de Von Karman puede calcularse con la ecuación:

$$c = 0,14085 K^{-0,139633} \quad (17)$$

El coeficiente de fricción n de la ecuación de Manning puede calcularse con la ecuación:

$$n = \frac{R^{1/6}}{C} \quad (18)$$

En las ecuaciones anteriores la rugosidad absoluta K se expresa en metros.

El cambio de régimen a flujo rápido con factor de fricción constante se produce cuando el número de Froude alcanza el valor:

$$F = 1,813 K^{-0,086486} \quad (21)$$

En esta ecuación la rugosidad absoluta está en milímetros.

Esta investigación sólo llegó hasta la frontera donde se indica el flujo rápido, se recomienda hacer investigación dentro del régimen de flujo rápido, para conocer mejor su comportamiento.

BIBLIOGRAFIA

1. ABU. M.Z. ALAM, y JOHN F. KENNEDY. "Friction Factors for flow in sand-bed Channels".
2. A.G. MIRAJGAOKER y K.L.N. CHARLU. "Natural Roughness in rigid open Channels".
3. ANDREW L. SIMON, T. BLENCH, y C.R. NEILL. "Friction Factors in open Channels", discusion.
4. ASCE. "Friction Factors in open channels". Reporte de la comisión de trabajo compuesta por: R.W. Carter, H.A. Einstein, Julian Hinds, R.W. Powell, y E. Silberman.
5. DONALD W. KNIGHT, y J. ALASDAIR. MACDONALD. "Hydraulic resistance of artificial strip roughness".
6. E.M. O'LOUGHLIN, y E.G. MACDONALD. "Some roughness concentration effects on boundary resistance".
7. GEORGE FLEMING, y THOMAS POODLE. "Particle size river sediment".
8. HUNTER ROUSE. "History of hydraulics".
9. HUNTER ROUSE. "Critical Analysis of open-channel resistance".
10. PHILIPS FORCHHEIMER. "Tratado de hidráulica".
11. R.M. ADVANI, M.S. MISRA, HSIEH WEH SHEN, P.J. TILP, y M.W. SCRIVNER. "Friction Factors in open Channels"; discusion.
12. R. PYLE, y P. NOVAK. "Coefficient of Friction in conduits with large roughness".
13. R. SMUTEK. "Friction factors in open Channels"; discusion.
14. VEN TE CHOW. "Open-Channels Hydraulics".