



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**APUNTES SOBRE EL CURSO DE HIDRÁULICA DE CANALES Y EJERCICIOS CON
HOJAS DE CÁLCULO**

Richar Makcley Yat Bol

Asesorado por el Ing. Carlos Salvador Gordillo

Guatemala, mayo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APUNTES SOBRE EL CURSO DE HIDRÁULICA DE CANALES Y EJERCICIOS CON
HOJAS DE CÁLCULO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

RICHAR MAKCLEY YAT BOL

ASESORADO POR EL ING. CARLOS SALVADOR GORDILLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Velásquez
EXAMINADORA	Inga. Karla Giovanna Pérez Loarca
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

APUNTES SOBRE EL CURSO DE HIDRÁULICA DE CANALES Y EJERCICIOS CON HOJAS DE CÁLCULO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha 7 de mayo de 2018.



Richard Makcley Yat Bol

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 30 de septiembre de 2019

Ingeniero
Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Aguilar:

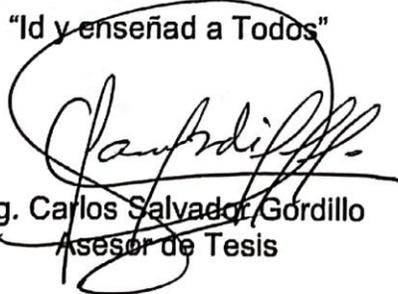
Atentamente le informo que he revisado el Trabajo de Graduación del estudiante universitario **RICHAR MAKCLEY YAT BOL**, quien se identifica con el número de DPI-2098-72128-1610 y registro académico No. Carnet: 2013-42088, denominado "APUNTES SOBRE EL CURSO DE HIDRAULICA DE CANALES Y EJERCICIOS CON HOJAS DE CÁLCULO", habiéndose desarrollado según el protocolo aprobado.

Deseo manifestar que el estudiante Makcley ha llenado las expectativas de este trabajo, permitiéndole obtener un trabajo de calidad y aplicación en el curso de Hidráulica de Canales de ésta Escuela, por lo que en mi calidad de asesor lo doy por aprobado y le solicito darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular me es grato saludarle,

Deferentemente,

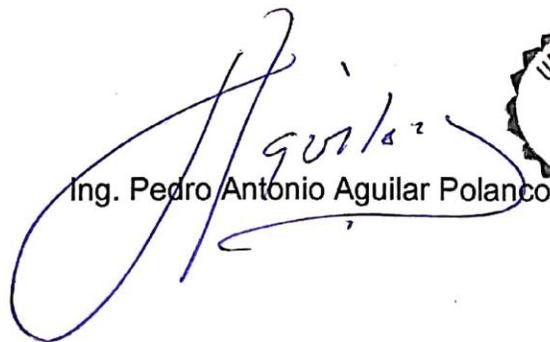
"Id y enseñad a Todos"


Ing. Carlos Salvador Gordillo
Asesor de Tesis





El director de la Escuela de Ingeniería Civil y Jefe del Departamento de Hidráulica, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Carlos Salvador Gordillo, al trabajo de graduación del estudiante Richar Makcley Yat Bol **APUNTES SOBRE EL CURSO DE HIDRÁULICA DE CANALES Y EJERCICIOS CON HOJAS DE CÁLCULO** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, enero 2020

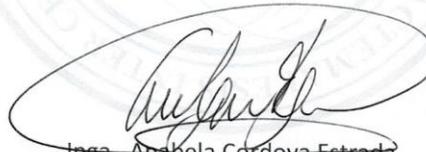
/mmm.



DTG. 211E.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **APUNTES SOBRE EL CURSO DE HIDRÁULICA DE CANALES Y EJERCICIOS CON HOJAS DE CÁLCULO**, presentado por el estudiante universitario: **Richar Makcley Yat Bol**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, mayo de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Fabian Yat y Transita Bol, por su amor, dedicación y apoyo.

Mis hermanos

Por el granito de arena que aportó cada uno de ellos.

Mis sobrinos

Fueron motor clave que me impulsaba cada día a llegar a mi meta.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser una importante influencia en mi carrera y darme la fuerza necesaria para seguir siempre adelante.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante influencia en mi carrera, y aportarme los conocimientos necesarios para desenvolverme en la sociedad.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas y recursos educativos que me formaron como profesional.
Mis amigos de la Facultad	Alexandra Castillo y Eduardo Sam, por apoyarme en cada momento en el transcurso de la carrera.
Asesor	Carlos Salvador Gordillo, por el tiempo dedicado a la revisión de mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Canal abierto.....	1
1.2. Clases de canales.....	1
1.2.1. Secciones transversales más frecuentes.....	1
1.3. Geometría del canal.....	3
1.4. Elementos geométricos.....	4
1.5. Distribución de velocidades y presión hidrostática.....	6
1.5.1. Distribución de velocidades en una sección de canal.....	7
1.5.2. Distribución de presión en una sección de canal.....	8
1.6. Aplicación de Hcanales a la hidráulica de canales.....	9
2. FLUJO PERMANENTE Y UNIFORME.....	13
2.1. Velocidad en flujo uniforme.....	13
2.1.1. Velocidad máxima.....	13
2.1.2. Velocidad mínima.....	14
2.2. Ecuación de Chézy.....	15
2.3. Coeficiente de resistencia: Kutter, Bazin, Manning.....	16

2.3.1.	Coeficiente Gauguillet – Kutter	16
2.3.2.	Ecuación de Bazin	18
2.3.3.	Ecuación de Manning	19
2.3.3.1.	Ecuación de continuidad.....	21
2.3.4.	Métodos de cálculo.....	21
2.3.4.1.	Método algebraico	21
2.3.4.2.	Método de tirante normal	22
2.3.5.	Método gráfico.....	24
2.4.	Diseño de canales, sección y dimensiones del canal	25
2.4.1.	Sección hidráulica	25
2.4.2.	Secciones circulares parcialmente llenas	27
2.5.	Sección de mínima infiltración	30
2.6.	Secciones con coeficiente de resistencia compuesta	31
2.7.	Ejercicios de aplicación con hojas de cálculo	31
2.7.1.	Ejemplo 1	32
2.7.2.	Ejemplo 2	36
2.7.3.	Ejemplo 3	38
3.	ENERGÍA ESPECÍFICA	43
3.1.	Flujo crítico, subcrítico y supercrítico.....	46
3.1.1.	Flujo crítico	46
3.1.2.	Flujo subcrítico	48
3.1.3.	Flujo supercrítico	49
3.2.	Profundidad crítica. Diversas secciones de canal.....	51
3.2.1.	Sección rectangular	52
3.2.2.	Sección triangular	53
3.2.3.	Sección trapezoidal de un canal	54
3.3.	Ejercicios de aplicación utilizando Hcanales	55
3.3.1.	Ejemplo 4	55

3.3.2.	Ejemplo 5.....	58
3.3.3.	Ejemplo 6.....	59
4.	FLUJO RÁPIDAMENTE VARIADO	63
4.1.	Características del flujo rápidamente variado	63
4.2.	Cambios de sección de flujo: ensanchamiento, estrechamiento.	64
4.2.1.	Ensanchamiento	64
4.2.2.	Estrechamiento	66
4.3.	Resalto hidráulico	68
4.3.1.	Tirantes conjugados en canales horizontales.....	72
4.3.1.1.	Sección rectangular.....	72
4.3.1.2.	Sección trapezoidal	73
4.3.2.	Tipos de salto hidráulico	74
4.3.3.	Longitud del resalto.....	76
4.3.4.	Ubicación del resalto hidráulico.....	78
4.4.	Ejercicios de aplicación utilizando Hcanales	80
4.4.1.	Ejemplo 7	80
4.4.2.	Ejemplo 8.....	82
5.	FLUJO GRADUALMENTE VARIADO	89
5.1.	Ecuaciones de energía	90
5.1.1.	Ecuación dinámica del flujo gradualmente variado	91
5.2.	Perfiles de superficie	93
5.2.1.	Curvas de remanso.....	93
5.2.1.1.	Clasificación y nomenclatura de las curvas de remanso.....	94

5.2.1.2.	Zonas de generación de las curvas de remanso.....	95
5.2.1.2.1.	Zona 1	95
5.2.1.2.2.	Zona 2	96
5.2.1.2.3.	Zona 3	96
5.3.	Clasificación de perfiles.....	97
5.3.1.	Perfiles tipo M.....	97
5.3.2.	Perfil tipo S	98
5.3.3.	Perfil tipo C.....	99
5.3.4.	Perfil H	100
5.3.5.	Perfil A.....	100
5.4.	Ejercicios de aplicación con hojas de cálculo	101
5.4.1.	Ejemplo 9	101
5.4.2.	Ejemplo 10	109
6.	MEDICIÓN DE FLUJO.....	115
6.1.	Vertederos de pared delgada.....	116
6.1.1.	Ecuación para un vertedero rectangular de pared delgada	117
6.1.2.	Ecuación para un vertedero triangular de pared delgada	119
6.2.	Vertederos de pared gruesa.....	121
6.2.1.	Ecuación para un vertedero de borde ancho (no ahogado).....	121
6.3.	Vertederos de desbordamiento	122
6.3.1.	Sección rectangular.....	123
6.3.2.	Sección triangular.....	125
6.3.3.	Sección trapezoidal	127
6.4.	Compuertas de esclusas.....	128

6.5.	Orificios	131
6.5.1.	Orificio de pared delgada	132
6.5.2.	Orificio de pared gruesa.....	133
6.5.3.	Orificio con salida de tubo	134
6.6.	Canal Parshall	135
6.6.1.	Partes que conforman el medidor Parshall.....	136
6.6.2.	Dimensiones del medidor Parshall	138
6.6.3.	Fórmulas para el cálculo del caudal en un medidor Parshall	140
6.7.	Ejercicios de aplicación con hojas de cálculo.....	142
6.7.1.	Ejemplo 11	142
6.7.2.	Ejemplo 12.....	144
CONCLUSIONES		147
RECOMENDACIONES.....		149
BIBLIOGRAFÍA.....		151
APÉNDICE		153

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Secciones de canales más frecuentes	2
2.	Elementos geométricos de la sección de un canal	3
3.	Partes del elemento geométrico	6
4.	Distribución de velocidades en un canal rectangular	7
5.	Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal	8
6.	Distribución de presiones en canales rectos y curvos	9
7.	Deducción de la ecuación de Chézy para flujo uniforme en un canal abierto	16
8.	Gráfica y_n vs $AR^{2/3}$	25
9.	Sección hidráulica	26
10.	Sección circular parcialmente llena	28
11.	Curva de relaciones hidráulicas para secciones circulares.....	29
12.	Canal trapezoidal con distintas rugosidades	32
13.	Canal trapezoidal de grava limpia	36
14.	Canal trapezoidal de tierra en buenas condiciones	39
15.	Curva de energía específica.....	45
16.	Flujo subcrítico	49
17.	Flujo supercrítico	50
18.	Canal rectangular	52
19.	Canal triangular	53
20.	Canal trapezoidal	54

21.	Nomograma para determinar el tirante normal y crítico para una sección trapezoidal	55
22.	Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener el tirante crítico del ejemplo 4	56
23.	Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la pendiente crítica del ejemplo 4	57
24.	Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la profundidad y la velocidad crítica del ejemplo 5	58
25.	Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la pendiente crítica del ejemplo 5	59
26.	Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la profundidad crítica y la energía específica del ejemplo 6	60
27.	Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la pendiente crítica del ejemplo 6	61
28.	Representación del cambio de régimen	64
29.	Ensanchamiento de un canal con acceso subcrítico	65
30.	Ensanchamiento de un canal con acceso supercrítico	66
31.	Estrechamiento en un canal con acceso subcrítico	67
32.	Estrechamiento en un canal con acceso supercrítico	68
33.	Resalto hidráulico	69
34.	Lugares apropiados para formarse el resalto hidráulico	70
35.	Elementos del resalto hidráulico	72
36.	Diferentes tipos de resaltos hidráulicos	75
37.	Longitud del resalto	76
38.	Resalto barrido	79
39.	Resalto claro	79
40.	Resalto ahogado	80
41.	Resalto hidráulico en una sección rectangular	81

42.	Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener el tirante y la pérdida de energía del ejemplo 7.....	82
43.	Canal trapezoidal	83
44.	Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener el tirante conjugado del ejemplo 8	85
45.	Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la pendiente del ejemplo 8	87
46.	Flujo gradualmente variado.....	89
47.	Tramo de longitud dx	91
48.	Curva de remanso en zona 1	95
49.	Curva de remanso en zona 2	96
50.	Curva de remanso zona 3	97
51.	Perfiles tipo M	98
52.	Perfiles tipo S.....	99
53.	Perfiles tipo C.....	99
54.	Perfiles tipo H.....	100
55.	Perfiles tipo A.....	101
56.	Perfil longitudinal del canal.....	102
57.	Gráfica curva $f(y)$	108
58.	Perfil M1 calculado por el método de integración gráfica.....	108
59.	Perfil de flujo	109
60.	Gráfica de la curva $f(y)$	114
61.	Perfil M2 calculado por el método de integración gráfica.....	114
62.	Vertedero con contracción y sin contracción	117
63.	Flujo ideal sobre un vertedero de pared delgada	117
64.	Vertedero triangular	120
65.	Flujo crítico sobre vertederos de borde ancho.....	121
66.	Vertedero de desbordamiento	123
67.	Vertedero rectangular, de cresta aguda sin contracciones.....	124

68.	Perfil de Creager	124
69.	Vertedero con doble contracción lateral.....	125
70.	Vertedero triangular de cresta aguda.....	126
71.	Vertedero de Cipolletti	127
72.	Compuerta plana	128
73.	Coeficiente de descarga para compuertas planas inclinadas con descarga libre	130
74.	Orificios de acuerdo con la forma de descarga	131
75.	Orificio de pared delgada.....	132
76.	Orificio de pared gruesa abocinada	133
77.	Orificio de tubo	134
78.	Canal Parshall metálico	136
79.	Partes del medidor Parshall (planta).....	137
80.	Partes del medidor Parshall (perfil).....	138
81.	Dimensiones del medidor Parshall.....	139
82.	Vertedero trapezoidal y rectangular	142
83.	Compuerta y vertedero en un canal.....	144

TABLAS

I.	Velocidades admisible máximas según material.....	14
II.	Valores de rugosidad del material (n), en la fórmula de Kutter.....	17
III.	Valores propuestos para el m de Bazin	18
IV.	Valores de rugosidad n de Manning	20
V.	Elementos geométricos de las secciones hidráulicas	27
VI.	Resultados obtenidos de las iteraciones en la hoja de cálculo del ejemplo 1	35
VII.	Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante normal del ejemplo 2	38

VIII.	Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante normal del ejemplo 3.....	40
IX.	Valores de k para cada talud Z.....	77
X.	Valores para obtener la longitud del resalto	78
XI.	Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante crítico del ejemplo 8.....	86
XII.	Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante normal del ejemplo 9.....	104
XIII.	Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante crítico del ejemplo 9.....	105
XIV.	Resultados obtenidos de la hoja de cálculo del ejemplo 9.....	107
XV.	Datos obtenidos en la hoja de cálculo para y_c el ejemplo 10	110
XVI.	Datos obtenidos de la hoja de cálculo para y_n para el ejemplo 10	111
XVII.	Resultados obtenidos de la hoja de cálculo del ejemplo 10.....	112
XVIII.	Valores de Cd en función del ángulo 2α	126
XIX.	Dimensiones típicas de canales Parshall en cm.....	139
XX.	Valores de exponente “n” y coeficiente “K”	140
XXI.	Caudales en medidores Parshall en l/s	141
XXII.	Resultado de las iteraciones en hoja de cálculo	143
XXIII.	Resultado de las iteraciones en hojas de cálculo del ejemplo 12	146

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a	Abertura de la compuerta
Δh	Altura del resalto hidráulico
C	Ancho de corona
W	Ancho de garganta
b	Ancho de solera
T	Ancho superficial o espejo de agua
β	Ángulo beta
θ	Ángulo teta
A	Área
Δx	Área bajo la curva
B. L	Borde libre
Q	Caudal
C_c	Coefficiente de contracción
α	Coefficiente de Coriolis
C_d	Coefficiente de descarga
C_r	Coefficiente de resistencia
n	Coefficiente de rugosidad
m	Coefficiente de rugosidad de Bazin
C_v	Coefficiente de velocidad
K	Constante de proporcionalidad
g	Constante gravitacional
dA	Diferencial de área
dE	Diferencial de energía

dy	Diferencial de tirante
E	Energía
M_f	Fuerza específica final
M_i	Fuerza específica inicial
L	Longitud
Fr	Número de Froude
S	Pendiente
S_E	Pendiente de energía
S_w	Pendiente de la superficie
P_m	Perímetro mojado
D	Profundidad hidráulica
R_H	Radio hidráulico
Z	Talud
y_c	Tirante crítico
y_n	Tirante normal
y	Tirante o profundidad de flujo
V	Velocidad
V_m	Velocidad media

GLOSARIO

ADVERSE	Adversa.
Canal abierto	Conducto que transporta un flujo de agua con una superficie libre y expuesta a la atmósfera. Puede ser natural o artificial.
Caudal unitario	Caudal que circula en una sección determinada por unidad de ancho.
Caudal	Volumen de líquido que circula en una unidad de tiempo por una sección determinada.
Coeficiente de Coriolis	Relación entre la energía real y la que se obtendría con una distribución uniforme de velocidades.
Compuerta de esclusa	Estructura que contiene bisagras verticales que le dan un movimiento vertical y permite regular el agua.
CRITICAL	Crítica.
Depósito	Estructura que almacena un volumen determinado de líquido.
Ensanchamiento	Aumento de la sección transversal de un conducto respecto del eje central longitudinal.

Estrechamiento	Reducción que se tiene respecto de la anchura.
Flujo cóncavo	Movimiento del fluido que genera líneas de corriente de una forma parabólica abriendo hacia arriba.
Flujo convexo	Movimiento del fluido que genera líneas de corriente de una forma parabólica abriendo hacia abajo.
Flujo paralelo	Movimiento del fluido que genera líneas de corriente sin curvatura.
Flujo	Movimiento que se genera al desplazar un fluido de un lugar a otro.
Grava	Piedras obtenidas de rocas que fueron sometidas a trituración, utilizadas en estructuras.
HCANALES	Software utilizado para el estudio de canales abiertos.
Infiltración	Introducción de líquido dentro de los poros del suelo.
<i>MILD</i>	Suave.
Orificio abocinado	Orificio que tiene el borde contorneado de forma que el líquido no sufra contracción al salir a la superficie.

Pendiente	Medida de la inclinación superficial del suelo siendo en el sentido de un eje, este puede ser ascendente o descendente.
Prismático	Que tiene forma de prisma, forma regular.
Sección transversal	Corte que se tiene en dirección perpendicular al eje longitudinal del canal.
<i>STEEP</i>	Empinado, abismo.
Tirante	Distancia que se tiene desde la lámina de agua hasta el fondo del canal.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación fue elaborado para servir de guía de apoyo al desarrollo del curso de hidráulica de canales. Se enfoca en resolver algunos ejercicios en hojas de cálculo con el fin de agilizar la resolución y obtener datos exactos. Además, implementa el programa HCANALES, herramienta útil en el área de canales abiertos, de fácil uso, de tal manera que el estudiante y el profesional lo puedan utilizar.

En el primer capítulo se presentan conceptos generales utilizados a menudo en el área de hidráulica de canales, definiciones para entender qué es un canal, las clases de canales que existen, su geometría, qué elementos geométricos lo componen, así como la distribución de las velocidades y presión que se tienen en el fondo.

El capítulo dos presenta el flujo permanente y uniforme, las velocidades máxima y mínima del flujo, se integra la ecuación de Chezy para este tipo de flujos, el coeficiente de resistencia según sea la pendiente o la rugosidad del material, el método de cálculo para un flujo uniforme, ya sea aplicando directamente las ecuaciones de cálculo directas o el uso de gráficos que relacionan las variables correspondientes. También se muestran las secciones que conducen flujos con la máxima eficiencia hidráulica. Asimismo, se presentan las secciones de mínima infiltración, con el propósito de reducir la pérdida de agua, muestra también, la conformación de secciones transversales constituidas por distintas rugosidades.

El capítulo tres se refiere a energía específica, en el cual a través del número de Froude se podrá conocer el régimen del flujo, clasificado como crítico, subcrítico y supercrítico. Igualmente indica que para cada sección de canal existe una profundidad crítica y la representación gráfica de la ecuación de la energía específica para una sección en particular.

El capítulo cuatro describe el flujo rápidamente variado, la variación de la velocidad del flujo al pasar de un estado supercrítico a uno subcrítico. También los efectos que sufre el flujo y su energía específica al circular por cambios en la sección transversal, ya sea por ensanchamiento o por estrechamiento; así como la formación de un resalto hidráulico y su aplicación como un disipador natural de la energía específica.

El capítulo cinco trata el flujo gradualmente variado, caracterizando los diversos perfiles de flujo, mostrando el procedimiento de cálculo y el dibujo de cada perfil, resalta el efecto de la pendiente de fondo.

El capítulo seis se refiere a los métodos de aforo para conocer el caudal que circula por un canal, aplica los vertederos, compuertas y canales Parshall, ya que son las estructuras más utilizadas en el medio.

OBJETIVOS

General

Proporcionar al estudiante de Ingeniería Civil una guía mediante apuntes y una metodología alternativa para resolver problemas de hidráulica de canales, la cual resulte más sencilla que los métodos tradicionales utilizados, permitiéndole obtener resultados eficaces y confiables.

Específicos

1. Aportar un trabajo que contribuya con la formación profesional del futuro ingeniero civil.
2. Explicar los conceptos hidráulicos y geométricos que intervienen en el flujo en un canal.
3. Aplicar las ecuaciones teóricas que describen los tipos de flujo en canales abiertos.
4. Describir el efecto de la velocidad y energía específica sobre el comportamiento que tienen los tipos de flujo.
5. Aplicar métodos alternos prácticos para la resolución de problemas en aplicaciones de hidráulica de canales.

INTRODUCCIÓN

La importancia que tiene el agua para todo ser vivo es fundamental, ya que sin ese valioso mineral simplemente no habría vida, de allí la importancia de su captación, conducción, distribución y uso racional para las diversas actividades de los seres humanos. Lo anterior sin dejar a un lado, su aprovechamiento para uso animal, agrícola, generación de energía eléctrica y la recreación, entre otros. Se toma en cuenta el diseño y construcción de infraestructura hidráulica orientada a su aprovechamiento y seguridad de las personas y sus bienes, como por ejemplo, obras de protección contra inundaciones, puentes y drenajes, entre otras. Sobresale, entonces, la importancia del conocimiento de la hidráulica de canales abiertos, que es la base para todas estas aplicaciones.

La hidráulica de canales tiene como fin analizar el funcionamiento del flujo de agua al transportarla por canales abiertos para su aprovechamiento. Los canales abiertos pueden ser naturales o artificiales, con una geometría regular o irregular, contruidos con distintos materiales, además de adaptarse a la topografía de su trayectoria.

Este trabajo de graduación constituye una guía teórica y práctica que responde al contenido del curso de hidráulica de canales, el cual, a raíz de la última readecuación curricular del pensum de estudios de la carrera de Ingeniería Civil, se ha convertido en un curso obligatorio. Por ello constituirá un aporte para facilitar su estudio y comprensión por parte del estudiante. Muestra un marco conceptual específico, explica y aplica las diversas metodologías del

cálculo, facilita el aprendizaje y la formación de criterios técnicos de diseño de sistemas de canales abiertos.

1. GENERALIDADES

1.1. Canal abierto

Los canales son conductos en los que el agua circula a superficie libre, impulsada por la acción de la gravedad, es decir, a la presión atmosférica, ya que la atmosfera está en contacto directo con el líquido.

Los canales pueden ser naturales y artificiales; los primeros definidos por los arroyos o ríos y los segundos, son los construidos por el hombre.

1.2. Clases de canales

A continuación, se describen las clases de canales por utilizarse.

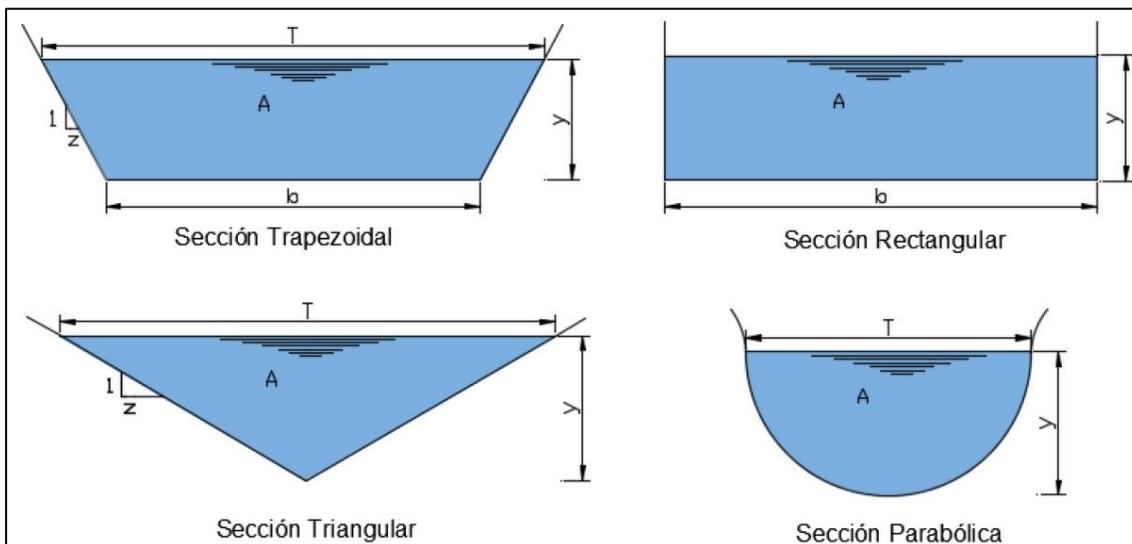
1.2.1. Secciones transversales más frecuentes

La sección transversal de un canal natural es comúnmente de forma irregular y varía según su cauce. Los canales artificiales son diseñados usualmente utilizando formas geométricas regulares (prismáticos), las más comunes son las siguientes:

- Sección trapezoidal. Se usa en canales de suelo (tierra) y canales recubiertos.
- Sección rectangular. Se emplea para canales excavados en roca, suelo consistente o canales recubiertos con distintos materiales de construcción.

- Sección triangular. Son usadas para cunetas en las carreteras, también se utilizan en canales de suelo firme, también se emplean recubiertos, como alcantarillas de las carreteras.
- Sección parabólica. Se emplea en ocasiones para canales recubiertos ya que esta es la forma que toman aproximadamente muchos canales naturales y canales viejos de suelo (tierra).

Figura 1. **Secciones de canales más frecuentes**



Fuente: MARÍN ENAMORADO, Estuardo René. *Construcción de un modelo hidráulico para la simulación de tipos de flujo en canales abiertos para el laboratorio de mecánica de fluidos e hidráulica de la Facultad de Ingeniería, USAC.* p. 4.

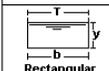
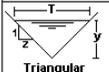
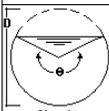
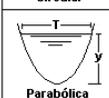
1.3. Geometría del canal

Un canal que está construido con una sección transversal y pendiente de fondo uniforme, se conoce como canal prismático, de otra manera, el canal es llamado no prismático.

Las secciones de canales naturales son, comúnmente, muy irregulares, y constantemente varían en formas de una parábola hasta aproximadamente un trapecio. Para flujos sujetos a crecidas frecuentes, el canal puede componerse de una sección principal donde se conducirán los caudales con flujo normal y una o más secciones laterales para adecuar los caudales de desborde.

Los canales artificiales se diseñan frecuentemente con secciones de figuras geométricas regulares. La tabla de la figura 2 relaciona las formas geométricas utilizadas comúnmente.

Figura 2. Elementos geométricos de la sección de un canal

Sección	Area hidráulica A	Perimetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$
 Triangular	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$
 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$\frac{(\text{sen}\frac{\theta}{2})D}{2\sqrt{y(D-y)}}$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$

Fuente: VILLÓN, Máximo. *Hidráulica de canales*. p.35-36.

1.4. Elementos geométricos

Los elementos geométricos de las secciones de un canal están dados por la geometría de la sección y la profundidad de flujo. Esta información es la utilizada en los cálculos de flujo.

Las secciones de canales regulares y simples permiten relacionar matemáticamente los elementos geométricos, generalmente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección. Para las secciones con una geometría más complejas, por ejemplo, los formados por corrientes naturales, no pueden ser representadas con una ecuación, en su lugar se recurre a gráficos y curvas que representen la relación entre estos elementos y la profundidad de flujo para uso en cálculos hidráulicos.

A continuación, se dan definiciones de varios elementos geométricos e hidráulicos de importancia básica.

- La profundidad de flujo, y , esta es la distancia vertical medida desde el fondo del canal en una sección del canal hasta su superficie libre del flujo.
- El nivel es la elevación o cota medida desde el nivel de referencia hasta el fondo del canal o hasta la superficie libre del flujo.
- La pendiente S , se define como la tangente del ángulo que forma el fondo del canal con un eje horizontal, se calcula como el cociente entre las diferencias de cota entre el inicio y el final del canal y la distancia horizontal del canal.

- El talud Z , es definido como la relación que hay entre la proyección horizontal a la vertical de la inclinación de las paredes de un canal.
- El ancho de solera b , es la medida de la base de un canal ya sea cuadrada, rectangular o trapezoidal.
- Borde libre B.L. es la altura libre que se encuentra entre la superficie del agua y la corona del canal, calculada así:

$$B. L. = H - y$$

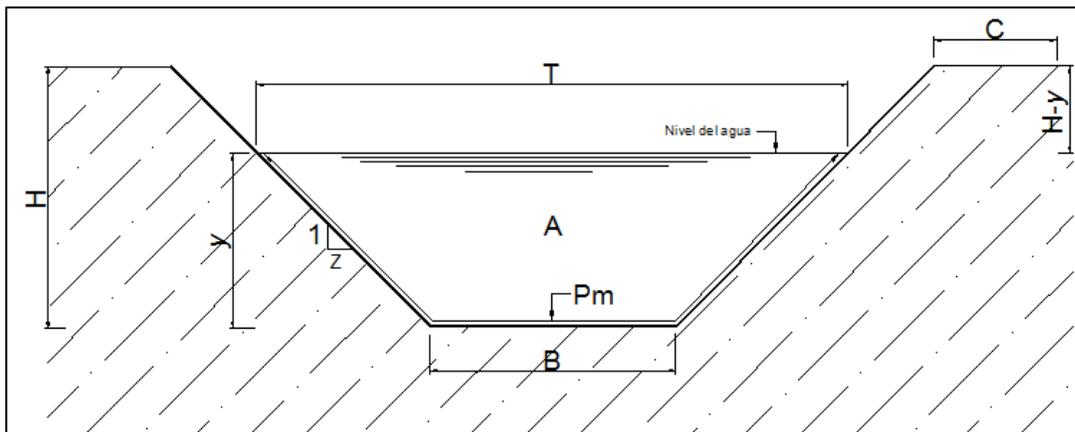
- Ancho de corona C es el ancho a cada lado de la sección transversal en la parte superior de un canal.
- El ancho superficial T , es el ancho superior de la superficie del agua, también llamado ancho del espejo de agua.
- El ancho superior B , es el ancho superior de la sección transversal del canal.
- El área hidráulica o mojada A , es el área ocupada por el fluido en la sección transversal que está perpendicular a la dirección del flujo.
- El perímetro mojado P_m , es toda la longitud de las paredes de la sección del canal que está en contacto con el agua, es decir, que resulta mojada por el fluido.
- El radio hidráulico R_H , es la relación que se tiene entre el área hidráulica y el perímetro mojado, o:

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

- La profundidad hidráulica D , es la relación entre el área mojada de la sección del canal y el ancho en la superficial o ancho del espejo de agua, o:

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

Figura 3. Partes del elemento geométrico



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

1.5. Distribución de velocidades y presión hidrostática

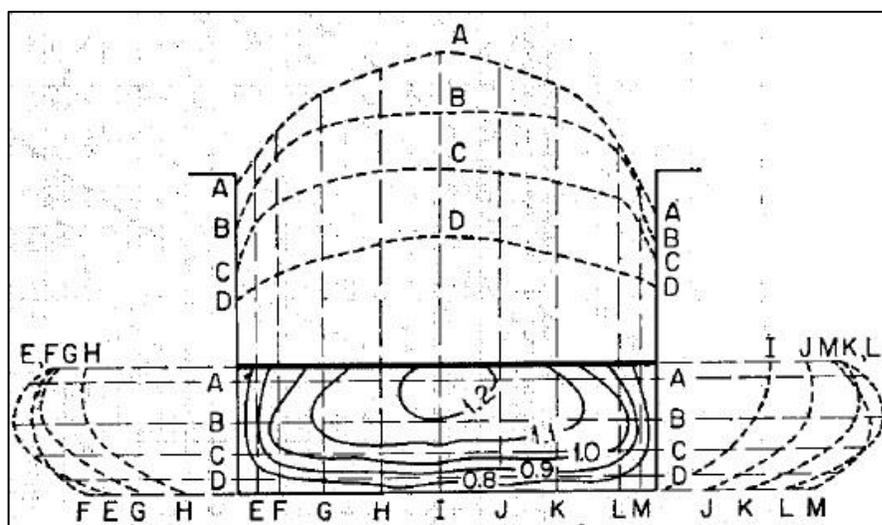
A continuación, se presenta la distribución de velocidades y presión hidrostática.

1.5.1. Distribución de velocidades en una sección de canal

A causa de la presencia de la superficie libre y por la fricción que se genera a lo largo de las paredes del canal, las velocidades no están uniformemente distribuidas en la sección del canal. La máxima velocidad media en los canales normales frecuentemente ocurre debajo de la superficie libre a una distancia de 0,05 a 0,25 de la profundidad. Cuanto más cerca de las bancas, más profundo se encuentra este máximo.

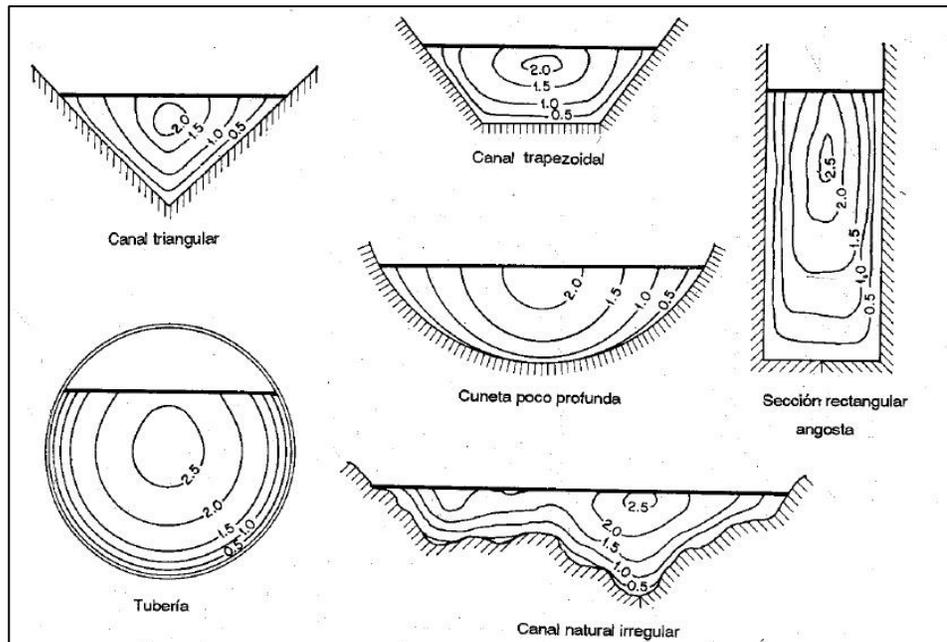
En la figura 4 se puede observar el modelo general de la distribución de velocidades que son aplicables a varias secciones horizontales y verticales en un canal que tengan una sección rectangular y las curvas de igual velocidad de la sección transversal. Los modelos generales para la distribución de velocidades de las diferentes secciones del canal con otra forma se ilustran en la figura 5.

Figura 4. Distribución de velocidades en un canal rectangular



Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 24.

Figura 5. **Curvas comunes de igual velocidad en diferentes secciones de canal**

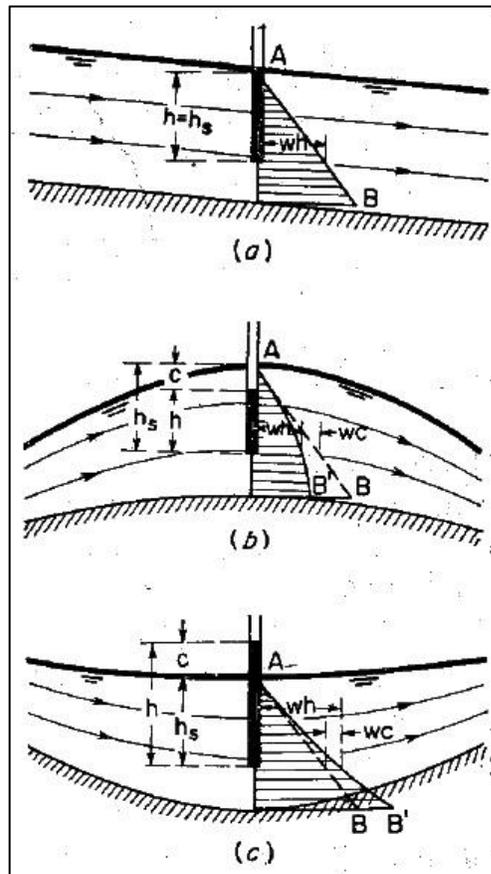


Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 25.

1.5.2. **Distribución de presión en una sección de canal**

Para conocer la presión en cualquier punto de una sección transversal del flujo que circula en un canal con pendiente baja puede medirse a través de la altura de la columna de agua en un tubo piezómetro instalado en el punto (véase figura 5 o 6). Y al no tomar en cuenta las pequeñas perturbaciones que se generan por la turbulencia, queda claro que el agua en esta columna debe subir desde el punto en la que se está haciendo la medición hasta la línea de gradiente hidráulica o superficie del agua.

Figura 6. **Distribución de presiones en canales rectos y curvos**



(a) Flujo paralelo; (b) flujo convexo; (c) flujo cóncavo.

Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 30.

1.6. **Aplicación de Hcanales a la hidráulica de canales**

El programa Hcanales fue diseñada por el ingeniero Máximo Villon Béjar, fue lanzado por primera vez en versión D.O.S en 1992 y para la versión de Windows 3.1 en 1994, hasta la última versión 3.1 para Windows 7, 8, 8.1 y 10 tanto para 32 bits como para 64 bits, cuenta ya con más de 20 años de trabajo. El programa brinda una herramienta muy útil a ingenieros civiles, ambientales y

demás especialistas en el diseño de canales para desarrollar cálculos de forma rápida.

El programa Hcanales se ha implementado también en cursos aplicativos orientados a resolver problemas concretos, con el fin de obtener resultados confiables. El uso del programa no es complejo ya que es sencillo utilizarlo y brinda facilidad para los cálculos, esto permite que los usuarios analicen los resultados, con ello aplicarlo de mejor forma en situaciones del diseño de canales.

En el programa se pueden realizar cálculos de canales con geometría común, se realizan actualizaciones en sus versiones, de acuerdo con las plataformas computacionales que se dan en la tecnología. También en cada actualización se tienen mejoras en cuanto a su interfaz y se incluyen nuevas opciones de cálculo.

Hcanales permite el cálculo rápido para el diseño de canales, variando cualquier parámetro hidráulico, y utilizando diversos flujos, obteniendo resultados confiables para calcular:

- Tirante normal.
- Tirante crítico.
- Resalto hidráulico.
- Curva de remanso.
- Calcular el caudal que transporta un canal construido para las secciones triangular, rectangular, trapezoidal, parabólica y circular.
- Caudal que transporta un canal natural tanto para rugosidad constante como para rugosidad variable.
- B, S o n para canales trapezoidales, rectangulares y triangulares.

- Parámetros hidráulicos en canales circulares.
- Cálculo en orificios, compuertas y vertederos.
- Cálculo de transición de entrada y salida alabeadas.
- Vertederos laterales.
- Pérdidas en canales no revestidos y revestidos.

2. FLUJO PERMANENTE Y UNIFORME

El tipo de flujo en un canal abierto depende de tres variables de clasificación: el tiempo, la longitud y la gravedad. Si se considera el tiempo y la distancia, un tipo de flujo muy utilizado en la práctica es el permanente y uniforme, el cual se caracteriza por mantener la profundidad de agua constante en el tiempo y la longitud.

En hidráulica de canales abiertos es fundamental utilizar este tipo de flujo, ya que muchos de los diseños de canales se basan en que las profundidades sean constantes a lo largo del canal y con el tiempo.

2.1. Velocidad en flujo uniforme

Hay parámetros que rigen el diseño de los canales abiertos, una de estas es la velocidad del agua, la que no deben exceder de cierto valor máximo, ya que si se exceden puede que produzcan la erosión del fondo y de las paredes del canal, provocando riesgo de falla en las estructuras que se encuentra a su paso. De igual forma la velocidad no debe ser inferior a un valor mínimo permitido para evitar la sedimentación, provocando depósitos de arena en el curso del canal, así como favorecer el crecimiento de plantas.

2.1.1. Velocidad máxima

Las velocidades máximas permitidas dependerán de la naturaleza del material con el que se construya el fondo y las paredes del canal.

La velocidad máxima se halla en una zona central del canal, esta se puede encontrar aproximadamente a 0,2 h de su superficie libre.

Según los estudios experimentales se ha comprobado que la velocidad media se puede obtener a una distancia de 0,6 h de su superficie, dado que los parámetros de velocidad de un flujo están en 0,2 h y 0,8 h.

Tabla I. **Velocidades admisible máximas según material**

Material	US Bureau (m/s)	Ejchevarry (m/s)	Gómez (m/s)
1. Arena muy fina	0,75	0,30	0,40
2. Arena ligera	0,75	0,40	---
3. Graba limosa (Barro)	0,90	0,91	1,00
4. Arcilla Dura	1,06	1,14	---
5. Limo aluvial coloidal	1,06	---	---
6. Arcilla esquistosa	1,82	1,52	---
7. Grava fina	1,52	1,52	1,15
8. Grava gruesa	1,82	1,82	1,20
9. Grava sementada	---	2,44	2,40
10. Roca dura	---	4,57	4,00
11. Concreto hormigón	---	6,10	4,50

Fuente: SPARROW ALAMO, Edgar Gustavo. *Hidráulica básica de canales*. p. 10.

2.1.2. Velocidad mínima

Por lo general se puede adoptar una velocidad mínima media de $V_m = 0,6$ m/s a 0,90 m/s para evitar la sedimentación y asolvamiento de los canales, y no permitir el crecimiento de plantas.

2.2. Ecuación de Chézy

En 1769, un ingeniero de nacionalidad francesa, de nombre Antoine Chézy que estaba desarrollando quizá la primera ecuación de flujo uniforme, la famosa ecuación de Chézy, que se expresa como sigue:

$$V = C_r \sqrt{R_H * S}$$

Donde:

V = es la velocidad media en pies/s

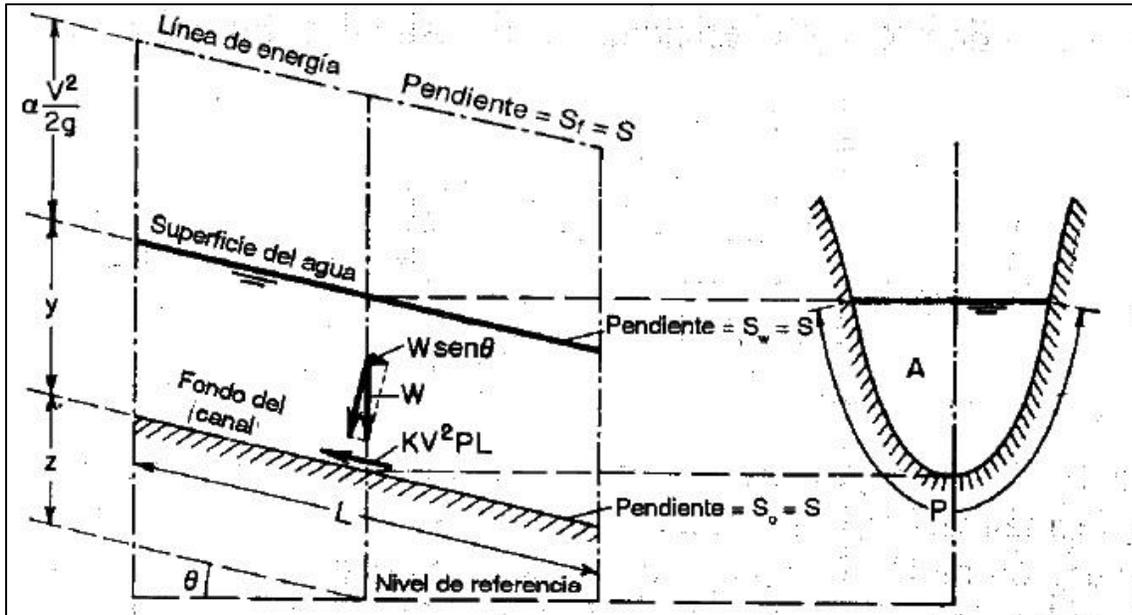
R_H = es el radio hidráulico en pies

S = es la pendiente de la línea de energía y

C_r = es un factor de resistencia al flujo, conocido como C_r de Chézy

La ecuación de Chézy puede ser deducida de forma matemática que parte de dos suposiciones. La primera suposición fue hecha por Chézy. Esta dispone que una fuerza que resiste el flujo por unidad de área del cauce de la corriente es proporcional al cuadrado de la velocidad; es decir, que la fuerza se representa como KV², en donde K es una constante de proporcionalidad. La superficie de contacto del flujo con el cauce de la corriente es igual a multiplicar el perímetro mojado y la longitud del tramo del canal representado como PL. Entonces, la totalidad de la fuerza que resiste al flujo es igual a KV²PL.

Figura 7. Deducción de la ecuación de Chézy para flujo uniforme en un canal abierto



Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 91.

2.3. Coeficiente de resistencia: Kutter, Bazin, Manning

A continuación, se describe el coeficiente de resistencia: Kutter, Bazin, Manning.

2.3.1. Coeficiente Gauguillet – Kutter

En 1869, dos ingenieros de nacionalidad suiza, Gauguillet y Kutter, realizaron una publicación de una ecuación donde se expresa el valor de C_r en términos de la pendiente S , el radio hidráulico R y el coeficiente de rugosidad n . En unidades inglesas, la ecuación es:

$$C_r = \frac{41,65 + \frac{0,00281}{S} + \frac{1,811}{n}}{1 + \left(41,65 + \frac{0,00281}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R_H}}}$$

El coeficiente n de la ecuación se conoce con el nombre de coeficiente de Kutter. La ecuación de Ganguillet y Kutter fue deducida en detalle a partir de datos de mediciones de flujo en canales de diferentes tipos, incluyendo los aforos de Bazin y los aforos de muchos ríos europeos y del río Mississippi. El uso de esta ecuación generalmente produce resultados satisfactorios.

Tabla II. **Valores de rugosidad del material (n), en la fórmula de Kutter**

Tipo de canal abierto	Límites de "n"	Valor utilizado común
Cemento bien pulido	0,010-0,013	0,010
Tubo de concreto simple	0,012-0,016	0,013
Canales y zanjas: tierra alineada y uniforme	0,017-0,025	0,020
En roca lisa	0,025-0,035	0,033
Excavado en tierra	0,025-0,033	0,0275
Mampostería de cemento	0,017-0,030	---
Canales labrados en roca	0,035-0,045	0,040
Canales de tabique rojo con mortero de cemento	0,012-0,017	0,015
Canales de madera cepillada	0,010	0,010
Canal de concreto acabado normal	0,014	0,014

Fuente: RODRÍGUEZ RUIZ, Pedro. *Hidráulica II*. p. 31.

2.3.2. Ecuación de Bazin

En 1897, el ingeniero hidráulico de nacionalidad francesa, H. Bazin, propuso una ecuación conforme a la cual el coeficiente C_r de Chézy toma en consideración la función de R_H , pero no de S . Esta se expresa en unidades inglesas, la ecuación es:

$$C_r = \frac{157,6}{1 + \frac{m}{\sqrt{R_H}}}$$

Donde:

R_H = es el radio hidráulico y

m = es un coeficiente de rugosidad cuyos valores que propone Bazin se dan en la tabla III.

Tabla III. Valores propuestos para el m de Bazin

Descripción del canal	m de Bazin
Cemento muy suave con formaleta de madera cepillada	0,11
Madera sin cepillar, concreto o ladrillo	0,21
Mampostería en bloques de piedra o de piedra y ladrillo mal acabado	0,83
Canales en tierra en perfectas condiciones	1,54
Canales en tierra en condiciones normales	2,36
Canales en tierra en condiciones rugosas	3,17

Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 94.

La ecuación realizada por Bazin obtuvo su desarrollo a partir de datos producidos en pequeños canales experimentales; al utilizarlo de forma general

se obtienen resultados menos satisfactorios que la ecuación de Ganguillet y Kutter.

2.3.3. Ecuación de Manning

En 1889 el ingeniero de nacionalidad irlandesa de nombre Robert Manning presentó una ecuación, la cual tuvo modificaciones hasta que más adelante llegara a su forma conocida actualmente.

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

O

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

Donde:

Q = caudal del flujo medida en P³/s o m³/s

A = área transversal del canal medido en P² o m²

V = es la velocidad media en P/s o m/s

k = 1 para sistema internacional, 1,49 para sistema inglés

R_H = es el radio hidráulico en pies o metros

S = es la pendiente de la línea de energía, en P/P o m/m

n = es el coeficiente de rugosidad, específicamente conocido como n de Manning.

Debido a que la ecuación es muy simple y a los resultados satisfactorios que arroja en las aplicaciones prácticas, la ecuación de Manning se ha

convertido en la más utilizada de todas las ecuaciones de flujo uniforme para cálculos hidráulicos en canales abiertos.

Cuando se hace la comparación de la fórmula de Chézy y la fórmula de Manning, es decir:

$$C_r \sqrt{R_H * S} = \frac{k}{n} R_H^{2/3} S^{1/2}$$

Se obtiene la fórmula de C_r expresada con la ecuación:

$$C_r = \frac{k}{n} R_H^{1/6}$$

Tabla IV. **Valores de rugosidad n de Manning**

Material	Valores		
	Mínimo	Normal	Máximo
Arroyo de montaña con muchas piedras	0,035	0,040	0,050
Tepetate (liso y uniforme)	0,025	0,035	0,040
Tierra en buenas condiciones	0,017	0,020	0,025
Tierra libre de vegetación	0,020	0,025	0,033
Mampostería seca	0,025	0,030	0,033
Mampostería con cemento	0,017	0,020	0,025
Concreto	0,013	0,017	0,020
Asbesto cemento	0,090	0,010	0,011
Polietileno y PVC	0,007	0,008	0,009
Fierro fundido (Fo, Fo)	0,011	0,014	0,016
Acero	0,013	0,015	0,017
Vidrio, cobre	0,009	0,010	0,010

Fuente: RODRÍGUEZ RUIZ. Pedro. *Hidráulica II*. p. 34.

2.3.3.1. Ecuación de continuidad

El volumen de agua que pasa por una sección transversal de un canal por unidad de tiempo se denomina caudal volumétrico, Q , y está relacionado con la velocidad y área de la sección transversal, según la siguiente ecuación:

$$Q = VA$$

Donde:

Q = caudal volumétrico

V = velocidad del flujo

A = área de la sección del canal

Esta relación es llamada ecuación de continuidad, la cual establece que el caudal es constante.

2.3.4. Métodos de cálculo

A continuación, se describen los métodos de cálculo.

2.3.4.1. Método algebraico

Para un canal que tiene la geometría simple, la condición de flujo uniforme puede obtenerse utilizando una solución algebraica ya que estas no presentan complicaciones matemáticas al realizar los cálculos.

2.3.4.2. Método de tirante normal

Cuando se tiene un régimen uniforme y se desea encontrar el tirante normal en una sección del canal rectangular para un determinado caudal que circula en ella, se emplea la ecuación de Manning.

Al utilizar la ecuación de Manning se obtiene:

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

Al plantearla se obtiene:

$$\frac{Qn}{S^{1/2}} = kAR_H^{2/3}$$

Conociendo que para una sección rectangular:

$$A = by$$

$$P = b + 2y$$

Entonces se obtiene la siguiente ecuación:

Tirante normal

$$y^{5/3} \sqrt[3]{\frac{1}{\left[1 + \frac{2y}{b}\right]^2}} = \frac{Qn}{S^{1/2}}$$

Esta ecuación no se puede resolver de forma directa, por lo que es necesario utilizar gráficas o métodos iterativos de soluciones de ecuaciones.

De acuerdo con el XXII Congreso Nacional de Hidráulica, México noviembre 2012, para el cálculo del tirante normal de un canal rectangular existen dos métodos que emplean fórmulas explícitas que facilitan la obtención de los resultados.

- Método propuesto por Terzidis-Srivatava (2008)

Se calcula el parámetro θ_r la cual es:

$$\theta_r = \left(\frac{nQ}{b^{8/3}S^{1/2}} \right)^{0,6}$$

Donde:

Q: caudal de diseño (m³/s)

n: rugosidad de Manning

b: ancho del canal en (m)

S: pendiente de la solera del canal

Se obtiene el parámetro η_o

$$\eta_o = \theta_r(1 + 1,2\theta_r)^{0,7826}$$

Se calcula el parámetro η_o

$$\eta = \frac{\theta_r(1,2\eta_o + 1)}{(2\eta_o + 1)^{0,6} - 0,8\theta_r}$$

Se obtiene el valor del tirante en m de la siguiente forma:

$$y_n = \eta b$$

- Método propuesto por Vatankhah y Easa (2011)

Se obtiene el parámetro β_r

$$\beta_r = \frac{nQ}{b^{8/3} s^{1/2}}$$

Se calcula η_n

$$\eta_n = \beta_r^{3/5} (1 + 2\beta_r^{3/5} + 1,71\beta_r^{6/5})^{2/5}$$

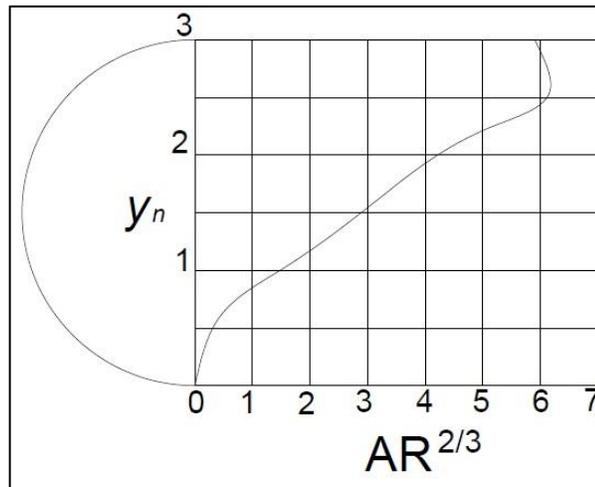
Se obtiene el valor del tirante normal

$$y_n = \eta_n b$$

2.3.5. Método gráfico

En algunos casos la solución algebraica se puede facilitar por medio de la solución gráfica, la cual consiste en construir una curva de y_n contra el factor de sección $AR^{2/3}$. Con estos parámetros se calcula el valor de $Q^*n/s^{1/2}$ según la ecuación $Q^*n/s^{1/2} = AR^{2/3}$, con esta relación se podrá obtener el tirante normal leyéndolo directamente del gráfico curva y_n contra $AR^{2/3}$, como por ejemplo la curva para una sección circular, ver la figura 8.

Figura 8. **Gráfica y_n vs $AR^{2/3}$**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

2.4. **Diseño de canales, sección y dimensiones del canal**

A continuación, se describe el diseño de canales, sección y dimensiones del canal.

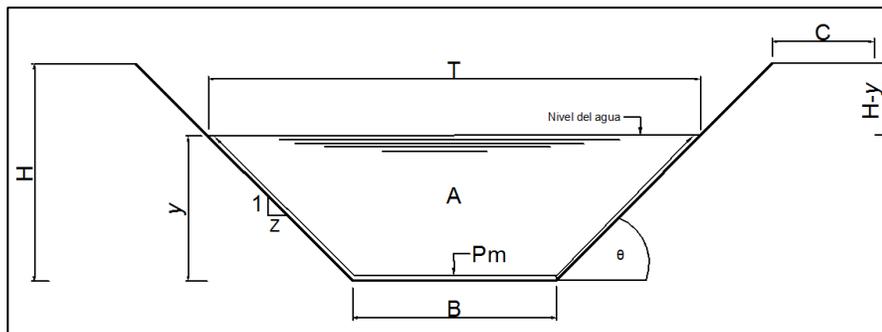
2.4.1. **Sección hidráulica**

La sección del canal que utiliza el menor perímetro mojado para un área determinada podrá hacer fluir un mayor caudal, esta sección es conocida como sección hidráulica de máxima eficiencia. Dentro de las diversas formas geométricas utilizadas para la sección de un canal, la sección semicircular es la que menor perímetro mojado tiene; por consiguiente, es la más eficiente, por esa razón es muy utilizada en alcantarillados por medio de tubos prefabricados. Sin embargo, para otras aplicaciones su construcción es muy difícil, por eso, la sección más cercana a una forma semicircular es la mitad de un hexágono, de

ahí que se emplea frecuentemente la sección trapezoidal, teniendo un ángulo de talud con la horizontal de 60 grados. También se puede expresar con la siguiente relación:

$$\frac{b}{y} = 2tg \frac{\theta}{2}$$

Figura 9. **Sección hidráulica**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

La siguiente tabla muestra las relaciones geométricas de algunas de las secciones de mayor uso en la práctica.

Tabla V. **Elementos geométricos de las secciones hidráulicas**

Sección transversal	Área A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Ancho superficial T	Tirante hidráulico D
Trapezoidal: medio hexágono	$1,73 y^2$	$3,46 y$	$0,500 y$	$2,31 y$	$0,750 y$
Rectángulo: medio cuadrado	$2 y^2$	$4 y$	$0,500 y$	$2 y$	y
Triángulo: medio cuadrado	y^2	$2,83 y$	$0,354 y$	$2 y$	$0,500 y$
Semicírculo	$0,500\pi y^2$	πy	$0,500 y$	$2y$	$0,250\pi y$
Parábola: $T2\sqrt{2}y$	$1,89 y^2$	$3,77 y$	$0,500 y$	$2,83 y$	$0,667 y$
Catenaria hidráulica	$1,40 y^2$	$2,98 y$	$0,468 y$	$1,92 y$	$0,728 y$

Fuente: FRENCH, Richard H. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 279.

2.4.2. Secciones circulares parcialmente llenas

La sección transversal hidráulicamente eficiente es la que contiene una geometría circular, es muy utilizada ya que tiene el menor perímetro mojado para una determinada área. Son utilizadas en conducciones de agua en tuberías y en alcantarillados, entre otros.

La utilización de un canal de sección circular proporciona el mismo valor en la velocidad cuando esta se encuentra llena completa o parcialmente, esto se debe a que el radio hidráulico tiene la misma magnitud: $D/4$.

Las ecuaciones que definen una sección circular parcialmente llena son las siguientes:

$$A = \frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$$

$$Pm = \frac{\theta D}{2}$$

$$R_h = \left[\frac{(\theta - \text{sen}\theta)}{\theta} \right] \frac{D}{4}$$

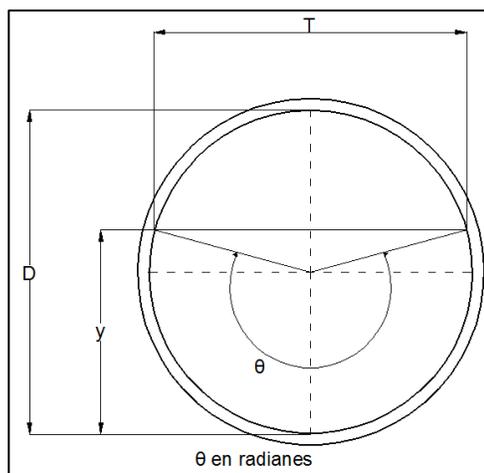
$$T = 2\sqrt{y(D - y)}$$

Donde θ (en radianes)

Para $y < D/2$, $\theta = \pi - 2 \sin^{-1} \left[1 - \frac{2y}{D} \right]$

Para $y > D/2$, $\theta = \pi + 2 \sin^{-1} \left[\frac{2y}{D} - 1 \right]$

Figura 10. **Sección circular parcialmente llena**

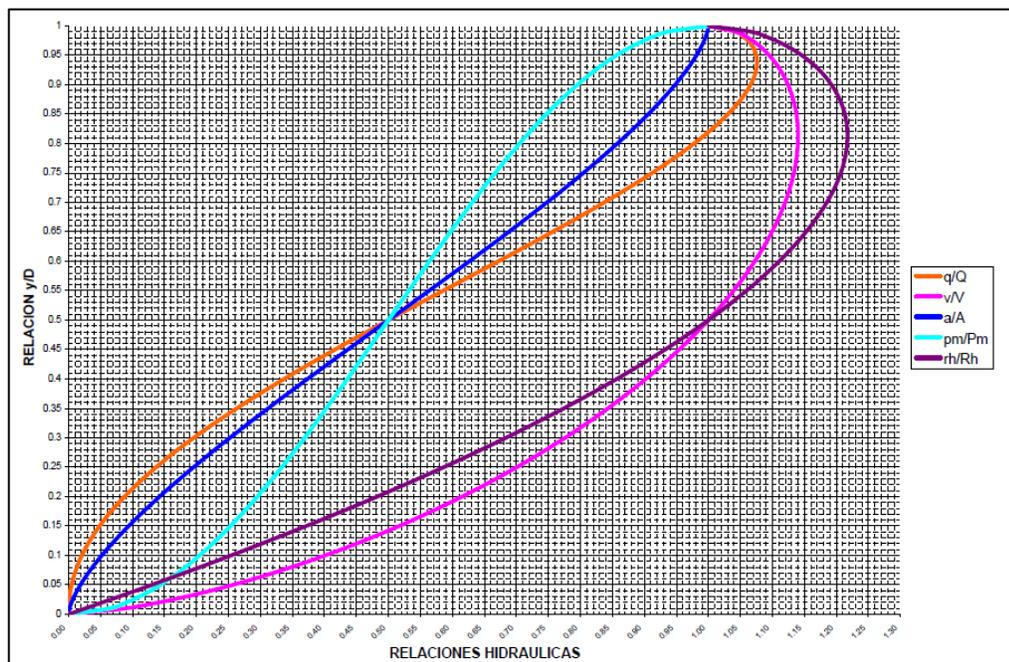


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Para calcular el caudal en una sección circular parcialmente llena se utiliza la ecuación de Manning.

La figura 10 muestra las relaciones hidráulicas para secciones circulares, representando q/Q , v/V , a/A , pm/Pm , rh/Rh , todas en función de la relación del tirante y con el diámetro D , es decir, caudal q , velocidad v , área hidráulica a , perímetro mojado pm y radio hidráulico rh , de una sección parcialmente llena a la sección totalmente llena.

Figura 11. **Curva de relaciones hidráulicas para secciones circulares**



Fuente: AMANCO S.A.

2.5. Sección de mínima infiltración

Si un canal está construido sobre un terreno permeable, este perderá volumen de agua en su recorrido, razón por la que se necesitará diseñar una sección que permita obtener la menor pérdida posible de agua por infiltración.

Se debe examinar la condición de mínima infiltración para los canales construidos sobre el suelo natural, además de la máxima eficiencia hidráulica, tal condición pretende encontrar las condiciones que debe cumplir un canal para que se produzca la menor pérdida de agua por infiltración. Dicha condición solo resulta aplicable a canales trapezoides, debido a que se pueden construir sin revestimiento.

Mínima infiltración

Estas secciones deben cumplir con las siguientes relaciones:

$$\frac{b}{y} = 4tg \frac{\theta}{2} \text{ o su equivalente } m = 4(\sqrt{1 + Z^2} - Z)$$

Donde $m = b/y$, representa la relación para una sección de mínima infiltración. Para obtener una relación intermedia entre una sección de máxima eficiencia y también que se obtenga una mínima infiltración resulta la ecuación:

$$\frac{b}{y} = 3tg \frac{\theta}{2}$$

2.6. Secciones con coeficiente de resistencia compuesta

Según los materiales disponibles para construir un canal, su sección transversal podría resultar conformada por dos o más materiales diferentes, cada uno de ellos tendrá distinta rugosidad, esta situación podría presentarse también a lo largo del canal, esto implica que se tendrán diferentes valores del coeficiente de rugosidad n , para cada proporción. Tal situación hace necesario obtener una rugosidad equivalente, cuyo valor se usará en los cálculos hidráulicos.

Cuando se tengan casos donde los coeficientes de rugosidad sean diferentes, se ha propuesto utilizar un coeficiente de rugosidad equivalente para todo el perímetro mojado.

Para este propósito se utiliza la siguiente ecuación:

$$n_{equivalente} = \left[\frac{P_{m1}n_1^{3/2} + P_{m2}n_2^{3/2} + \dots + P_{mN}n_N^{3/2}}{P_m} \right]^{2/3}$$

Donde:

P_m = será el perímetro de la sección

n = será el coeficiente de rugosidad según el tipo de material de construcción.

2.7. Ejercicios de aplicación con hojas de cálculo

A continuación, se describen los ejercicios de aplicación con hojas de cálculo.

2.7.1. Ejemplo 1

Un canal trapezoidal cuyo ancho de solera es de 1,5 m, tiene un talud igual a 0,75 y está trazado con una pendiente de 0,0008 m/m. La solera es de concreto y los taludes tienen recubrimiento de mampostería de distinta clase de piedra, para el talud izquierdo la piedra tiene una rugosidad de Manning de 0,023 y para el talud derecho $n = 0,02$. Calcular el tirante normal y la velocidad que tendrá el flujo en el canal, el caudal transportado es de 1,3 m³/s.

Utilizando el criterio de Horton y Einstein.

Datos:

$$Q = 1,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S_o = 0,0008 \text{ m/m}$$

$$\text{Ancho de solera} = 1,5 \text{ m}$$

$$y_n = ?$$

$$n_1 = 0,023$$

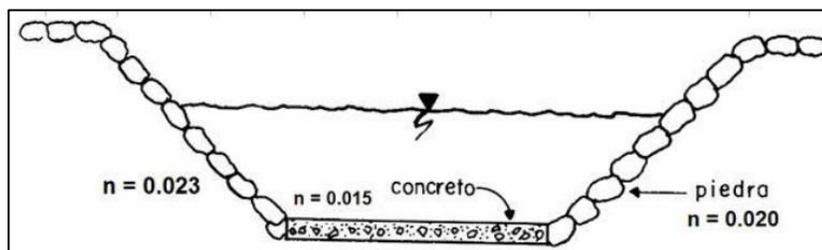
$$A = ?$$

$$n_2 = 0,015$$

$$P = ?$$

$$n_3 = 0,020$$

Figura 12. Canal trapezoidal con distintas rugosidades



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Solución:

En este problema se tienen los datos del Q y S_o y se requiere determinar el tirante y_n , para hallarlo se debe resolver por tanteos, asumir y_n , y evaluar Q. Adicionalmente, debe calcularse una rugosidad equivalente para cada tirante de agua asumido, el proceso de cálculo es el siguiente:

Utilizando las fórmulas de la figura 2 y asumiendo un primer valor del tirante $y = 1$ m se tiene:

$$Pm_1 = y\sqrt{1 + Z^2}$$

$$Pm_1 = 1 * \sqrt{1 + (0,75m)^2} = 1,25 \text{ m}$$

$$Pm_2 = 1,5m \text{ (ya que es constante para cualquier valor que tome } y)$$

$$Pm_3 = y\sqrt{1 + Z^2}$$

$$Pm_3 = 1 * \sqrt{1 + (0,75m)^2} = 1,25 \text{ m}$$

$$Pm \text{ total} = Pm_1 + Pm_2 + Pm_3$$

$$Pm \text{ total} = 1,25 + 1,5 + 1,25 = 4m$$

De la fórmula de Horton – Einstein

$$n_{\text{equivalente}} = \left[\frac{P_1 n_1^{3/2} + P_2 n_2^{3/2} + \dots + P_N n_N^{3/2}}{P} \right]^{2/3}$$

$$n_{equivalente} = \left[\frac{(1,25)(0,023)^{\frac{3}{2}} + (1,5)(0,015)^{\frac{3}{2}} + (1,25)(0,020)^{\frac{3}{2}}}{4} \right]^{2/3} = 0,0192$$

Se obtiene el área y el radio hidráulico según las fórmulas de la figura 2 para una forma trapezoidal.

$$A = y(b + zy)$$

$$A = 1 * (1,5 + (0,75)(1)) = 2,25 \text{ m}^2$$

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

$$R_H = \frac{2,25 \text{ m}^2}{4\text{m}} = 0,5625 \text{ m}$$

Evaluando el caudal con la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1}{n_{equivalente}} R^{2/3} S^{1/2} A$$

$$Q = \frac{1}{0,0192} (0,5625 \text{ m})^{2/3} (0,0008)^{1/2} (2,25 \text{ m}^2) = 2,257 \text{ m}^3/\text{s}$$

Como el caudal que se obtuvo es mayor de 1,3 m³/s, se concluye que y debe ser menor a 1 m.

Entonces, para realizar los cálculos de las iteraciones en forma ordenada es conveniente organizar una tabla como se muestra, se empezará con y = 1 m y se irá disminuyendo hasta encontrar un valor cercano al caudal que se solicite.

Recordando que para Pm1 se utilizará la siguiente fórmula:

$$Pm_1 = y\sqrt{1 + Z^2}$$

Para Pm2 se mantiene constante ya que esta sección no varía.

Para Pm3 se utilizará la siguiente fórmula:

$$Pm_3 = y\sqrt{1 + Z^2}$$

Tabla VI. **Resultados obtenidos de las iteraciones en la hoja de cálculo del ejemplo 1**

y (m)	Pm1 (m)	Pm2 (m)	Pm3 (m)	$P_1 n_1^{1.5}$	$P_1 n_1^{1.5}$	$P_1 n_1^{1.5}$	$\Sigma P_1 n_1^{1.5}$	P total (m)	$n_{eq} \frac{(\Sigma P_1 n_1^{1.5})^{2/3}}{(\Sigma P_1)^{2/3}}$
1,0000	1,2500	1,5000	1,2500	0,00436	0,00276	0,00354	0,01065	4,0000	0,01921
0,5000	0,6250	1,5000	0,6250	0,00218	0,00276	0,00177	0,00670	2,7500	0,01811
0,7500	0,9375	1,5000	0,9375	0,00327	0,00276	0,00265	0,00868	3,3750	0,01877
0,7400	0,9250	1,5000	0,9250	0,00323	0,00276	0,00262	0,00860	3,3500	0,01875
0,7200	0,9000	1,5000	0,9000	0,00314	0,00276	0,00255	0,00844	3,3000	0,01870
0,7250	0,9063	1,5000	0,9063	0,00316	0,00276	0,00256	0,00848	3,3125	0,01871
0,7240	0,9050	1,5000	0,9050	0,00316	0,00276	0,00256	0,00847	3,3100	0,01871
0,7220	0,9025	1,5000	0,9025	0,00315	0,00276	0,00255	0,00846	3,3050	0,01871

y (m)	Área total (m ²)	Radio hidráulico (m)	Q (m ³ /s)	V=Q/A (m/s)
1,0000	2,2500	0,5625	2,257	1,00
0,5000	0,9375	0,3409	0,714	0,76
0,7500	1,5469	0,4583	1,386	0,90
0,7400	1,5207	0,4539	1,355	0,89
0,7200	1,4688	0,4451	1,295	0,88
0,7250	1,4817	0,4473	1,310	0,88
0,7240	1,4791	0,4469	1,307	0,88
0,7220	1,4740	0,4460	1,301	0,88

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran que el tirante normal que produciría un flujo de 1,3 m³/s es de 72,20 cm y con una velocidad media de 0,88 m/s, un área hidráulica de 1,47 m² y un perímetro mojado total de 3,305 m.

2.7.2. Ejemplo 2

Determinar el tirante que se presenta en una sección trapezoidal de grava limpia y uniforme con un gasto $Q= 5 \text{ m}^3/\text{s}$, un ancho de canal $b = 2 \text{ m}$, $S = 0,002 \text{ m/m}$ y talud $Z= 3$.

Datos:

Grava limpia uniforme $n = 0,025$

$Z= 3$

$S= 0,002 \text{ m/m}$

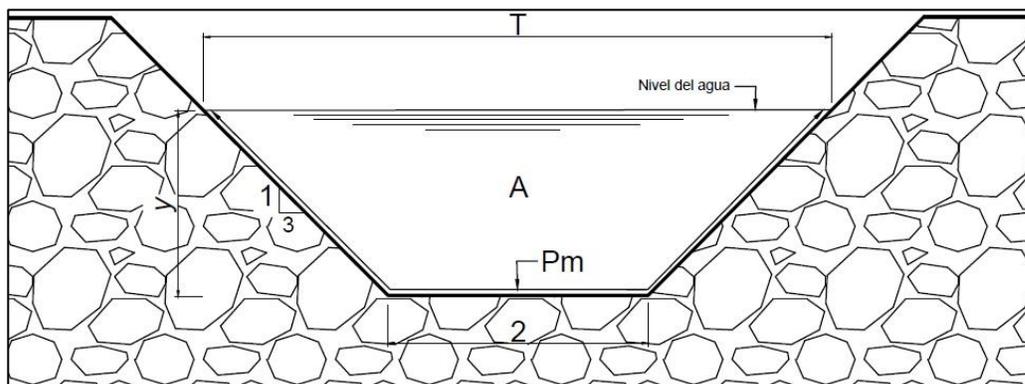
$b= 2 \text{ m}$

$Q= 5 \text{ m}^3/\text{s}$

$A=?$

$P_{\text{total}} = ?$

Figura 13. Canal trapezoidal de grava limpia



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Solución:

Se utilizará la fórmula de Manning dejando como incógnita el término $AR^{2/3}$:

$$Q = AR_H^{2/3} S^{1/2} * \frac{1}{n}$$

$$Q = AR_H^{2/3} (0,002)^{1/2} * \frac{1}{0,025}$$

$$Q = 1,789 AR_H^{2/3}$$

Entonces para realizar las iteraciones se debe elaborar una tabla con una hoja de cálculo como se muestra, se empezará con $y = 1$ m y se irá disminuyendo hasta encontrar un valor cercano al caudal que se necesita haciendo la comparación en las dos últimas columnas de la tabla.

Recordando que para el área de un trapecio se utilizará la siguiente fórmula:

$$A = y * (b + Zy)$$

Para P_m (perímetro mojado):

$$P_m = b + 2y\sqrt{1 + Z^2}$$

Para R_H (radio hidráulico):

$$R_H = \frac{A}{P_m}$$

Tabla VII. **Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante normal del ejemplo 2**

y (m)	A (m ²):	P (m)	Radio hidráulico (m)	$R_H^{2/3}$	$AR_H^{2/3}$	$1,789 AR_H^{2/3}$	V=Q/A (m/s)	Q (m ³ /s)
1,0000	5,0000	8,3246	0,6006	0,7119	3,5594	6,368	1,27	5,000
0,7500	3,1875	6,7434	0,4727	0,6068	1,9342	3,460	1,09	5,000
0,9000	4,2300	7,6921	0,5499	0,6712	2,8393	5,079	1,20	5,000
0,8900	4,1563	7,6289	0,5448	0,6671	2,7725	4,960	1,19	5,000
0,8930	4,1783	7,6478	0,5463	0,6683	2,7924	4,996	1,20	5,000
0,8920	4,1710	7,6415	0,5458	0,6679	2,7858	4,984	1,19	5,000
0,8925	4,1747	7,6447	0,5461	0,6681	2,7891	4,990	1,20	5,000
0,8926	4,1754	7,6453	0,5461	0,6681	2,7898	4,991	1,20	5,000
0,8934	4,1813	7,6504	0,5465	0,6685	2,7951	5,000	1,20	5,000

Fuente: elaboración propia.

Los cálculos muestran que, con un tirante de 0,893 m, se produciría en el canal un flujo de 5 m³/s a una velocidad de 1,2 m/s.

2.7.3. Ejemplo 3

Calcular el tirante normal en un canal de tierra en buenas condiciones, que conduce un gasto de 4,5 m³/s, y cuya pendiente es de 0,40 metro por kilómetro, el ancho es de 3,00 m, el coeficiente de rugosidad es de 0,025 y la inclinación de los taludes es 1,5:1.

Datos:

$$Q = 4,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S = 0,40 \text{ metro por kilómetro}$$

$$S = 0,4/1\ 000 = 0,0004$$

$$b = 3,00 \text{ m}$$

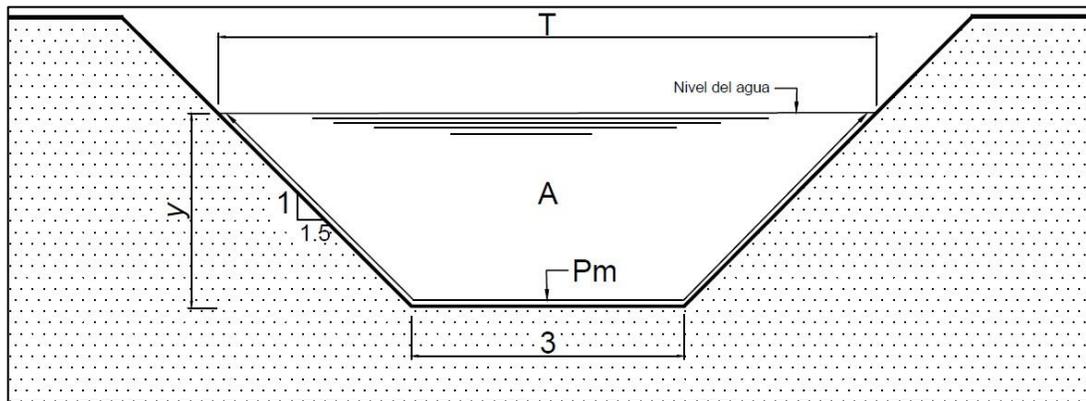
$$Z = 1,5:1$$

$$n = 0,025$$

$$y_n = ?$$

$$A = ? \text{ y } P_m = ?$$

Figura 14. Canal trapezoidal de tierra en buenas condiciones



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Solución:

Se utilizarán las siguientes fórmulas donde se dejará como incógnita el tirante y :

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

De donde:

$$\frac{Q * n}{S^{1/2}} = A R_H^{2/3}$$

$$A = y * (b + Zy)$$

$$A = y * (3 + 1,5y)$$

$$P_m = b + 2y\sqrt{1 + Z^2}$$

$$P_m = 3 + 2y\sqrt{1 + 1,5^2}$$

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

$$R_H = \frac{y * (2 + 1,5y)}{3 + 2y\sqrt{1 + 1,5^2}}$$

Para resolver el problema se procede a realizar una hoja de cálculo y se harán las iteraciones correspondientes, comenzando con una y de 1,20 m y dado que la comparación de $AR_H^{2/3}$ con el valor correspondiente en la columna de $Q*n/s^{1/2}$ es menor, se irá incrementando el valor de y hasta que los resultados sean iguales como se muestra en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante normal del ejemplo 3**

y (m)	A (m2):	P (m)	Radio hidráulico (m)	$R_H^{2/3}$	$AR_H^{2/3}$	$\frac{Q * n}{S^{1/2}}$
1,2000	5,7600	7,3267	0,7862	0,8518	4,906	5,625
1,2500	6,0938	7,5069	0,8117	0,8702	5,303	5,625
1,3000	6,4350	7,6872	0,8371	0,8882	5,716	5,625
1,2900	6,3662	7,6512	0,8321	0,8846	5,632	5,625

Fuente: elaboración propia.

Se observa que, de acuerdo con los resultados de las iteraciones, el tirante normal debe alcanzar un valor de $y = 1,29$ m, para producir un caudal de

$Q = 4,5 \text{ m}^3/\text{s}$, con un área de $636,62 \text{ cm}^2$, un perímetro mojado de $765,12 \text{ cm}$ y una velocidad de $0,71 \text{ m/s}$.

3. ENERGÍA ESPECÍFICA

Este capítulo se enfoca sobre la utilización del teorema de conservación de la energía y la aplicación de la ecuación que Bernoulli para el análisis del balance energético del flujo en una o dos secciones transversales del canal. Los tipos de energía que actúan en una partícula de fluido son la energía o carga de velocidad, la carga de presión hidrostática y la carga de elevación geométrica, todas medidas desde un plano de referencia. Las tres formas de energía están representadas de la siguiente forma:

- Energía potencial por unidad de peso: corresponde a la altura o elevación de un punto A del flujo en relación con el nivel de referencia que se tenga, la energía potencial se representada por z_A .
- Energía cinética por unidad de peso: es originada por la velocidad del flujo en una sección transversal, calculada por la relación: $\alpha \frac{V_A^2}{2g}$ en donde α es el coeficiente de Coriolis o coeficiente de corrección de la energía cinética.
- Energía de presión por unidad de peso: corresponde a la energía de presión de un flujo en una transversal. La energía de presión está representada $d_A \cos \theta$ donde d_A representa el tirante de agua que se presenta en la sección del canal analizado y θ es el ángulo de inclinación del fondo del canal.

Matemáticamente y de acuerdo con el teorema de Bernoulli, la energía total por unidad de peso en una sección del canal se puede expresar como:

$$H = z_A + d_A \cos \theta + \alpha \frac{V_A^2}{2g}$$

Cuando se tienen canales con pendientes bajas, $\theta = 0$ la energía total se reduce a:

$$H = z_A + d_A + \alpha \frac{V_A^2}{2g}$$

Donde:

$z_A + d_A =$ energía potencial por unidad de peso

$\alpha \frac{V_A^2}{2g} =$ energía cinética por unidad de peso

Al aplicar esta ecuación, normalmente se supone un movimiento con flujos paralelos, por lo que la suma de $z_A + d_A$ se vuelve constante, y se sustituye por el tirante de agua, y . Considerando el plano de referencia como el fondo del canal, la energía específica del flujo en un canal abierto se define como:

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

Y para canales con una pendiente de fondo pequeña se asume $\alpha=1$, quedando:

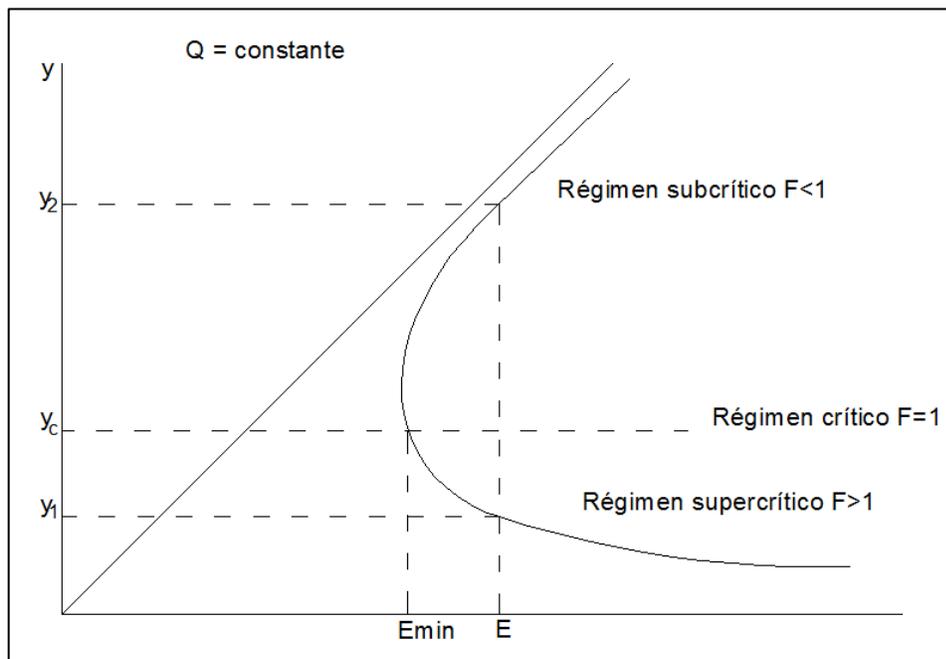
$$E = y + \frac{V^2}{2g}$$

Al sustituir la velocidad del flujo, despejándola de la ecuación de continuidad, $V=Q/A$, la ecuación de la energía específica queda:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Al representar gráficamente esta ecuación, para un caudal constante y dada la forma geométrica de la sección transversal, se obtiene la curva de la energía específica para esa sección en particular. Representa la variación de la energía específica en función del tirante de agua. Esta curva muestra que, en la misma sección, dos profundidades diferentes producen la misma energía específica, a estas profundidades se les llama profundidades conjugadas.

Figura 15. **Curva de energía específica**



Fuente: SOTELO AVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. p. 167.

3.1. Flujo crítico, subcrítico y supercrítico

A continuación, se describe el flujo crítico, subcrítico y supercrítico.

3.1.1. Flujo crítico

El estado crítico de un flujo se define como el que posee la mínima energía específica, teniendo la característica que se presenta únicamente para un valor particular de la profundidad de agua, llamada tirante o profundidad crítica. Por aparte recordar que el régimen del flujo se define por medio del Número de Froude, valor adimensional que relaciona las fuerzas de inercia, producidas por la velocidad del flujo y las fuerzas gravitacionales, producidas por la gravedad (peso), se dice que el estado crítico es cuando ambas fuerzas están en equilibrio, por lo que el resultado para este caso en particular es igual a 1. Para el flujo crítico se puede demostrar mediante el siguiente procedimiento matemático:

Partiendo de la ecuación de la energía específica:

$$E = y + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Al tomar la primera derivada de la ecuación de la energía respecto de y y Q como constante se obtiene:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy} = 1 - \frac{V^2}{gA} \frac{dA}{dy}$$

Donde el diferencial del área mojada dA que está cerca de la superficie libre se puede representar como Tdy , donde T es el ancho superficial del canal, y la profundidad dada por $y=A/T$. Reemplazando lo anterior, la ecuación se convierte en:

$$\frac{dE}{dy} = 1 - \frac{V^2 T}{gA} = 1 - \frac{V^2}{gy}$$

Cuando el flujo se encuentra en su estado crítico la energía específica es mínima, es decir, $dE/dy = 0$. Entonces, la ecuación queda representada como:

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{D}{2}$$

Donde D es la profundidad del canal.

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

Con esta ecuación se establece que cuando se tenga el estado crítico en un flujo la altura respecto de su velocidad será igual a la mitad de su profundidad.

$$\frac{V}{\sqrt{gD}} = 1$$

De donde se obtiene la ecuación de Froude:

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g D_h}}$$

A esta ecuación se le llama número de Froude, en donde el numerador representa las fuerzas de inercia y el denominador las fuerzas gravitacionales, para el estado crítico están en equilibrio y el resultado es 1.

Para el régimen crítico pueden definirse los siguientes términos:

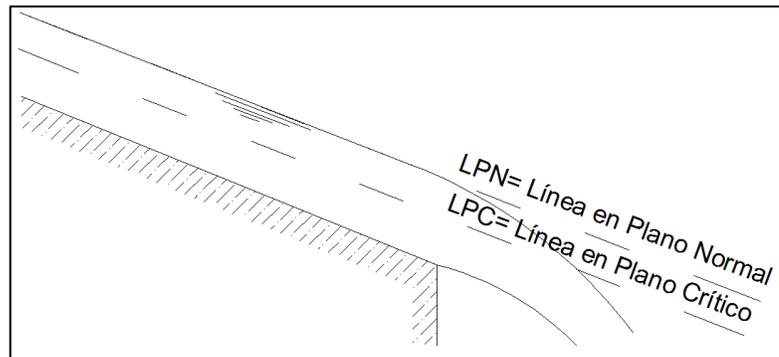
- Caudal o gasto crítico: caudal producido con una energía específica mínima de un flujo.
- Tirante crítico: tirante o profundidad de agua que se presenta para el caudal crítico.
- Velocidad crítica: velocidad del flujo producida por el caudal crítico.
- Pendiente crítica: valor de la pendiente del fondo del canal que produce un tirante uniforme en toda la longitud del canal, siendo este el tirante crítico, produciendo así, el caudal crítico.

3.1.2. Flujo subcrítico

Cuando las condiciones de flujo en la que el tirante es mayor que los críticos, la velocidad es más pequeña que las críticas y cuando el número de Froude es menor a la unidad, se define como un estado de flujo subcrítico. En este régimen quien domina el movimiento son las fuerzas gravitacionales, el flujo es ordenado, con una velocidad baja, tranquilo y tiene movimiento uniforme, además el número de Froude es menor a 1, es decir:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD}} < 1$$

Figura 16. **Flujo subcrítico**



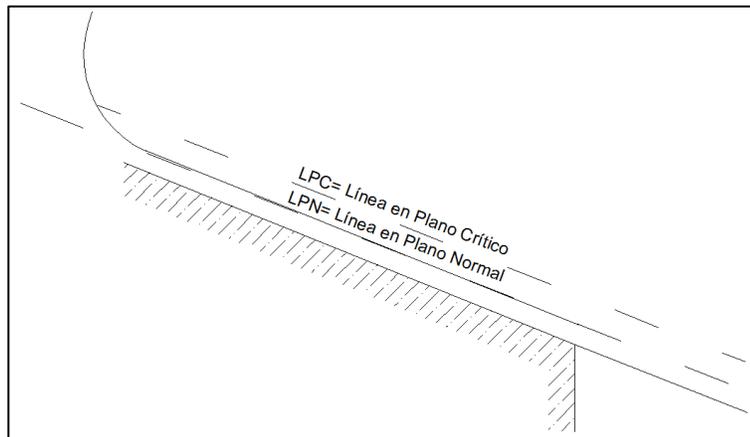
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

3.1.3. **Flujo supercrítico**

En este flujo las condiciones hidráulicas indican que el tirante es menor que el crítico, la velocidad es mayor que la crítica y el número de Froude es mayor a la unidad. Este régimen tiene características de un flujo con velocidad alta, son torrenciales, desordenado y las fuerzas de inercia son las que dominan el movimiento, además el número de Froude es mayor a 1.

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD}} > 1$$

Figura 17. **Flujo supercrítico**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Los tipos de flujo se representan claramente en la curva de energía específica, está dividida por la zona superior de la curva arriba de la línea horizontal que pasa por la profundidad crítica y corresponde al flujo subcrítico ($y_2 > y_c$) y la zona inferior de la curva donde corresponde al flujo supercrítico ($y_1 < y_2$), abajo de la línea horizontal que pasa por la profundidad crítica, como lo muestra la figura 14.

Entonces, un flujo puede ser supercrítico cuando:

$y < y_c$: el tirante de agua es menor que el crítico, o cuando

$S_f > S_c$: la pendiente de fondo es mayor a la crítica, o cuando

$F > 1$: cuando el número de Froude es mayor a 1, o cuando

$V > V_c$: cuando la velocidad del flujo es mayor a la velocidad crítica.

Un flujo puede ser crítico cuando:

- $y = y_c$: el tirante de agua es igual que el crítico
- $S_f = S_c$: la pendiente de fondo es igual a la crítica
- $F=1$: cuando el número de Froude es igual a 1
- $V=V_c$: cuando la velocidad del flujo es igual a la velocidad crítica

Un flujo puede ser subcrítico cuando:

- $y > y_c$: el tirante de agua es mayor que el crítico
- $S_f < S_c$: la pendiente de fondo es menor a la crítica
- $F < 1$: cuando el número de Froude es menor a 1
- $V < V_c$: cuando la velocidad del flujo es menor a la velocidad crítica

3.2. Profundidad crítica. Diversas secciones de canal

La profundidad crítica está definida como la correspondiente a la velocidad promedio para un flujo crítico, de igual forma cuando un caudal determinado transita por un canal con la energía específica mínima.

La ecuación que está dada para desarrollar el régimen crítico es la siguiente:

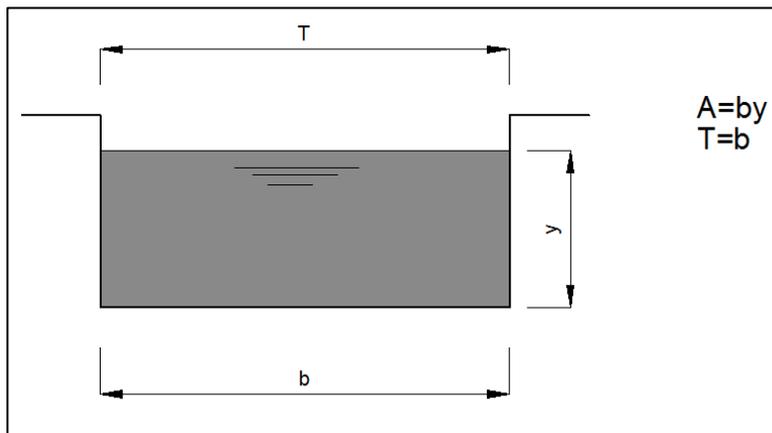
$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c}$$

Con esta ecuación se podrá entender que existe un tirante crítico por la forma de la sección de un canal y el gasto.

3.2.1. Sección rectangular

A continuación, se presenta la sección rectangular.

Figura 18. Canal rectangular



Fuente: RODRIGUEZ RUÍZ, Pedro. *Hidráulica II*. p.138.

Relación entre el tirante crítico y el caudal unitario:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{b^3 y_c^3}{b}$$

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

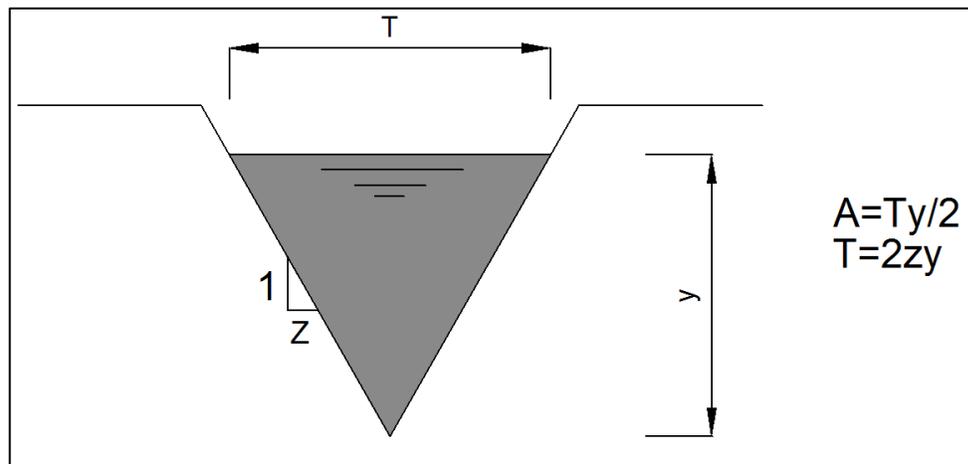
El caudal que circula en una sección rectangular de una unidad de ancho se representa $q = Q/b$, por lo que la ecuación queda de la siguiente forma:

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

3.2.2. Sección triangular

A continuación, se presenta la sección triangular.

Figura 19. Canal triangular



Fuente: RODRIGUEZ RUÍZ, Pedro. *Hidráulica II*. p. 140.

En la ecuación del régimen crítico se sustituye A y T, se tiene:

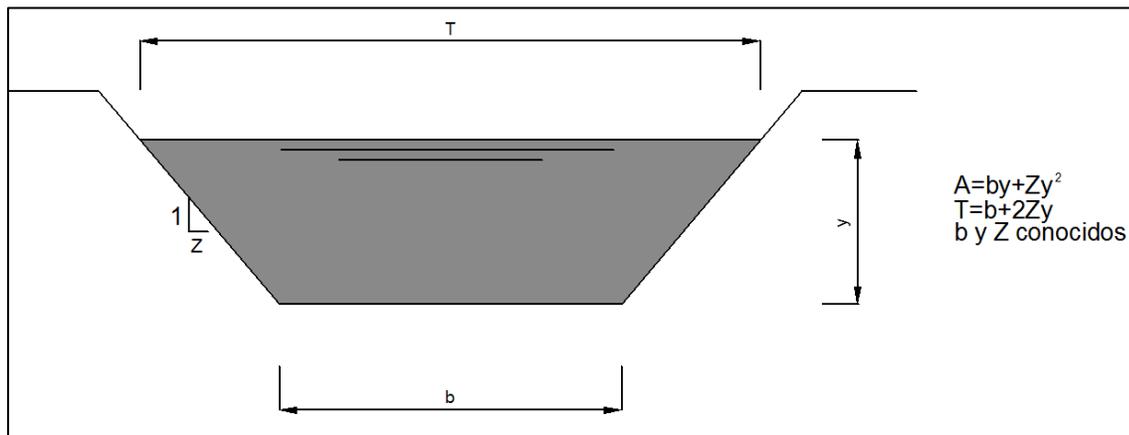
$$\frac{Q^2}{g} = \frac{Z^3 y_c^6}{2Z y_c}$$

$$y_c = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{gZ^2}}$$

3.2.3. Sección trapezoidal de un canal

A continuación, se presenta la sección trapezoidal de un canal.

Figura 20. Canal trapezoidal

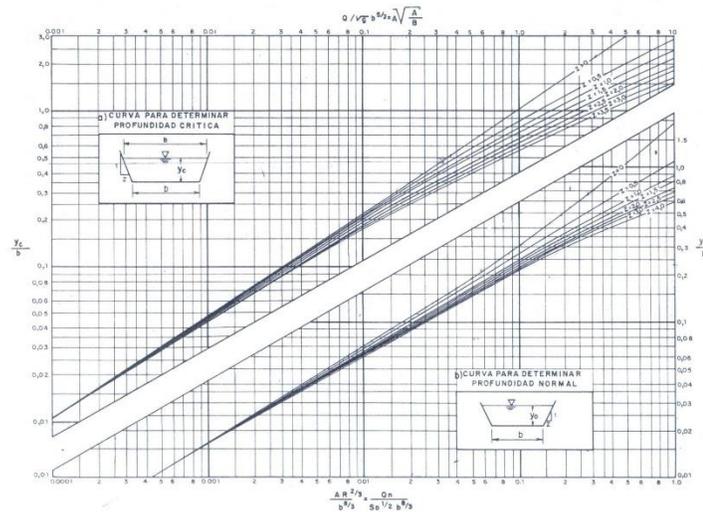


Fuente: RODRÍGUEZ RUÍZ, Pedro. *Hidráulica II*. p. 143.

En la ecuación del régimen crítico se sustituye A y T , se tiene:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{(by_c + Zy_c^2)^3}{b + 2Zy_c}$$

Figura 21. **Nomograma para determinar el tirante normal y crítico para una sección trapezoidal**



Fuente: <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com>. Consulta: octubre de 2018.

3.3. Ejercicios de aplicación utilizando Hcanales

A continuación, se muestra un ejemplo de los ejercicios de aplicación utilizando Hcanales.

3.3.1. Ejemplo 4

Un canal trapezoidal tiene un ancho de solera de 1 m, talud $Z=1$ y debe conducir un caudal de $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Calcular el tirante crítico, la energía específica mínima y la pendiente crítica si el coeficiente de rugosidad es $n=0,015$:

- Determinar y_c
- Determinar la energía específica mínima

- Hallar la pendiente crítica

Datos:

$$b = 1 \text{ m}$$

$$Z = 1$$

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

$$n = 0,015$$

Estos datos se ingresarán en el programa Hcanales. Para el primer inciso, en el que se necesita determinar el tirante crítico, se selecciona la pestaña de flujo crítico y se ingresan los datos que se proporcionaron, luego de ingresar los datos dar clic en el botón calcular y así se obtiene los resultados.

Figura 22. Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener el tirante crítico del ejemplo 4

Datos:	
Caudal (Q):	<input type="text" value="3"/> m ³ /s
Ancho de solera (b):	<input type="text" value="1"/> m
Talud (Z):	<input type="text" value="1"/>

Resultados:			
Tirante crítico (y):	<input type="text" value="0.7529"/> m	Perímetro (p):	<input type="text" value="3.1296"/> m
Área hidráulica (A):	<input type="text" value="1.3198"/> m ²	Radio hidráulico (R):	<input type="text" value="0.4217"/> m
Espejo de agua (T):	<input type="text" value="2.5058"/> m	Velocidad (v):	<input type="text" value="2.2731"/> m/s
Número de Froude (F):	<input type="text" value="1.0000"/>	Energía específica (E):	<input type="text" value="1.0163"/> m-Kg/Kg

Fuente: elaboración propia.

- El tirante crítico es de 0,7529 m, con un área de 1,3198 m² y una velocidad de 2,2731 m/s.

- Energía específica mínima se encontrará con la siguiente fórmula.

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

$$E = 0,7529 \text{ m} + \frac{(2,2731\text{m})^2}{2(9,81\text{m/s}^2)}$$

$$E = 1,0163 \text{ m} \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

El resultado puede compararse con el resultado obtenido en el programa.

- Hallar la pendiente crítica.

Para obtener la pendiente crítica se utilizará el programa Hcanales, se accede a la pestaña identificada como otros, luego a la pestaña pendiente y se ingresan los datos que solicita.

Figura 23. Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la pendiente crítica del ejemplo 4

Datos:			
Caudal (Q):	<input type="text" value="3"/>	m ³ /s	
Tirante (y):	<input type="text" value="0.7529"/>	m	
Ancho de solera (b):	<input type="text" value="1"/>	m	
Talud (Z):	<input type="text" value="1"/>		
Rugosidad (n):	<input type="text" value="0.015"/>		

Resultados:			
Pendiente (S):	<input type="text" value="0.003676"/>	m/m	
Área hidráulica (A):	<input type="text" value="1.3198"/>	m ²	
Espejo de agua (T):	<input type="text" value="2.5058"/>	m	
Número de Froude (F):	<input type="text" value="1.0000"/>		
Perímetro (p):	<input type="text" value="3.1295"/>	m	
Radio hidráulico (R):	<input type="text" value="0.4217"/>	m	
Velocidad (v):	<input type="text" value="2.2731"/>	m/s	
Energía específica (E):	<input type="text" value="1.0163"/>	m-Kg/Kg	

Fuente: elaboración propia.

La pendiente crítica es de 0,003676 m/m o 3,676 m/1 000 m.

3.3.2. Ejemplo 5

Un canal triangular transporta un caudal de agua de 12 m³/s y se encuentra construido con concreto sin acabar, cuyo coeficiente de Manning es n=0,014. Determinar la profundidad crítica, la velocidad crítica y la pendiente crítica del canal.

Datos:

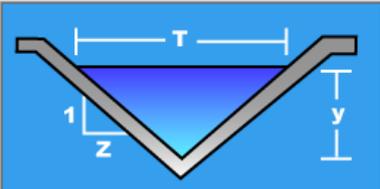
$$Q = 12 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$n = 0,014$$

Cálculo de la profundidad crítica y la velocidad crítica.

Figura 24. Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la profundidad y la velocidad crítica del ejemplo 5

Datos:	
Caudal (Q):	<input type="text" value="12"/> m ³ /s
Ancho de solera (b):	<input type="text" value="0"/> m
Talud (Z):	<input type="text" value="3"/>



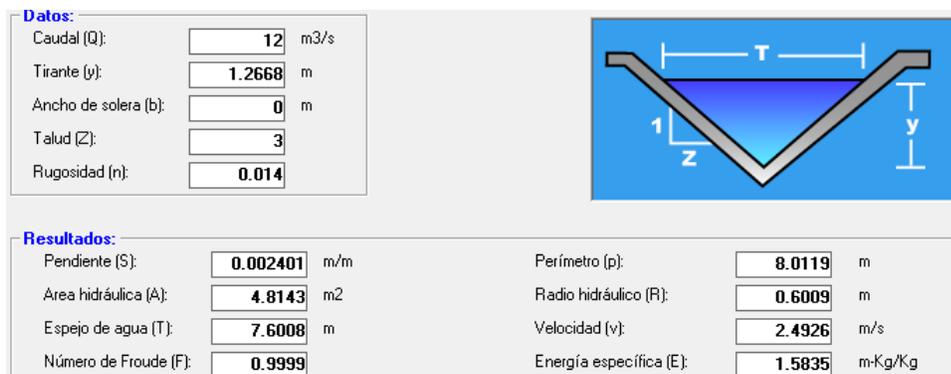
Resultados:			
Tirante crítico (y):	<input type="text" value="1.2668"/> m	Perímetro (p):	<input type="text" value="8.0117"/> m
Área hidráulica (A):	<input type="text" value="4.8141"/> m ²	Radio hidráulico (R):	<input type="text" value="0.6009"/> m
Espejo de agua (T):	<input type="text" value="7.6006"/> m	Velocidad (v):	<input type="text" value="2.4927"/> m/s
Número de Froude (F):	<input type="text" value="1.0000"/>	Energía específica (E):	<input type="text" value="1.5835"/> m-Kg/Kg

Fuente: elaboración propia.

La profundidad crítica es de 1,2668 m y la velocidad crítica es de 2,4927 m/s.

Cálculo de la pendiente crítica.

Figura 25. Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la pendiente crítica del ejemplo 5



Fuente: elaboración propia.

La pendiente crítica es de 0,002401 m/m.

3.3.3. Ejemplo 6

Un canal rectangular de 3 m de ancho y $n=0,014$ transporta un caudal de agua de 13,4 m³/s. Determinar la profundidad crítica, la energía específica mínima y la pendiente del canal.

Datos:

Ancho = 3 m

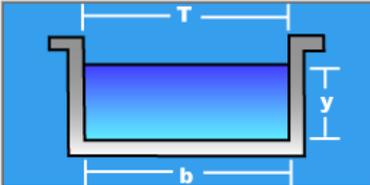
$$n = 0,014$$

$$Q = 13,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Calculando la profundidad crítica y la energía específica mínima.

Figura 26. **Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la profundidad crítica y la energía específica del ejemplo 6**

Datos:	
Caudal (Q):	<input type="text" value="13.4"/> m ³ /s
Ancho de solera (b):	<input type="text" value="3"/> m
Talud (Z):	<input type="text" value="0"/>



Resultados:			
Tirante crítico (y):	<input type="text" value="1.2670"/> m	Perímetro (p):	<input type="text" value="5.5339"/> m
Área hidráulica (A):	<input type="text" value="3.8009"/> m ²	Radio hidráulico (R):	<input type="text" value="0.6868"/> m
Espejo de agua (T):	<input type="text" value="3.0000"/> m	Velocidad (v):	<input type="text" value="3.5255"/> m/s
Número de Froude (F):	<input type="text" value="1.0000"/>	Energía específica (E):	<input type="text" value="1.9005"/> m-Kg/Kg

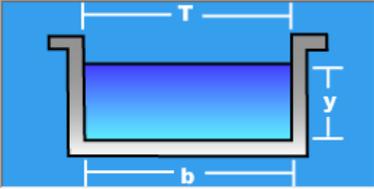
Fuente: elaboración propia.

La profundidad crítica es de 1,2670 m y la energía específica es de 1,9005 m-kg/kg.

Calculando la pendiente crítica con los datos obtenidos.

Figura 27. Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la pendiente crítica del ejemplo 6

Datos:	
Caudal (Q):	<input type="text" value="13.4"/> m ³ /s
Tirante (y):	<input type="text" value="1.2670"/> m
Ancho de solera (b):	<input type="text" value="3"/> m
Talud (Z):	<input type="text" value="0"/>
Rugosidad (n):	<input type="text" value="0.014"/>



Resultados:			
Pendiente (S):	<input type="text" value="0.004020"/> m/m	Perímetro (p):	<input type="text" value="5.5340"/> m
Área hidráulica (A):	<input type="text" value="3.8010"/> m ²	Radio hidráulico (R):	<input type="text" value="0.6868"/> m
Espejo de agua (T):	<input type="text" value="3.0000"/> m	Velocidad (v):	<input type="text" value="3.5254"/> m/s
Número de Froude (F):	<input type="text" value="1.0000"/>	Energía específica (E):	<input type="text" value="1.9005"/> m-Kg/Kg

Fuente: elaboración propia.

La pendiente crítica es de 0,004020 m/m.

4. FLUJO RÁPIDAMENTE VARIADO

4.1. Características del flujo rápidamente variado

El flujo rápidamente variado presenta cambios bruscos del tirante de agua y en su velocidad en un tramo relativamente corto, puede pasar de ser un flujo supercrítico a subcrítico o viceversa, estos cambios traen consigo un aumento o disminución de la energía específica.

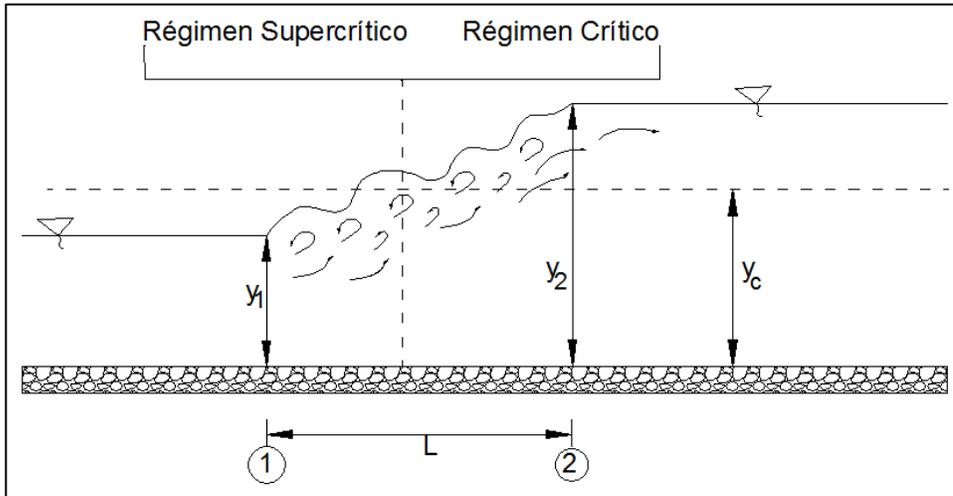
Características del flujo rápidamente variado:

El flujo en distancias cortas varía de forma abrupta a través del canal, cuando se tiene un cambio en la sección del canal como lo es en una compuerta de exclusiva, que permite el paso del flujo sobre la superficie y esto hace que se dé una variación rápida del fluido y su velocidad puede llegar a ser grande en ese punto, esto puede generar remolinos y corrientes.

Cuando se quiere determinar los datos de las distribuciones de las velocidades se tiene que aproximar, ya que los coeficientes son difíciles de obtener y esto hace que supere el valor de 1.

Un ejemplo claro del flujo rápidamente variado es el fenómeno conocido como resalto hidráulico, cuyo esquema se muestra en la figura 27, provocando un aumento brusco del tirante de agua y una disminución de la velocidad del flujo.

Figura 28. **Representación del cambio de régimen**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

4.2. Cambios de sección de flujo: ensanchamiento, estrechamiento

El flujo de un canal no siempre será conducido de un punto a otro con la misma sección, por lo que el diseño geométrico busca regular la geometría y adecuarla de mejor forma para que las líneas de flujo se adapten a ella y que cuando tengan un cambio de dirección fluyan suavemente.

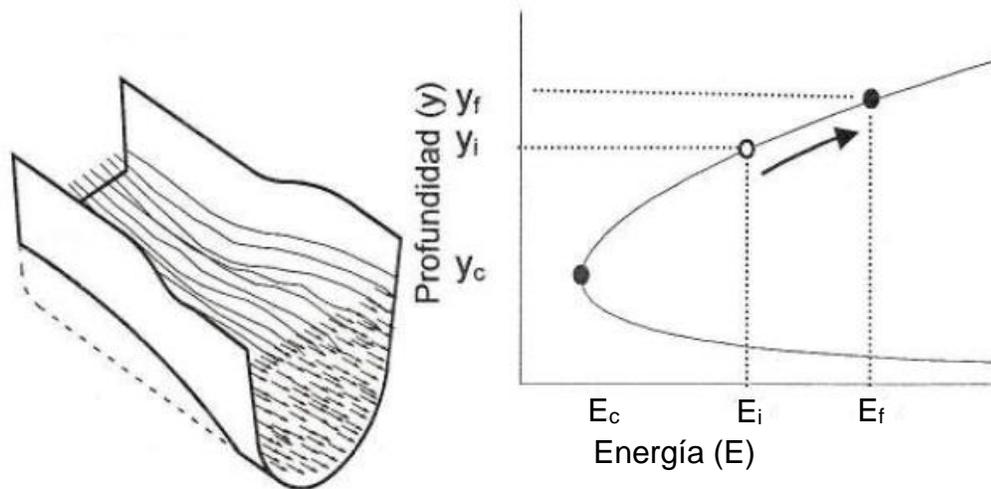
4.2.1. Ensanchamiento

Son aquellas secciones de canales donde sufren un cambio de geometría y pasa de una sección de entrada menor a una sección de salida mayor.

Si en un canal existe un escalón o una ampliación o ambas y se tiene un estado subcrítico en la entrada del canal y al pasar en la sección de ensanchamiento ésta conserva el estado, pero aumenta la altura desde la

profundidad inicial hasta la profundidad final, la pared del canal de forma pasiva hace que la energía específica aumente y siga la dirección del flujo.

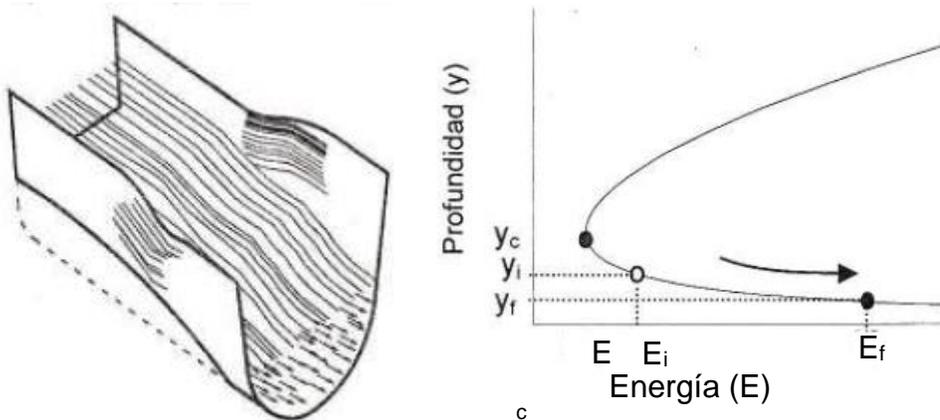
Figura 29. **Ensanchamiento de un canal con acceso subcrítico**



Fuente: MEJÍA, Francisco Jaime. *El transporte de cantidad de movimiento en canales*. p.23.

Si se tiene un estado supercrítico en la entrada del canal y al pasar por la sección de ensanchamiento esta conserva el estado, pero disminuye la altura del flujo desde la profundidad inicial hasta la profundidad del flujo final. Se observa que cuando se expande el canal la energía específica aumenta.

Figura 30. **Ensanchamiento de un canal con acceso supercrítico**



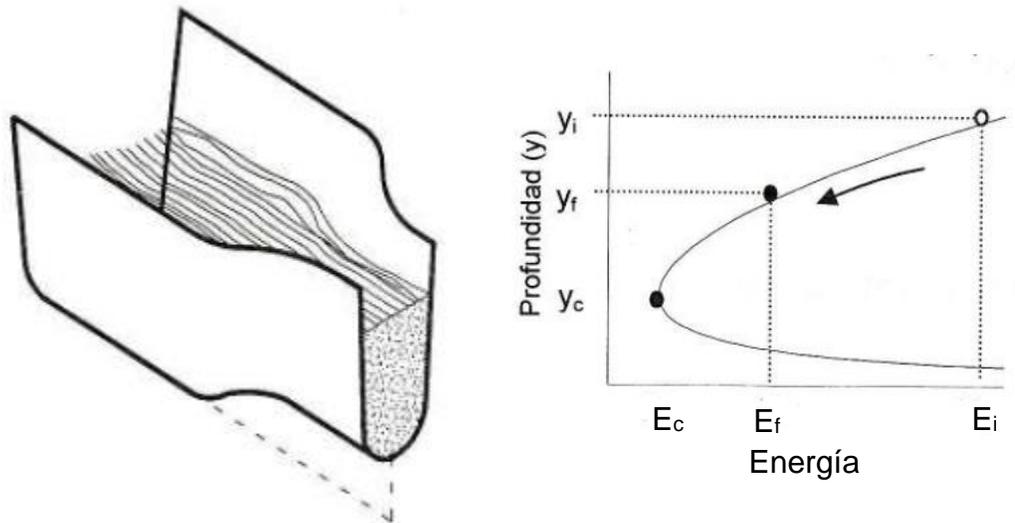
Fuente: MEJÍA, Francisco Jaime. *El transporte de cantidad de movimiento en canales*. p.23.

4.2.2. Estrechamiento

Son aquellos canales que en su sección reducen su tamaño, pasan de una sección mayor a una sección menor.

Cuando el flujo en la entrada del canal es un estado subcrítico y pasa de la sección mayor a la sección menor, esta disminuye la energía lo cual hace que la altura reduzca también, pero siempre conservando el estado subcrítico.

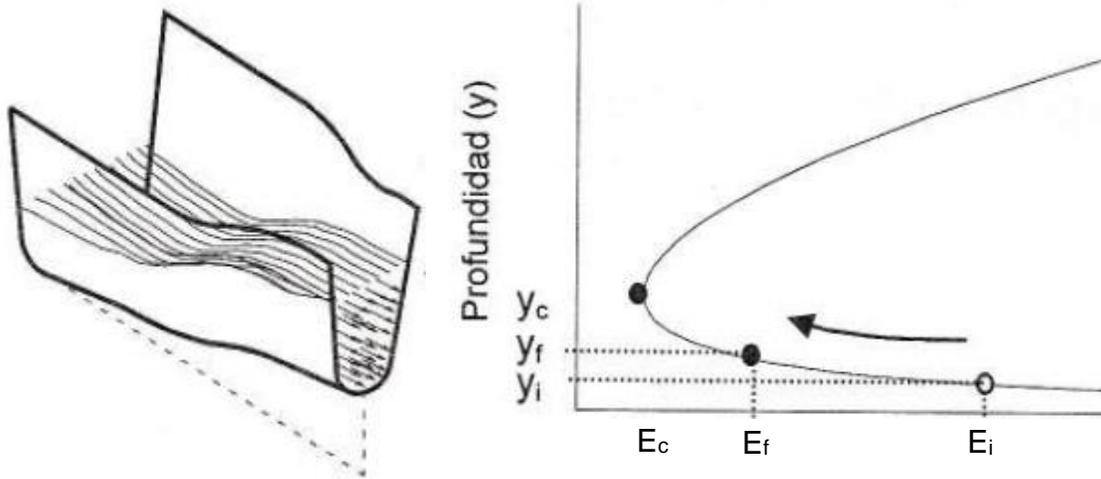
Figura 31. **Estrechamiento en un canal con acceso subcrítico**



Fuente: MEJÍA, Francisco Jaime. *El transporte de cantidad de movimiento en canales*. p.22.

Si el acceso de un flujo ocurre en un estado supercrítico y el empuje que se tiene en el canal se manifiesta en contra de la corriente hará que disminuya la energía en la sección y originará un aumento de altura del flujo, pero seguirá conservando el estado supercrítico.

Figura 32. **Estrechamiento en un canal con acceso supercrítico**

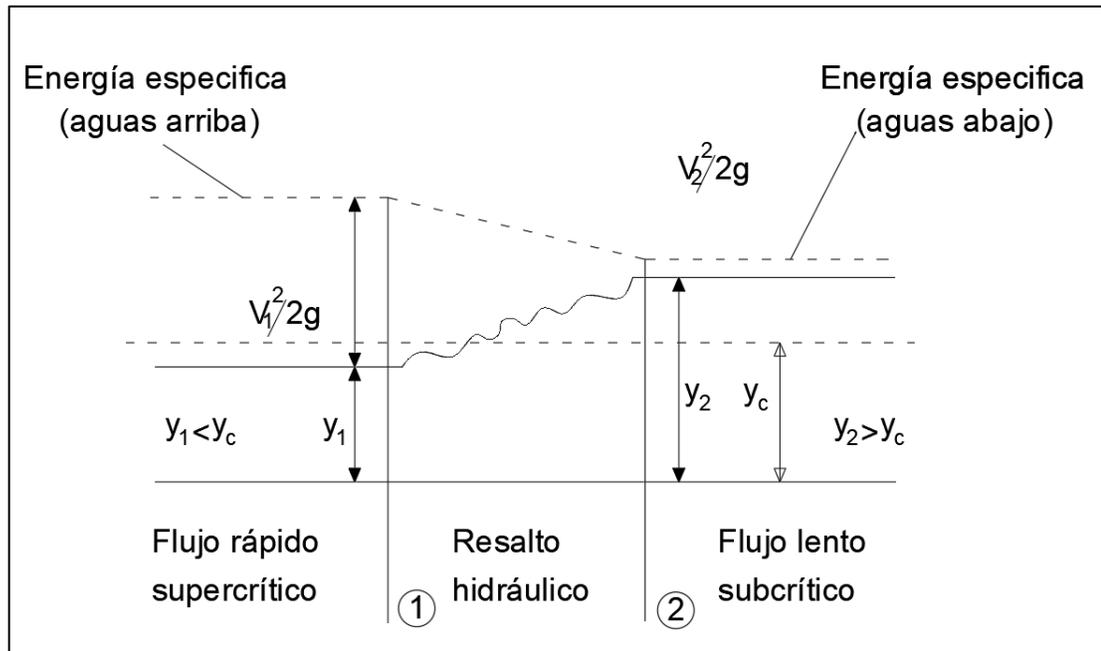


Fuente: MEJÍA, Francisco Jaime. *El transporte de cantidad de movimiento en canales*. p.22.

4.3. Resalto hidráulico

Este fenómeno es un ejemplo claro del flujo rápidamente variado, resulta del cambio de flujo supercrítico al subcrítico, provocando un aumento del tirante de agua, acompañado de una disminución de su velocidad, disminuyendo su energía cinética, por tal razón se usa como un disipador natural de energía cinética en un espacio relativamente corto. La figura 32 muestra este fenómeno.

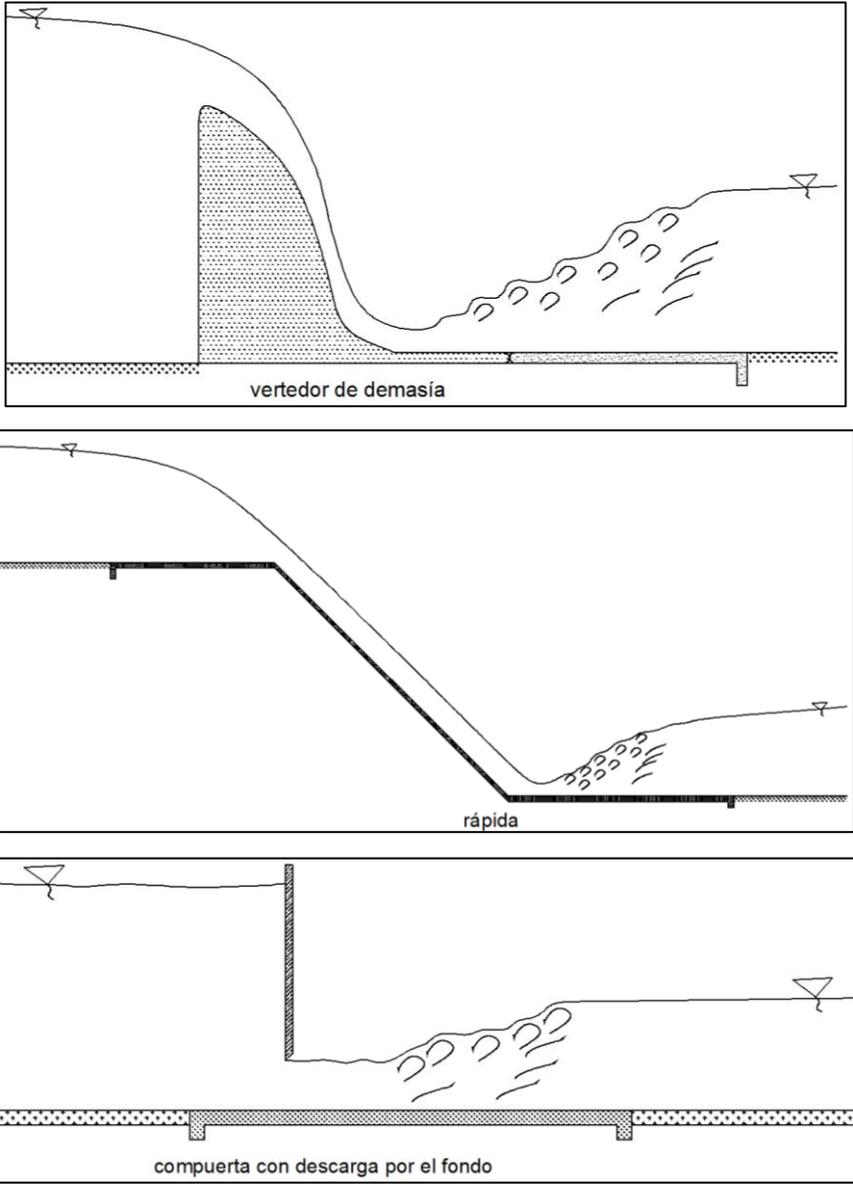
Figura 33. Resalto hidráulico



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

El resalto hidráulico es creado cuando el flujo va rápidamente y encuentra una disminución de pendiente de manera brusca, lo que crea un aumento del tirante y esto hace que la velocidad disminuya. En general, el resalto hidráulico se produce cuando el flujo se acelera, por una caída o por el paso de una compuerta y luego se registra una disminución de su velocidad.

Figura 34. Lugares apropiados para formarse el resalto hidráulico

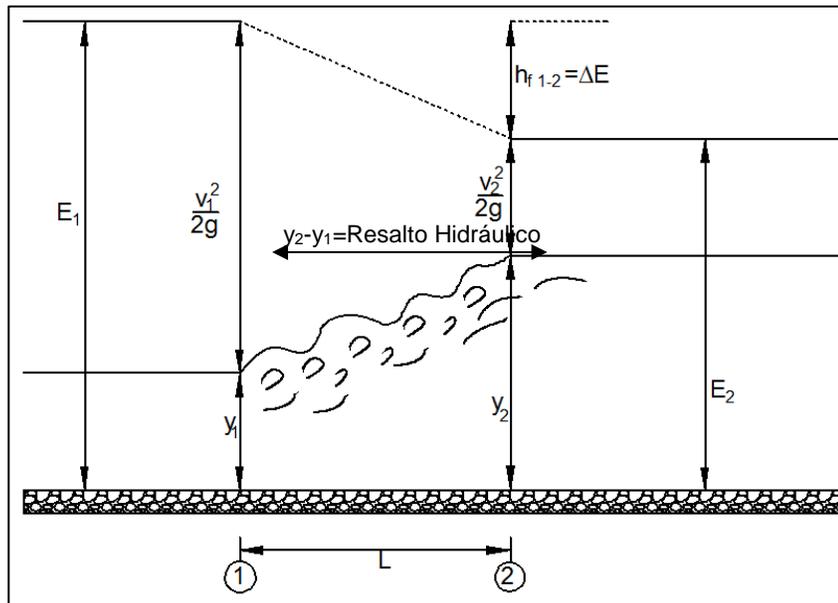


Fuente: elaboración propia, utilizando AutoCAD 2013.

La figura 34 muestra las características hidráulicas de un resalto hidráulico:

- Cuando el agua permanece en régimen supercrítico, se observa que la energía cinética es la que predomina.
- Los puntos 1 y 2, representan el inicio y el final del resalto.
- Los tirantes y_1 y y_2 que se tiene antes y después de que ocurra el resalto son llamados tirantes conjugados.
- La altura del resalto es representada como la diferencia entre $y_2 - y_1$.
- La energía E_1 es la energía específica que se tiene antes del resalto y E_2 es la energía específica que se obtiene después de haber ocurrido este. La energía en 1 es mayor que la energía en 2, ya que el fenómeno disipa la energía.
- La pérdida de energía entre las secciones 1 y 2, viene representada por $h_{f 1-2} = \Delta E = E_1 - E_2$.
- La distancia L que separa las secciones 1 y 2, representa la longitud del resultado.

Figura 35. **Elementos del resalto hidráulico**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

4.3.1. **Tirantes conjugados en canales horizontales**

A continuación, se muestra la sección rectangular de los tirantes conjugados en canales horizontales.

4.3.1.1. **Sección rectangular**

Los tirantes que se tienen antes y después de que ocurra el fenómeno del resalto hidráulico son llamados tirantes conjugados. Estos reciben el nombre de tirante conjugado menor y_1 y tirante conjugado mayor y_2 , están relacionados por la ecuación:

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

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1 \right)$$

Donde:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$$

$$F_2 = \frac{V_2}{\sqrt{gy_2}}$$

Teniendo los datos de los tirantes conjugados la altura del resalto hidráulico $\Delta h = y_2 - y_1$.

4.3.1.2. Sección trapezoidal

Para la sección de un canal trapezoidal, la ecuación que permite conocer el resalto hidráulico es de cuarto grado teniendo una sola raíz positiva real, esto permite obtener el tirante conjugado mayor.

La ecuación está definida como:

$$J^4 + \frac{5t+2}{2}J^3 + \frac{(3t+2)(t+1)}{2}J^2 + \left[\frac{t^2}{2} + (t-6r)(t+1) \right]J - 6r(t+1)^2 = 0$$

Donde

El tirante conjugado menor, y_1

- $r = \frac{v_1^2}{2gy_1}$
- $t = \frac{b}{zy_1}$
- $J = \frac{y_1}{y_2}$

4.3.2. Tipos de salto hidráulico

El resalto hidráulico en canales con fondo horizontal o pendientes de fondo muy pequeñas, puede presentar distinto grado de desarrollo, el cual será función del número de Froude (Fr), antes de la formación del resalto, clasificándose de la siguiente manera:

Para $Fr = 1$: se presenta flujo crítico por lo que no forma resalto.

Para $Fr = 1$ a $1,7$: el flujo en la superficie del agua muestra algunas ondulaciones y presenta pequeños saltos, por lo que es llamado salto ondulatorio.

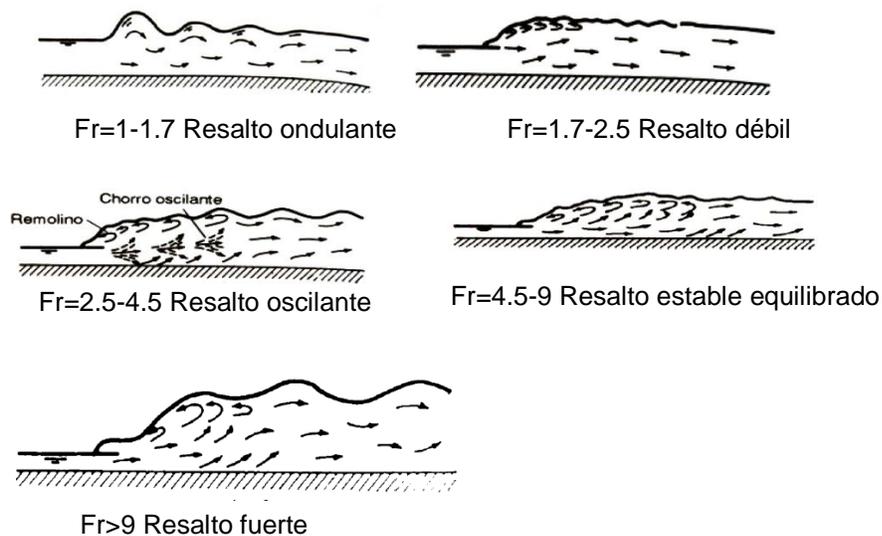
Para $Fr = 1,7$ a $2,5$: esta presenta pequeñas perturbaciones y remolinos que se pueden observar en la superficie del resalto, pero permanece de manera uniforme la superficie que se dirige agua hacia abajo. A esto se le conoce como resalto débil.

Para $Fr = 2,5$ a $4,5$: esta produce un chorro oscilante que ingresa desde el resalto hasta llegar a la superficie y sigue su curso sin periodicidad. Este resalto es conocido como resalto oscilante.

Para $Fr = 4,5$ a 9 : en este rango se produce un resalto permanente o estable, aquí el resalto se puede encontrar balanceado y se puede disipar mejor la energía.

Para $Fr = 9$ o mayor: en este rango se puede encontrar un resalto fuerte e irregular; el flujo del agua es rápido y se convierte en un chorro que choca con aguas intermitentes que se dirigen por debajo a la cara frontal del resalto, esto permite que se generen ondas hacia aguas abajo.

Figura 36. **Diferentes tipos de resaltos hidráulicos**



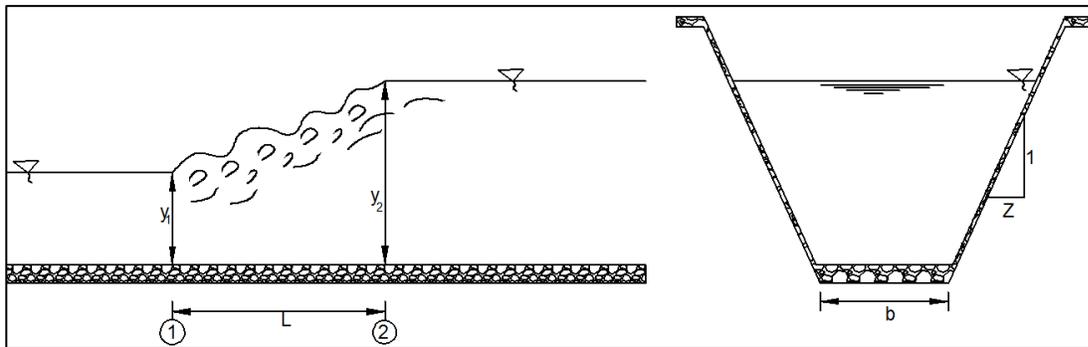
Fuente: RUÍZ RODRÍGUEZ, Pedro. *Hidráulica II*. p. 260, 261.

4.3.3. Longitud del resalto

Durante mucho tiempo se ha estudiado la longitud del resalto por parte de los investigadores ya que es un dato que es difícil de calcular con exactitud, debido a que tienen complicaciones a la hora de analizarlo por la inestabilidad que este presenta.

Se define como longitud del resalto hidráulico la distancia que se presenta entre la sección que marca principio y la sección donde finaliza el resalto. Para el cálculo de la longitud se tienen fórmulas empíricas, dentro de las cuales se encuentran los siguientes:

Figura 37. Longitud del resalto



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

- Longitud del resalto según Sieñchin

$$L = k(y_2 - y_1)$$

Donde:

L= longitud del resalto

y_1 = tirante conjugado menor

y_2 = tirante conjugado mayor

k= talud Z del canal, según la siguiente tabla:

Tabla IX. **Valores de k para cada talud Z**

Talud Z	0	0,50	0,75	1,00	1,25	1,5
k	5	7,90	9,20	10,6	12,6	15

Fuente: elaboración propia.

- Longitud de resalto según Hsing

$$L = 5y_2 \left(1 + \sqrt[4]{\frac{y_2 - y_1}{y_1}} \right)$$

- Longitud de resalto según Pavlovski

$$L = 2,5(1,95y_2 - 5y_1)$$

- Longitud de resalto según Schaumian

$$L = 3,6y_2 \left(1 - \frac{y_1}{y_2} \right) \left(1 + \frac{y_1}{y_2} \right)^2$$

- Longitud de resalto según Chertousov

$$L = 10,3y_1 \left[\sqrt{\left(\frac{y_c}{y_1}\right)^3 - 1} \right]^{0.81}$$

- Longitud de resalto según U.S. *Bureau of Reclamation*

Tabla X. **Valores para obtener la longitud del resalto**

F ₁	1,7	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	8,0	10
L/y ₂	4,0	4,35	4,85	5,28	5,55	5,8	6,0	6,1	6,12	6,1

Fuente: elaboración propia.

Donde:

$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$ = número de Froude en la sección de flujo supercrítico.

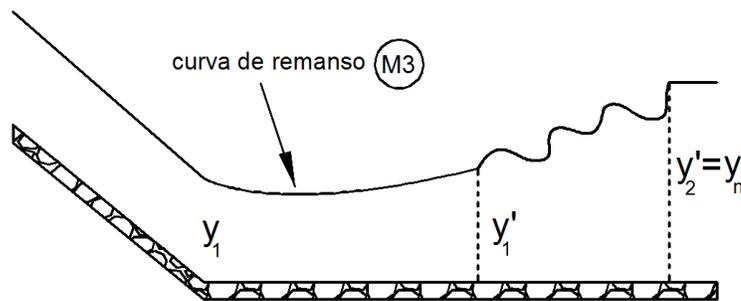
4.3.4. Ubicación del resalto hidráulico

El resalto hidráulico es un fenómeno en el cual se puede disipar la energía cinética, por eso es importante que se mantenga estable.

Una vez que el resalto es ocasionado se tiene un régimen subcrítico y este se ve reflejado en los efectos aguas arriba, entonces, cuando el flujo se estabiliza se presenta el tirante normal y_n .

- Cuando $y_2 > y_n$ el resalto hidráulico es conocido como barrido y se desplaza en favor de la corriente del flujo. Antes de ocurrir el fenómeno se forma una curva M3 uniendo el tirante inicial con el conjugado menor y'_1 .

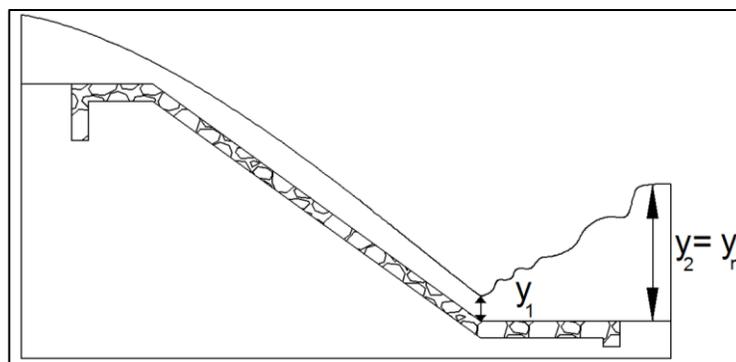
Figura 38. **Resalto barrido**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

- Cuando $y_2 = y_n$ el resalto hidráulico es conocido como claro, se encuentra cuando se tiene un cambio de pendiente.

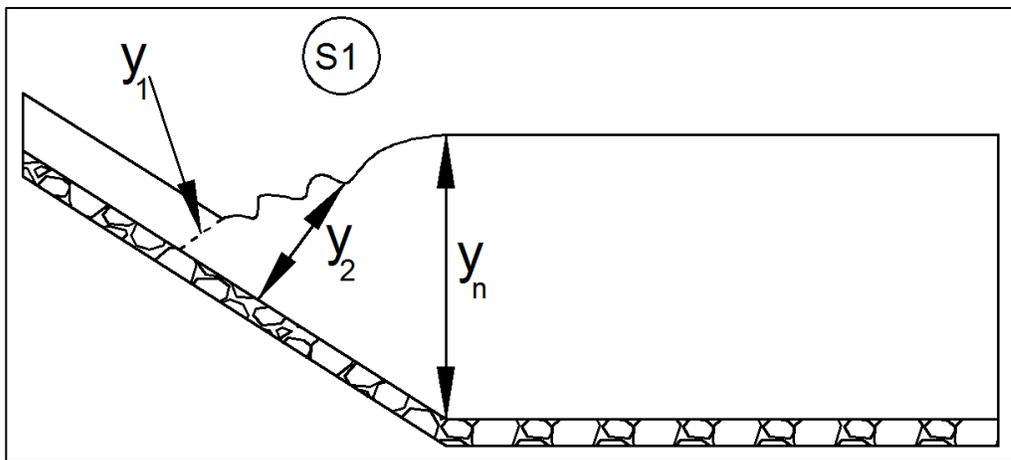
Figura 39. **Resalto claro**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

- Cuando $y_2 < y_n$ el resalto es considerado como ahogado, se desplaza en contra de la corriente del flujo, se encuentra ubicado en el tramo que tiene una pendiente mayor. Cuando ya ha ocurrido el resalto se crea una curva S1 que finaliza en el tirante normal.

Figura 40. **Resalto ahogado**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

4.4. Ejercicios de aplicación utilizando Hcanales

A continuación, se muestra un ejemplo de los ejercicios de aplicación utilizando Hcanales.

4.4.1. Ejemplo 7

Un canal rectangular de 2 m de ancho de solera, transporta un caudal de 3 m³/s. El tirante aguas abajo del resalto es 1 m. Determinar el tirante aguas arriba del resalto, la pérdida de energía e indicar el tipo de resalto.

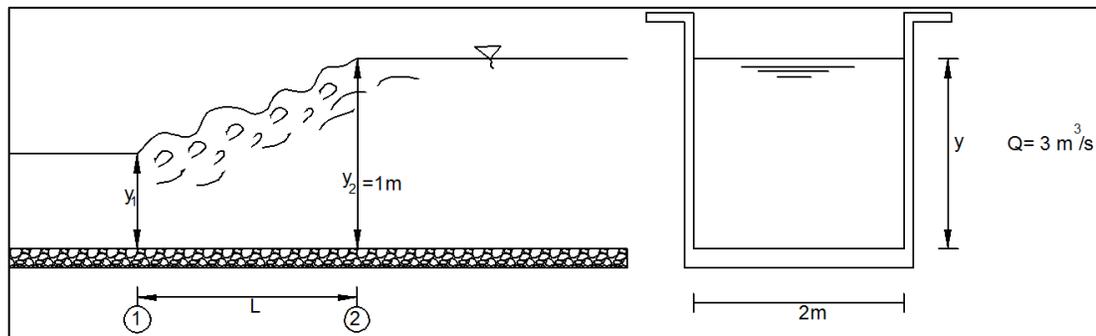
Datos:

$$b = 2 \text{ m}$$

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

$$y_2 = 1 \text{ m}$$

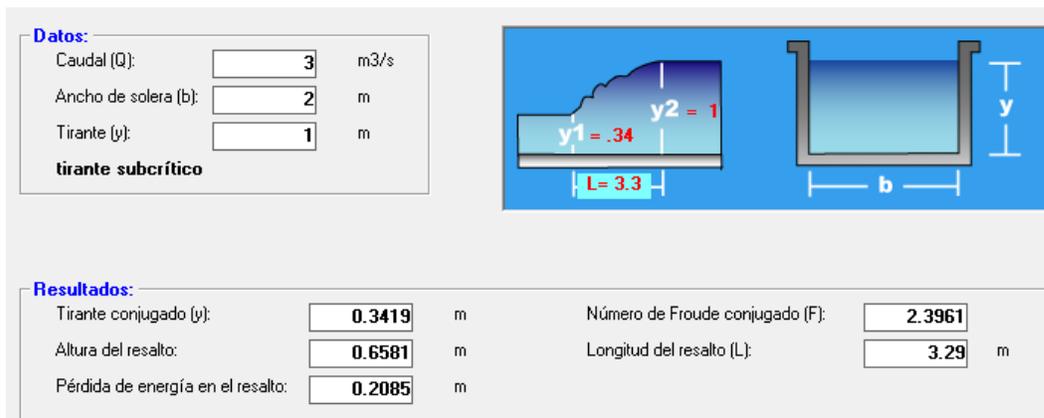
Figura 41. **Resalto hidráulico en una sección rectangular**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Para resolver el problema se emplea el programa Hcanales, seleccionar la pestaña resalto hidráulico sección rectangular y se ingresan los datos que genera el problema.

Figura 42. Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener el tirante y la pérdida de energía del ejemplo 7



Fuente: elaboración propia.

El programa arroja los datos que el ejercicio solicita.

El tirante aguas arriba es de 0,3419 m, la pérdida de energía es de 0,2085 m y se tiene un resalto claro, ya que el resalto se da al pie del canal de llegada.

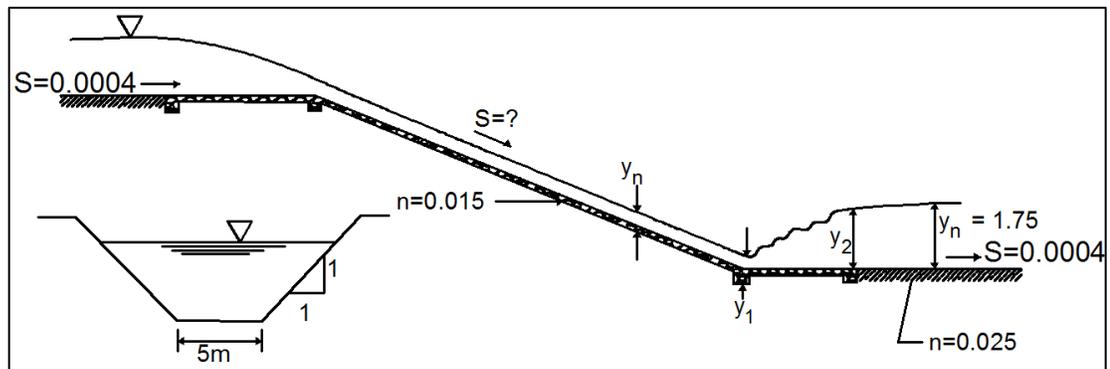
4.4.2. Ejemplo 8

Un canal trapezoidal tiene un ancho de solera $b=5\text{m}$, talud $Z=1$, rugosidad $n= 0,025$ y para una pendiente $S=0,0004$ m/m, adopta un tirante normal $y_n= 1,75$ m en flujo uniforme. Debido a razones topográficas, existe un tramo intermedio en el canal, con suficiente longitud y pendiente para que se establezca también flujo uniforme pero supercrítico.

Calcular la pendiente del tramo intermedio de manera que se produzca un resalto inmediatamente después de que termina dicho tramo. Deberá revestirse de concreto con rugosidad $n=0,015$, debido al aumento de velocidad.

Datos:

Figura 43. Canal trapezoidal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Primero se calculará la velocidad media en el canal con la ecuación de Manning.

$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S^{1/2}$$

Donde:

$$n = 0,025$$

$$S=0,0004 \text{ m/m}$$

$$y_n=1,75 \text{ m}$$

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

$$R_H = \frac{(5m + 1,75m) * 1,75m}{5m + 2\sqrt{1 + 1^2} * 1,75m}$$

$$R_H = \frac{11,8125 m^2}{9,9497 m} = 1,1872 m$$

Sustituyendo valores en la fórmula de Manning se tiene:

$$V = \frac{1}{0,025} (9,9497)^{2/3} (0,0004)^{1/2}$$

$$V = 0,8970 m/s$$

Teniendo el dato de la velocidad se procede a calcular el caudal con la ecuación de continuidad, se obtiene:

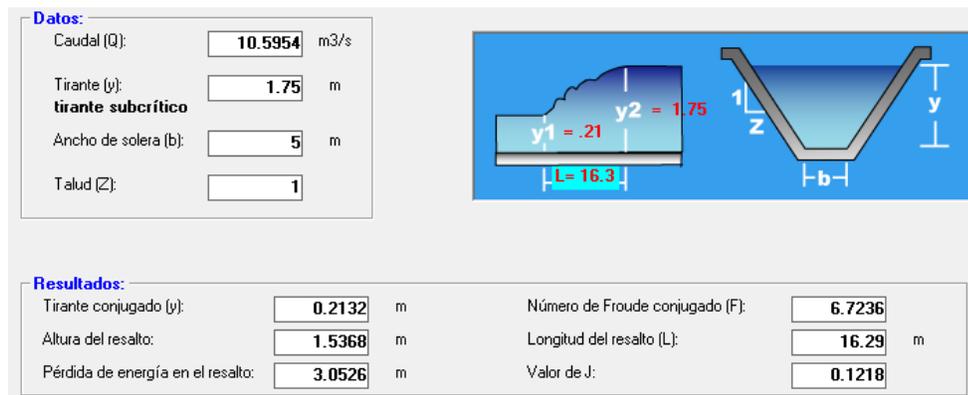
$$Q = vA$$

$$Q = 0,8970m/s * 11,8125 m^2$$

$$Q = 10,5954 m^3/s$$

Con el dato del caudal se calcula el tirante conjugado menor y_1 utilizando Hcanales, recordando que $y_2=y_n$.

Figura 44. Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener el tirante conjugado del ejemplo 8



Fuente: elaboración propia.

Con el programa se obtiene el tirante conjugado $y_n=0,2132$ m.

Para calcular el tirante crítico y_c , utilizar la fórmula siguiente:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{(by_c + Zy_c^2)^3}{b + 2Zy_c}$$

Remplazando los datos se obtiene:

$$\frac{10,5954^2}{9,81} = \frac{(5y_c + 1 * y_c^2)^3}{5 + 2 * 1 * y_c}$$

$$11,4437 = \frac{(5y_c + 1 * y_c^2)^3}{5 + 2 * 1 * y_c}$$

Se realizan iteraciones con una hoja de cálculo que queda con el siguiente formato:

Tabla XI. **Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante crítico del ejemplo 8**

y_c	$(5y_c + 1 * y_c^2)^3$	$5 + 2 * 1 * y_c$	$\frac{(5y_c + 1 * y_c^2)^3}{5 + 2 * 1 * y_c}$	$\frac{Q^2}{g}$
1,00	216,0000	7,0000	30,8571	11,4437
0,90	149,7213	6,8000	22,0178	11,4437
0,80	99,8973	6,6000	15,1360	11,4437
0,79	95,7011	6,5800	14,5442	11,4437
0,78	91,6363	6,5600	13,9689	11,4437
0,77	87,7000	6,5400	13,4098	11,4437
0,76	83,8896	6,5200	12,8665	11,4437
0,75	80,2024	6,5000	12,3388	11,4437
0,74	76,6356	6,4800	11,8265	11,4437
0,73	73,1867	6,4600	11,3292	11,4437

Fuente: elaboración propia.

El valor más cercano que se tiene es la de $y_c = 0,73$ m.

Entonces, los valores que se obtienen en los tirantes son:

$$y_1 < y_c < y_2$$

$$0,213\text{m} < 0,73\text{m} < 1,75\text{m}$$

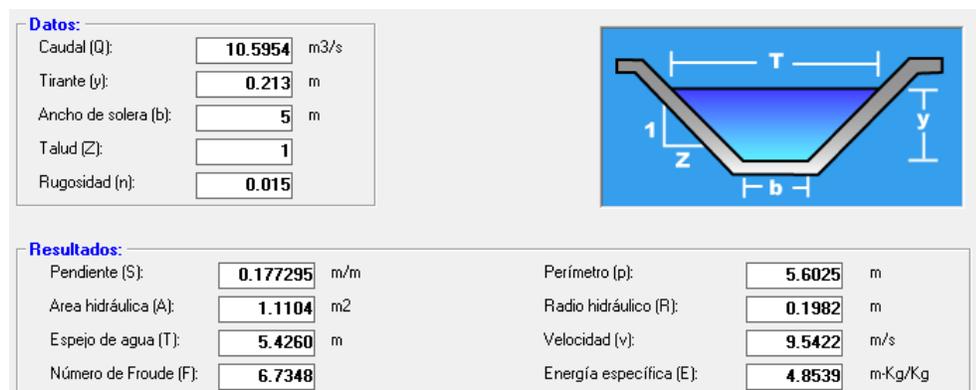
Demostrando de esta forma que el tramo intermedio es un flujo en estado uniforme con régimen supercrítico.

Ahora se procede a calcular la pendiente S del tramo intermedio utilizando Hcanales, se obtiene:

Datos:

$$Q = 10,5954 \text{ m}^3/\text{s}, y_n = 0,213 \text{ m}, b = 5 \text{ m}, Z = 1 \text{ y } n = 0,015$$

Figura 45. Datos ingresados en el programa Hcanales para obtener la pendiente del ejemplo 8



Fuente: elaboración propia.

La pendiente es de 0,1773 m/m.

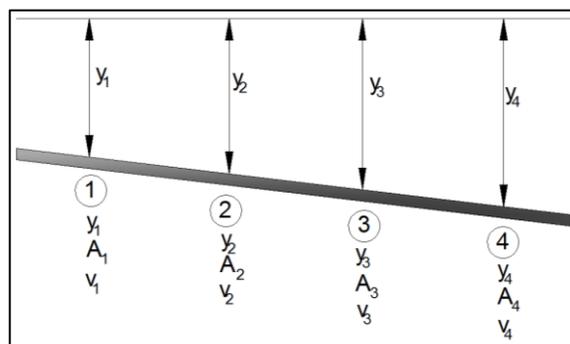
5. FLUJO GRADUALMENTE VARIADO

Esta caracterizado por presentar cambios graduales en el tirante de agua, la velocidad del flujo y el área hidráulica a lo largo del canal.

En el flujo gradualmente variado la pendiente de fondo puede ser distinta a la pendiente de la superficie del agua a y la pendiente de la energía específica; únicamente serán iguales cuando se presente el flujo uniforme.

Se observa este tipo de flujos en el tramo anterior a la descarga por compuertas, vertederos, represas y otras estructuras hidráulicas, que provocan un remanso, comúnmente se da por la geometría en la que es diseñada la sección transversal al igual que las variaciones del tirante en el fondo del canal. La figura 46 muestra una serie de secciones a lo largo del canal, cada una tiene un tirante, un área hidráulica y una velocidad diferente, sin embargo, el caudal será constante.

Figura 46. **Flujo gradualmente variado**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Consideraciones fundamentales:

Existen hipótesis que se adoptan al estudio del comportamiento del flujo gradualmente variado como las que se presentan a continuación:

- Las características con las que cuenta el flujo son constantes ya que el flujo es permanente.
- Se tiene una distribución de presión hidrostática lineal en cada sección del canal ya que las líneas de corriente que se presentan son paralelas.
- La pendiente de fondo es pequeña lo que provoca que el caudal fluya de forma uniforme.
- En cuanto a la velocidad que se presenta en las distintas secciones de un canal, estas son constantes, permitiendo que el coeficiente de Coriolis α sea constante en todas ellas.
- Los tramos del canal que se estudian y el tirante son independientes del coeficiente de rugosidad.
- El estudio del flujo gradualmente variado indica que la energía más importante es la de fricción.

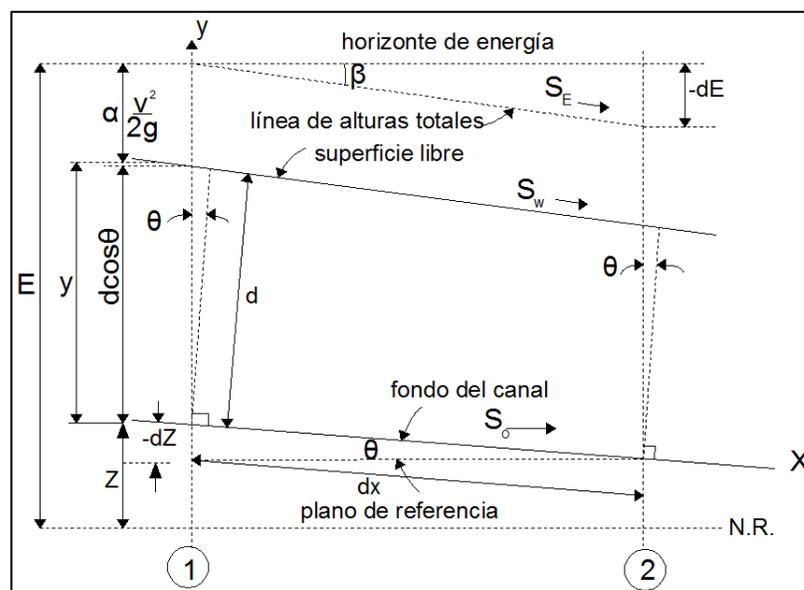
5.1. Ecuaciones de energía

A continuación, se muestra las ecuaciones de energía.

5.1.1. Ecuación dinámica del flujo gradualmente variado

Teniendo una longitud diferencial dx en un tramo de un canal con flujo gradualmente variado, se obtiene lo siguiente.

Figura 47. Tramo de longitud dx



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Donde:

E = energía total

dE = diferencial de energía

dx = longitud diferencial del tramo del canal

dZ = incremento en la altura

S_E = pendiente de energía

S_w = pendiente de la superficie libre

S_o = pendiente longitudinal del fondo del canal

θ = ángulo que es formado por el perfil longitudinal del fondo del canal con la horizontal

β = ángulo que forma el horizonte de energía con la línea de alturas totales.

d = tirante normal a la sección

y = tirante vertical

La energía sobre el plano de referencia de la sección 1 es:

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

α = es el coeficiente de Coriolis, es constante en el tramo que se estudia.

Diferenciando la ecuación se obtiene.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dZ}{dx} + \frac{dy}{dx} + \alpha \frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Interpretando cada uno de los diferenciales:

- $-\frac{dE}{dx} = S_E$ indica la pendiente de la línea de energía, como hay una disminución de energía, el diferencial es negativo.
- $-\frac{dZ}{dx} = \text{tg}\theta = \text{sen}\theta = S_o$ indica la pendiente de fondo y se toma en cuenta que θ es pequeño, considerando que Z decrece a medida que x crece se le coloca el signo negativo.

- $$\alpha \frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2g} \right) = \frac{\alpha}{g} v \frac{dv}{dy} = \frac{\alpha}{g} v \frac{dv}{dy} \frac{dy}{dx}$$

$$\frac{dv}{dy} = \frac{dv}{dy} \left(\frac{Q}{A} \right) = \frac{Q dA}{A^2 dy} = \frac{Q}{A^2} T = - \frac{v}{A/T}$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2g} \right) = \frac{v^2}{gA/T} \frac{dy}{dx}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_E}{1 - \frac{v^2 T}{gA}} \text{ o } \frac{dy}{dx} = S_o \frac{1 - \frac{S_E}{S_o}}{1 - \frac{v^2 T}{gA}}$$

Se reemplaza $v= Q/A$ y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_E}{1 - \frac{Q^2 T}{gA^3}} \text{ o } \frac{dy}{dx} = S_o \frac{1 - \frac{S_E}{S_o}}{1 - \frac{Q^2 T}{gA^3}}$$

Esta ecuación representa la dinámica del flujo gradualmente variado.

5.2. Perfiles de superficie

A continuación, se muestran los perfiles de superficie.

5.2.1. Curvas de remanso

Son los perfiles longitudinales formados en la superficie libre del líquido que fluye con quietud en un canal hidráulico, cóncavo aguas arriba.

5.2.1.1. Clasificación y nomenclatura de las curvas de remanso

Tipos de pendiente de fondo (S_o)

- Pendiente suave: cuando el tirante normal y_n es mayor que el crítico y_c , la curva que genera este tipo de pendiente se clasifica como curva “M” (MILD), este tipo de pendiente se encuentra en corrientes con movimientos tranquilos.
- Pendiente crítica: cuando el tirante normal y_n es igual que el crítico y_c , la curva que genera este tipo de pendiente se clasifica como curva “C” (CRITICAL). El valor de S_c se calcula con la ecuación:

$$S_c = \left(\frac{Q * n}{AR_H^{\frac{2}{3}}} \right)^2$$

- Pendiente fuerte: cuando el tirante normal y_n es menor que el crítico y_c , la curva que genera este tipo de pendiente se clasifica como curva “S” (STEEP).
- Pendiente horizontal: cuando no existe pendiente, es decir, $S_o=0$ como consecuencia y_n se hace infinito.
- Pendiente adversa: cuando no existe tirante normal y_n , y se tiene pendiente negativa, el líquido trabaja en contra de la gravedad, la curva que genera este tipo de pendiente se clasifica como “A” (ADVERSE).

5.2.1.2. Zonas de generación de las curvas de remanso

A continuación, se muestran as zonas de generación de las curvas de remanso.

5.2.1.2.1. Zona 1

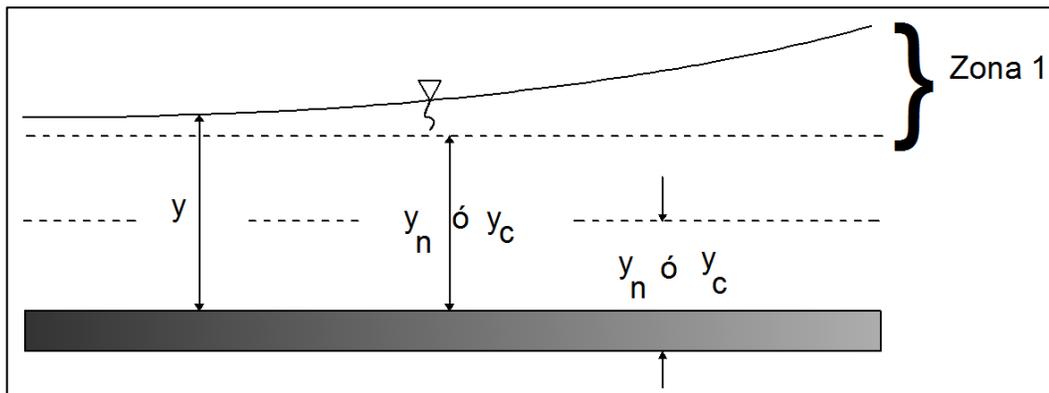
En esta zona el tirante real de la curva del remanso sobrepasa al valor del tirante normal y crítico, o de forma viceversa cumpliendo lo siguiente:

$$y > y_n, y > y_c$$

Donde:

$$y_c > y_n \text{ o } y_n > y_c$$

Figura 48. Curva de remanso en zona 1



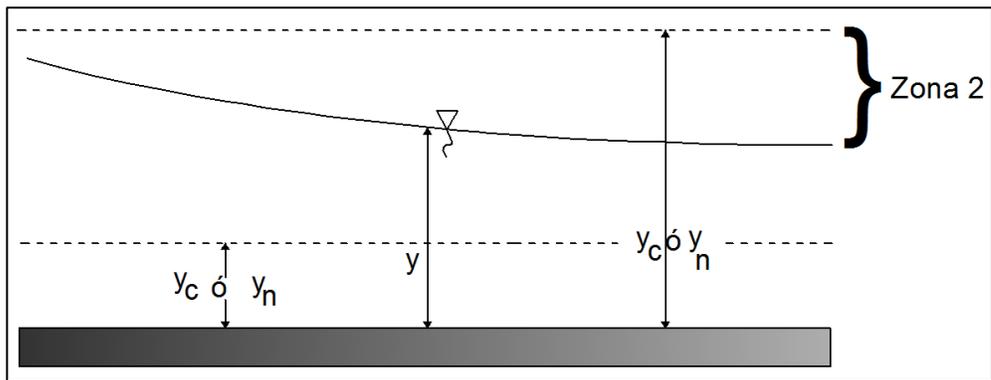
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

5.2.1.2.2. Zona 2

En esta zona el tirante normal se encuentra en medio del tirante normal y el crítico, cumpliendo lo siguiente:

$$y_c < y < y_n \text{ ó } y_n < y < y_c$$

Figura 49. Curva de remanso en zona 2

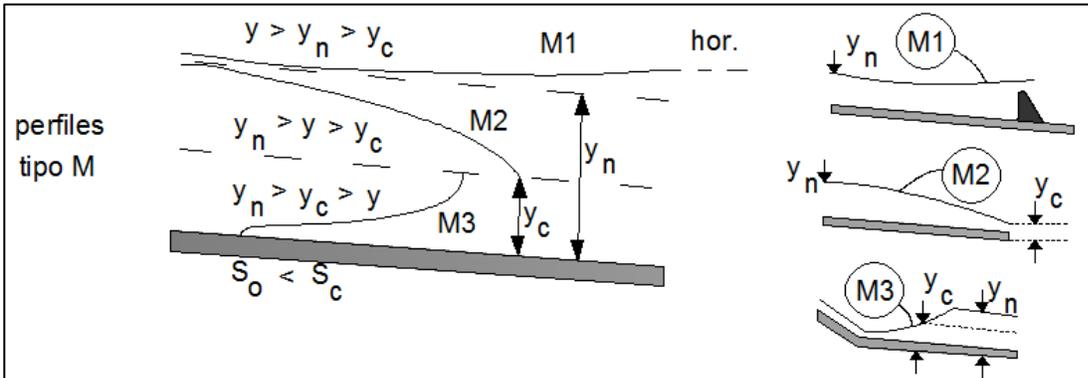


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

5.2.1.2.3. Zona 3

En esta zona el tirante real es menor que el normal y el crítico, y pueden tomar valores mayores uno más grande que el otro o viceversa.

Figura 51. **Perfiles tipo M**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

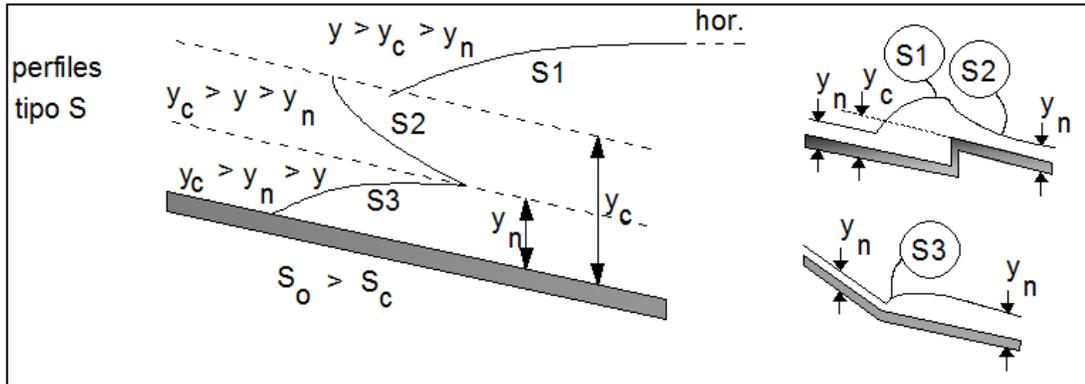
5.3.2. Perfil tipo S

El perfil S1 puede crearse en un resalto ahogado, ya que cuando se da el fenómeno del resalto hidráulico por la gran pendiente que tiene el canal, finaliza en la obstrucción. Este tipo de perfil se puede encontrar en la descarga de compuertas o presas.

El perfil S2 puede observarse en el inicio de una gran pendiente, tiene una longitud corta, y puede ir creciendo desde el tirante crítico aguas abajo, hasta encontrar una sección con tirante mayor.

Cuando la dirección del líquido sea aguas abajo se producirá un perfil S3, también puede producirse cuando haya un cambio de pendiente fuerte.

Figura 52. **Perfiles tipo S**

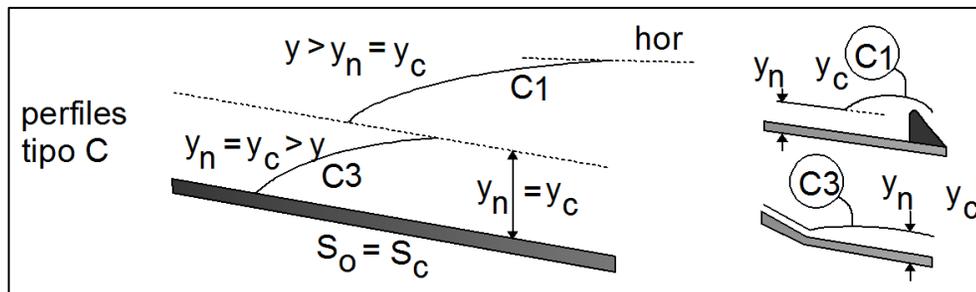


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

5.3.3. Perfil tipo C

En este perfil los tirantes normal y crítico son iguales, por lo que se consideran dos tipos, el flujo tiende a ser horizontal, pero el régimen crítico que existe, permite que se formen pequeñas ondulaciones en el tramo.

Figura 53. **Perfiles tipo C**

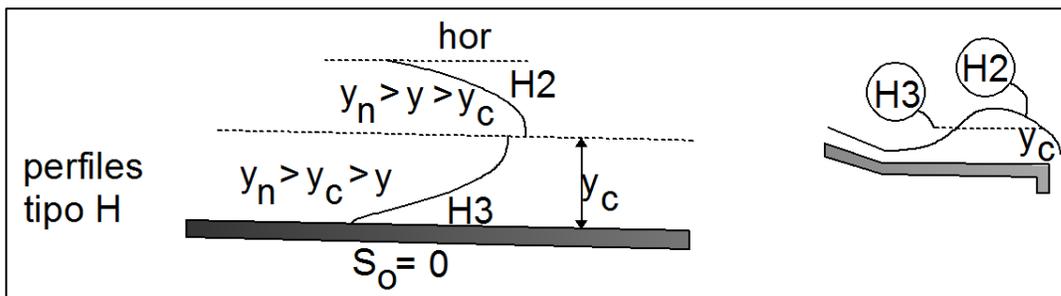


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

5.3.4. Perfil H

Cuando el fondo de un canal se vuelve horizontal y el tirante normal es infinito se forman solo los perfiles H2 y H3. El perfil H2 se genera cuando la pendiente de un canal pasa de subcrítico a horizontal. El perfil H3 se genera cuando la pendiente de un canal pasa de supercrítico a horizontal.

Figura 54. Perfiles tipo H

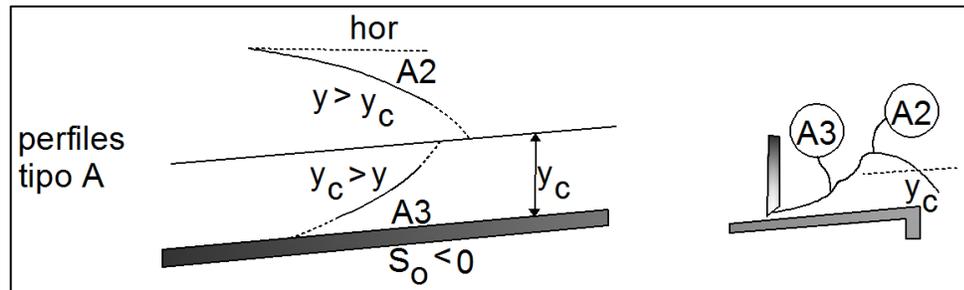


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

5.3.5. Perfil A

En un canal, a lo largo de su longitud, puede encontrarse con una pendiente negativa, lo que es poco común. Por lo que un perfil A1 no se puede presentar porque el valor que toma y_n no es real, entonces se encuentran los perfiles A2 y A3 que pasan a ser similares a los perfiles H2 y H3, respectivamente.

Figura 55. **Perfiles tipo A**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

5.4. Ejercicios de aplicación con hojas de cálculo

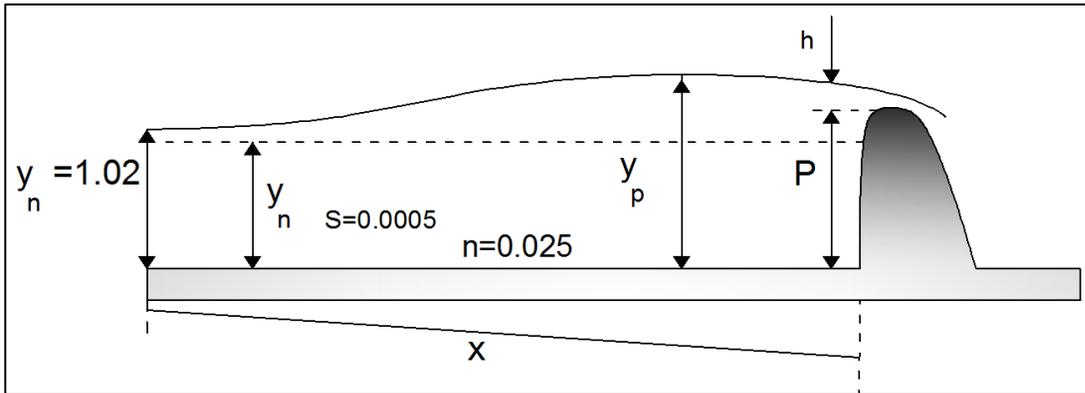
A continuación, se muestra un ejemplo de los ejercicios de aplicación con hojas de cálculo.

5.4.1. Ejemplo 9

Un canal de sección trapezoidal, de ancho de solera 2,5 m, talud 1,5, está excavado en tierra ($n=0,025$), con una pendiente uniforme de 0,0005 m/m conduce un caudal de 5 m³/s. Con el objetivo de dar carga sobre una serie de compuertas para tomas laterales, se desea utilizar un vertedero de forma rectangular de perfil Creager (coeficiente de descarga $C=2$), con una longitud de cresta $L=7$ m.

La ecuación del vertedero es $Q= C L h^{3/2}$ y la altura de la cresta al fondo es $P=1,8$ m. Calcular el perfil de flujo y la longitud total x del remanso, considerando que termina al alcanzar un tirante que sea 2 % mayor que el normal.

Figura 56. Perfil longitudinal del canal



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Datos:

$$Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P = 1,8 \text{ m}$$

$$n = 0,025$$

$$Z = 1,5$$

$$S_o = 0,0005 \text{ m/m}$$

$$C = 2$$

$$b = 2,5 \text{ m}$$

$$L = 7 \text{ m}$$

Se procede a encontrar la altura h , utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = C L h^{\frac{3}{2}}$$

$$h = \left[\frac{Q}{CL} \right]^{\frac{2}{3}}$$

$$h = \left[\frac{5 \text{ m}^3}{2 * 7 \text{ m}} \right]^{\frac{2}{3}}$$

$$h = 0,50 \text{ m}$$

Entonces:

$$y_0 = P + h$$

$$y_0 = 1,8m + 0,50m$$

$$y_0 = 2,30 m$$

Para obtener el valor del tirante normal se utilizará el método gráfico.

Se procede a calcular con la ecuación de Manning dejando la ecuación en función del área y el perímetro, se tiene:

$$Q = \frac{1}{n} AR_H^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{A^5}{p^2} = \left(\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} \right)^3$$

$$\frac{[(2,5 + 1,5y)y]^5}{(2,5 + 2\sqrt{1 + 1,5^2y})^2} = \left(\frac{5 * 0,025}{0,0005^{\frac{1}{2}}} \right)^3$$

$$174,70 = \frac{[(2,5 + 1,5y)y]^5}{(2,5 + 2\sqrt{1 + 1,5^2y})^2}$$

Se emplea una hoja de cálculo para realizar las iteraciones necesarias que satisfagan esta igualdad.

Tabla XII. **Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante normal del ejemplo 9**

y	$[(2,5 + 1,5y)y]^5$	$(2,5 + 2\sqrt{1 + 1,5^2y})^2$	$\frac{[(2,5 + 1,5y)y]^5}{(2,5 + 2\sqrt{1 + 1,5^2y})^2}$	$\left(\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}}\right)^3$
1,400	11077,18	56,97	194,44	174,70
1,350	8506,71	54,28	156,72	174,70
1,375	9716,90	55,62	174,71	174,70

Fuente: elaboración propia.

El resultado para el tirante normal es de $y_n=1,375$ m.

Se procederá a calcular el tirante crítico y_c utilizando la siguiente fórmula:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c}$$

$$\frac{5^2}{9,81} = \frac{((2,5 + 1,5 * y_c)y_c)^3}{2,5 + 2 * 1,5y_c}$$

$$\frac{5^2}{9,81} = \frac{((2,5 + 1,5 * y_c)y_c)^3}{2,5 + 2 * 1,5y_c}$$

Se emplea una hoja de cálculo para realizar las iteraciones para cumplir con la igualdad.

Tabla XIII. **Resultados obtenidos de la hoja de cálculo para el tirante crítico del ejemplo 9**

y_c	$((2,5 + 1,5 * y_c)y_c)^3$	$2,5 + 2 * 1,5y_c$	$\frac{((2,5 + 1,5 * y_c)y_c)^3}{2,5 + 2 * 1,5y_c}$	$\frac{Q^2}{g}$
0,900	41,60	5,20	8,0003	2,5484
0,800	25,93	4,90	5,2927	2,5484
0,700	15,35	4,60	3,3360	2,5484
0,650	11,52	4,45	2,5897	2,5484
0,647	11,32	4,44	2,5492	2,5484

Fuente: elaboración propia.

El resultado para el tirante crítico es de $y_c = 0,647$ m. A continuación, se procederá a identificar el tipo de perfil. Teniendo los siguientes datos se puede decir que:

$$y_n = 1,375 > y_c = 0,647 \text{ curva M}$$

$$y_0 = 2,30 > y_n = 1,375 > y_c = 0,647 \text{ zona 1}$$

Que se genera desde $y_0 = 2,30$ m hasta finalizar en un tirante superior a un 2 % del tirante normal.

Para el cálculo del perfil, se iniciará desde $y_0 = 2,30$ m hasta finalizar en el tirante superior agregándole un 2 % del tirante normal, es decir:

$$y = 1,02 * y_n$$

$$y = 1,02 * 1,375$$

$$y = 1,40 \text{ m}$$

Se construirá una hoja de cálculo como se muestra, iniciando con $y=2,30$ m, resultando los siguientes valores en las distintas columnas:

$$\text{Columna 2: } A = (b + Zy) * y = (2,50 + 1,50 * 2,30) * 2,30 = 13,685 \text{ m}^2$$

$$\text{Columna 3: } Pm = b + 2\sqrt{1 + Z^2}y = 2,50 + 2\sqrt{1 + 1,5^2} * 2,30 = 10,793m$$

$$\text{Columna 4: } R_H = \frac{A}{Pm} = \frac{13,685 \text{ m}^2}{10,793m} = 1,2680 \text{ m}$$

$$\text{Columna 5: } T = b + 2Zy = 2,50 + (2 * 1,50 * 2,30) = 9,40m$$

$$\text{Columna 6: } v = \frac{Q}{A} = \frac{5m^3/s}{13,685 \text{ m}^2} = 0,3654 \text{ m/s}$$

$$\text{Columna 7: } S_E = \left(\frac{n*v}{R_H^{2/3}} \right) = \left(\frac{0,025*0,3654 \text{ m/s}}{(1,2680 \text{ m})^{2/3}} \right)^2 = 6,079 * 10^{-5}$$

$$\text{Columna 8: } 1 - \left(\frac{Q^2 T}{gA^3} \right) = 1 - \left(\frac{(5m^3/s)^2 * 9,40m}{9,81 \frac{m}{s^2} * (13,685 \text{ m}^2)^3} \right) = 0,9907$$

$$\text{Columna 9: } S_0 - S_E = 0,0005 - 6,079 * 10^{-5} = 4,392 * 10^{-4}$$

$$\text{Columna 10: } f(y) = \frac{1 - \frac{Q^2 T}{gA^3}}{S_0 - S_E} = \frac{0,9907}{4,392 * 10^{-4}} = 2256$$

$$\text{Columna 11: } \Delta x = \text{área bajo la curva } (f(y)_1 - f(y)_{n+1})$$

$$\text{Columna 12: } x = \text{valores acumulados de } \Delta x$$

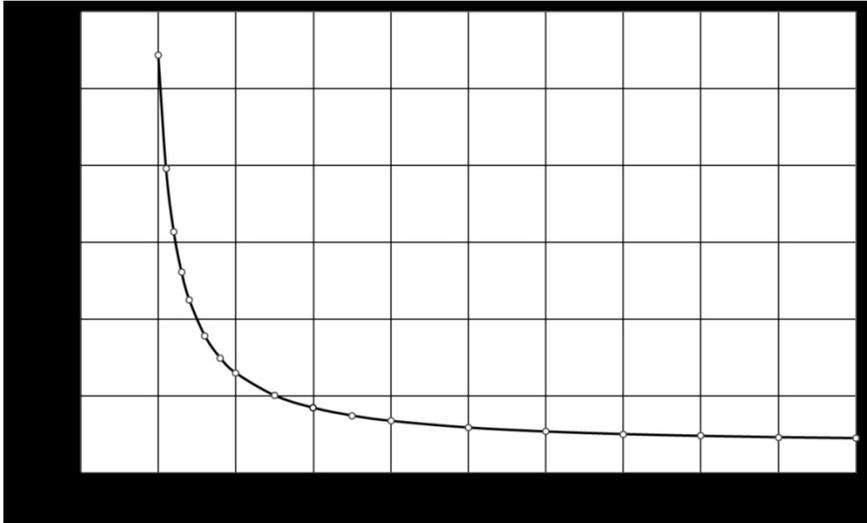
Tabla XIV. Resultados obtenidos de la hoja de cálculo del ejemplo 9

Y 1	Área 2	Pm 3	Rh 4	T 5	V 6	Se 7
2,30	13,685	10,793	1,2680	9,40	0,3654	6,0792E-05
2,20	12,760	10,432	1,2231	9,10	0,3918	7,3365E-05
2,10	11,865	10,072	1,1781	8,80	0,4214	8,9206E-05
2,00	11,000	9,711	1,1327	8,50	0,4545	1,0936E-04
1,90	10,165	9,351	1,0871	8,20	0,4919	1,3528E-04
1,80	9,360	8,990	1,0412	7,90	0,5342	1,6901E-04
1,70	8,585	8,629	0,9949	7,60	0,5824	2,1347E-04
1,65	8,209	8,449	0,9715	7,45	0,6091	2,4098E-04
1,60	7,840	8,269	0,9481	7,30	0,6378	2,7292E-04
1,55	7,479	8,089	0,9246	7,15	0,6686	3,1014E-04
1,50	7,125	7,908	0,9009	7,00	0,7018	3,5371E-04
1,48	6,986	7,836	0,8915	6,94	0,7158	3,7321E-04
1,46	6,847	7,764	0,8819	6,88	0,7302	3,9402E-04
1,44	6,710	7,692	0,8724	6,82	0,7451	4,1627E-04
1,43	6,642	7,656	0,8676	6,79	0,7527	4,2797E-04
1,42	6,575	7,620	0,8628	6,76	0,7605	4,4007E-04
1,41	6,507	7,584	0,8580	6,73	0,7684	4,5259E-04
1,40	6,440	7,548	0,8532	6,70	0,7764	4,6554E-04

$1-Q^2T/gA^3$ 8	So-Se 9	f(y) 10	$\Delta x = \text{Área}$ 11	X 12
9,9065E-01	4,392E-04	2 256		
9,8884E-01	4,266E-04	2 318	228,67	228,67
9,8657E-01	4,108E-04	2 402	235,97	464,63
9,8373E-01	3,906E-04	2 518	245,99	710,63
9,8010E-01	3,647E-04	2 687	260,28	970,91
9,7545E-01	3,310E-04	2 947	281,72	1 252,63
9,6939E-01	2,865E-04	3 383	316,51	1 569,14
9,6568E-01	2,590E-04	3 728	177,78	1 746,92
9,6139E-01	2,271E-04	4 234	199,05	1 945,97
9,5644E-01	1,899E-04	5 038	231,78	2 177,75
9,5068E-01	1,463E-04	6 499	288,41	2 466,15
9,4812E-01	1,268E-04	7 478	139,76	2 605,92
9,4539E-01	1,060E-04	8 921	163,98	2 769,90
9,4248E-01	8,373E-05	11 256	201,77	2 971,67
9,4096E-01	7,203E-05	13 063	121,60	3 093,27
9,3938E-01	5,993E-05	15 674	143,69	3 236,96
9,3775E-01	4,741E-05	19 778	177,26	3 414,22
9,3607E-01	3,446E-05	27 166	234,72	3 648,94

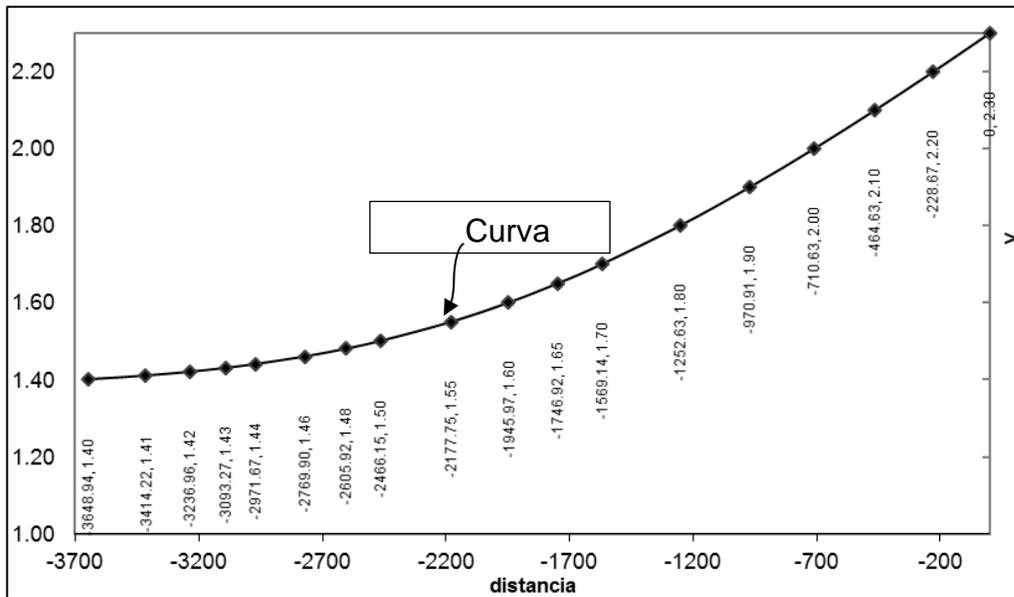
Fuete: elaboración propia.

Figura 57. Gráfica curva f(y)



Fuente: elaboración propia.

Figura 58. Perfil M1 calculado por el método de integración gráfica



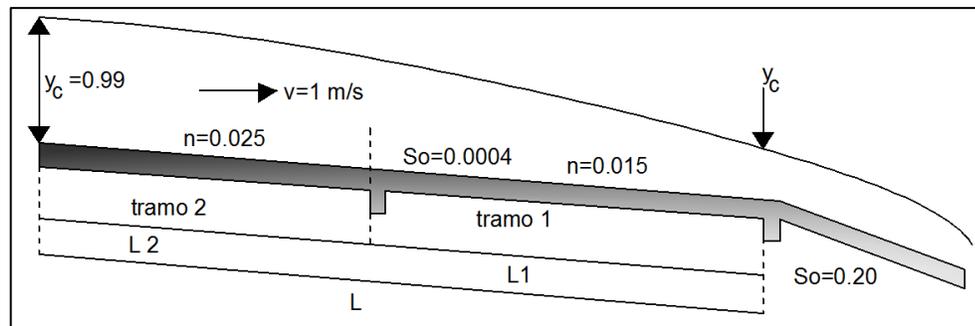
Fuente: elaboración propia.

5.4.2. Ejemplo 10

Un canal trapezoidal tiene un ancho de solera $b=1$ m, talud $Z=1$, con una pendiente de $0,0005$ m/m, conduce un caudal de 900 L/s en flujo uniforme, con un coeficiente de rugosidad $n=0,025$. A partir de cierta sección en adelante, como se muestra en la figura, es necesario aumentar la pendiente del canal a $0,20$ m/m.

Calcular la distancia L_1 que deberá revestirse de concreto $n=0,015$ suponiendo que el material en que se excava el canal resiste hasta una velocidad de 1 m/s.

Figura 59. Perfil de flujo



Fuente: elaboración propia.

Datos:

$$Q = 900 \text{ l/s} = 0,9 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$b = 1 \text{ m}$$

$$Z = 1$$

$$S_0 = 0,0005 \text{ m/m}$$

$$n = 0,015 \text{ (tramo 1, revestido)}$$

$$n = 0,025 \text{ (tramo 2, sin revestir)}$$

Primero se calcula el tirante crítico y_c con la siguiente fórmula:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A_c^3}{T_c}$$

$$\frac{0,90^2}{9,81} = \frac{[(1 + 1y_c) * y_c]^3}{1 + 2 * 1 * y_c}$$

Tabla XV. Datos obtenidos en la hoja de cálculo para y_c el ejemplo 10

y_c	$[(1 + 1y_c) * y_c]^3$	$1 + 2 * 1 * y_c$	$\frac{[(1 + 1y_c) * y_c]^3}{1 + 2 * 1 * y_c}$	$\frac{Q^2}{g}$
0,500	0,42	2,00	0,2109	0,0826
0,450	0,28	1,90	0,1462	0,0826
0,400	0,18	1,80	0,0976	0,0826
0,390	0,16	1,78	0,0895	0,0826
0,381	0,15	1,76	0,0827	0,0826

Fuente: elaboración propia.

Se obtiene $y_c=0,381$ m.

Calculando el tirante normal y_n con la fórmula de Manning se obtiene:

$$Q = \frac{1}{n} AR_H^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}} = AR_H^{\frac{2}{3}}$$

$$\frac{0,9 * 0,015}{0,0005^{\frac{1}{2}}} = \left[\frac{[(1 + 1y_n) * y_n]^{\frac{2}{3}}}{[1 + 2y_n\sqrt{1 + 1^2}]} \right] [(1 + 1y_n) * y_n]$$

Tabla XVI. Datos obtenidos de la hoja de cálculo para y_n para el ejemplo 10

y_n	$[(1 + 1y_n) * y_n]$	$1 + 2y_n\sqrt{1 + 1^2}$	$\frac{[(1 + 1y_n) * y_n]^{\frac{2}{3}}}{[1 + 2y_n\sqrt{1 + 1^2}] * [(1 + 1y_n) * y_n]}$	$\frac{Q * n}{S^{\frac{1}{2}}}$
0,400	0,56	2,13	0,2297	0,6037
0,500	0,75	2,41	0,3440	0,6037
0,600	0,96	2,70	0,4822	0,6037
0,676	1,13	2,91	0,6038	0,6037

Fuente: elaboración propia.

Se obtiene $y_n=0,676$

Ahora se calcula el tirante real de escurrimiento empleando la ecuación de continuidad.

$$Q = VA$$

$$0,9 \frac{m^3}{s} = 1 \frac{m}{s} * [(1 + 1y_{1m/s}) * y_{1m/s}]$$

$$y_{1m/s}^2 + y_{1m/s} - 0,9 = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene

$$y_1=0,572m$$

$$y_2=1,57 m$$

El valor que se toma es el menor de ambas soluciones, en este caso y_1 .

Se identifica el perfil, siendo:

$$y_n = 0,676 > y_1 = 0,381 \text{ curva M}$$

$$y_n = 0,676 > y = 0,572 > y_c = 0,381 \text{ Zona 2}$$

Respuesta: perfil M2

Tabla XVII. Resultados obtenidos de la hoja de cálculo del ejemplo 10

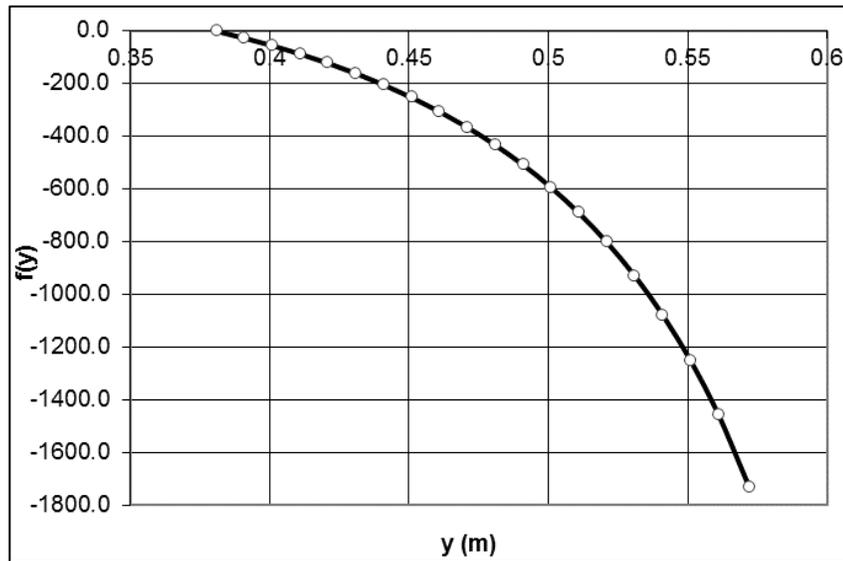
Y 1	Área 2	Pm 3	Rh 4	T 5	V 6	Se 7
0,381	0,5262	2,078	0,2533	1,76	1,71050	4,1086E-03
0,391	0,5439	2,106	0,2583	1,78	1,65477	3,7461E-03
0,401	0,5618	2,134	0,2632	1,80	1,60199	3,4227E-03
0,411	0,5799	2,162	0,2682	1,82	1,55194	3,1336E-03
0,421	0,5982	2,191	0,2731	1,84	1,50441	2,8744E-03
0,431	0,6168	2,219	0,2779	1,86	1,45924	2,6414E-03
0,441	0,6355	2,247	0,2828	1,88	1,41625	2,4315E-03
0,451	0,6544	2,276	0,2876	1,90	1,37530	2,2421E-03
0,461	0,6735	2,304	0,2923	1,92	1,33626	2,0707E-03
0,471	0,6928	2,332	0,2971	1,94	1,29900	1,9153E-03
0,481	0,7124	2,360	0,3018	1,96	1,26340	1,7742E-03
0,491	0,7321	2,389	0,3065	1,98	1,22937	1,6458E-03
0,501	0,7520	2,417	0,3111	2,00	1,19681	1,5287E-03
0,511	0,7721	2,445	0,3158	2,02	1,16562	1,4218E-03
0,521	0,7924	2,474	0,3204	2,04	1,13573	1,3240E-03
0,531	0,8130	2,502	0,3249	2,06	1,10706	1,2344E-03
0,541	0,8337	2,530	0,3295	2,08	1,07955	1,1522E-03
0,551	0,8546	2,558	0,3340	2,10	1,05312	1,0767E-03
0,561	0,8757	2,587	0,3385	2,12	1,02772	1,0072E-03
0,572	0,8992	2,618	0,3435	2,14	1,00091	9,3706E-04

Continuación de la tabla XVII.

1-Q²T/gA³ 8	So-Se 9	f(y) 10	Δx = Área 11	X 12
0,0012	-3,609E-03	-0,34		
0,0854	-3,246E-03	-26,3	0,133	0,13
0,1609	-2,923E-03	-55,0	0,407	0,54
0,2286	-2,634E-03	-86,8	0,709	1,25
0,2896	-2,374E-03	-122,0	1,044	2,29
0,3447	-2,141E-03	-161,0	1,415	3,71
0,3945	-1,932E-03	-204,2	1,826	5,53
0,4396	-1,742E-03	-252,3	2,283	7,82
0,4806	-1,571E-03	-306,0	2,792	10,61
0,5179	-1,415E-03	-365,9	3,359	13,97
0,5519	-1,274E-03	-433,1	3,995	17,96
0,5829	-1,146E-03	-508,7	4,709	22,67
0,6113	-1,029E-03	-594,2	5,515	28,19
0,6373	-9,218E-04	-691,4	6,428	34,62
0,6612	-8,240E-04	-802,4	7,469	42,08
0,6831	-7,344E-04	-930,2	8,663	50,75
0,7033	-6,522E-04	-1078,3	10,042	60,79
0,7219	-5,767E-04	-1251,8	11,651	72,44
0,7391	-5,072E-04	-1457,2	13,545	85,99
0,7565	-4,371E-04	-1730,9	17,534	103,52

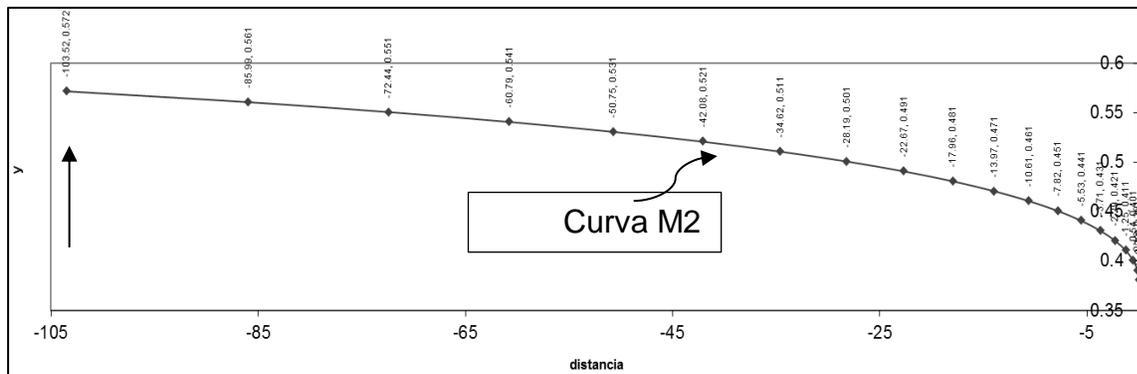
Fuente: elaboración propia.

Figura 60. **Gráfica de la curva f(y)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Perfil M2 calculado por el método de integración gráfica**



Fuente: elaboración propia.

Observando la gráfica, se obtiene la respuesta de la distancia L1 que es igual a 103,52 m. Ver apéndice 1.

6. MEDICIÓN DE FLUJO

El agua que fluye en un canal tiene diferentes usos, por ejemplo, para consumo humano, para la utilización en sistemas de riego y para generar energía eléctrica, entre otros, entonces, es necesario conocer el caudal que circula por los canales de conducción y distribución.

Conocer el caudal que circula en un canal permite realizar mantenimiento en los suministros, ya que se tiene cuantificado el volumen de agua suministrada, permite controlar las pérdidas durante la conducción, detectar anomalías y evitar desperdicios.

En la actualidad existen muchos métodos y dispositivos que permiten conocer el flujo que circula por un canal, estos pueden ser:

- Vertedero: es un dique o pared en el que se práctica una abertura de geometría conocida, rectangular, triangular, trapezoidal o circular; por ella se hace pasar el flujo de agua para registrar la altura que alcanza el espejo de agua sobre la cresta del vertedor, que luego de sustituirla en su ecuación de caudal, proporcionará el valor del caudal que circula por él. Este instrumento para medir el flujo fue uno de los primeros desarrollados, es un método exacto, es muy práctico y accesible en costo.
- Orificio: en hidráulica, los orificios son definidos como perforaciones, tienen una forma regular y con un perímetro cerrado. Para su funcionamiento se colocan por debajo de la superficie libre del agua, son utilizados en tanques, tuberías, depósitos o canales.

- Aforadores: son artefactos que permiten determinar la cantidad de agua que circula en un canal. Hay diversos tipos de aforadores que facilitan el cálculo y que permite tener datos con mayor exactitud.

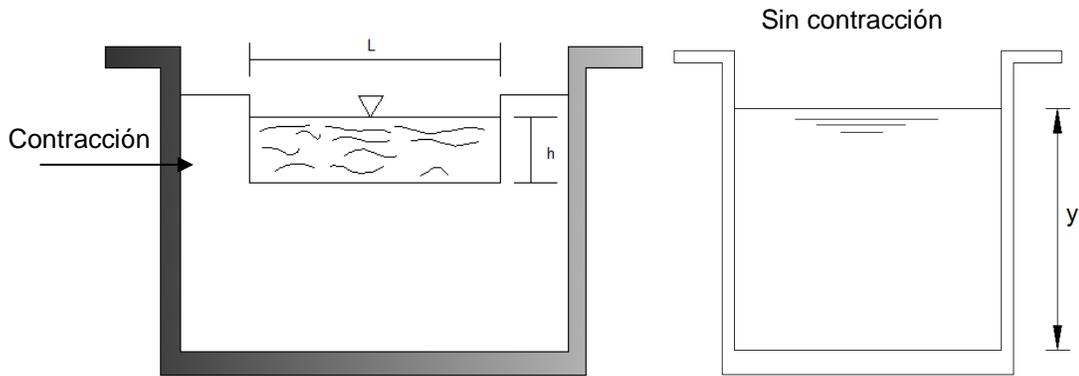
6.1. Vertederos de pared delgada

Se considera vertedero de pared delgada cuando la relación entre el ancho con dirección al flujo e y la altura del vertedero h sea menor a 0,67 ($e/h < 0,67$). El uso de los vertederos de pared delgada es limitado ya que son útiles en la medición de agua con velocidades pequeñas. Son diversas formas geométricas en las que se puede diseñar la cresta para estos vertederos tales como triangulares, rectangulares, trapezoidales y circulares, entre otros.

Los vertederos de pared delgada más comunes son de tipo rectangular y triangular, cuando las descargas son grandes se utiliza la rectangular y para caudales pequeños se prefiere el vertedero triangular.

Existen vertederos con contracción y sin contracción, los cuales se definen en la siguiente figura.

Figura 62. **Vertedero con contracción y sin contracción**

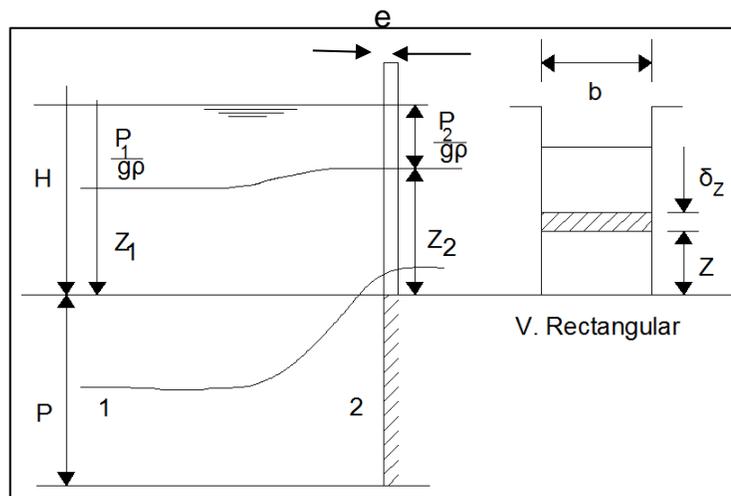


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

6.1.1. Ecuación para un vertedero rectangular de pared delgada

A continuación, se muestra el flujo de un vertedero de pared delgada.

Figura 63. **Flujo ideal sobre un vertedero de pared delgada**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Aplicando la fórmula de Bernoulli en el punto 1 y 2, en la misma línea de corriente se obtiene:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$H + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Es decir:

$$V_2 = \left[2g \left(H - Z_2 + \frac{V_1^2}{2g} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = b \int_0^H V_2$$

$$Q = b \int_0^H \left[2g \left(H - Z_2 + \frac{V_1^2}{2g} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} \left(h - Z_2 + \frac{V_1^2}{2g} \right)^{\frac{1}{2}} \Bigg|_0^H$$

$$Q_{ideal} = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}}$$

Se involucra un coeficiente C_d (coeficiente de descarga) con la ecuación de Rehbock, su función es involucrar los efectos de la viscosidad en el cálculo del caudal para un vertedero rectangular sin contracción, C_d viene dada por:

$$C_d = 0,602 + 0,083 \frac{H}{P}$$

Donde p es la altura de la cresta del vertedero medida desde el piso del canal y H es el tirante de flujo sobre el vertedero.

Entonces:

$$C = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g}$$

Finalmente, para calcular el caudal para un vertedero sin contracción se utiliza la ecuación:

$$Q = C * b * H^{\frac{3}{2}}$$

Para calcular el caudal de un vertedero con contracción se utiliza la ecuación:

$$Q = C * \left(b - \frac{2}{10} H \right) * H^{\frac{3}{2}}$$

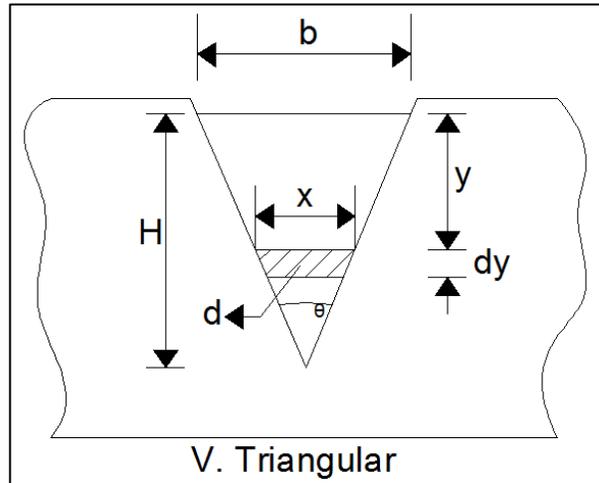
6.1.2. Ecuación para un vertedero triangular de pared delgada

De la ecuación de Bernoulli se sabe que:

$$V_2 = \sqrt{2gy}$$

Entonces el caudal se calculará de la siguiente forma:

Figura 64. **Vertedero triangular**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

$dQ = V_2 dA$, por semejanza de triángulos:

$$\frac{x}{b} = \frac{H-y}{H}, b = 2H \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}$$

$$Q = 2\sqrt{2gt} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \int_0^H (H-h)y^2 dy$$

Integrando se obtiene la ecuación,

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2gt} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} H^{\frac{5}{2}}$$

Tomando en cuenta la contracción lateral se obtiene el caudal así:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \theta \frac{\theta}{2} H^{\frac{5}{2}}$$

Cuando se tengan alturas de carga superior a 0,30 m el valor medio de C_d es 0,60 aproximadamente.

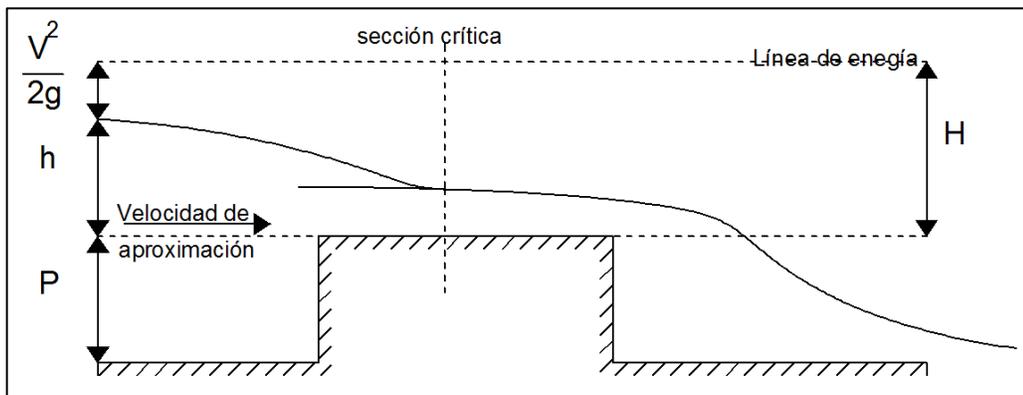
6.2. Vertederos de pared gruesa

Se considera vertedero de pared delgada cuando la relación entre el ancho con dirección al flujo e y la altura del vertedero h sea mayor a 0,67 ($e/h > 0,67$). Se utiliza para grandes caudales, no se dañan fácilmente y mayormente son usados en instalaciones hidráulicas mayores.

6.2.1. Ecuación para un vertedero de borde ancho (no ahogado)

A continuación, se muestra el flujo sobre vertederos de borde ancho.

Figura 65. Flujo crítico sobre vertederos de borde ancho



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Al ser q la descarga por unidad de ancho del canal se tiene:

$$q = Q/b$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad y \quad h_c = \frac{2}{3}H$$

Entonces,

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

Para calcular el caudal de la descarga total real se tiene la siguiente ecuación:

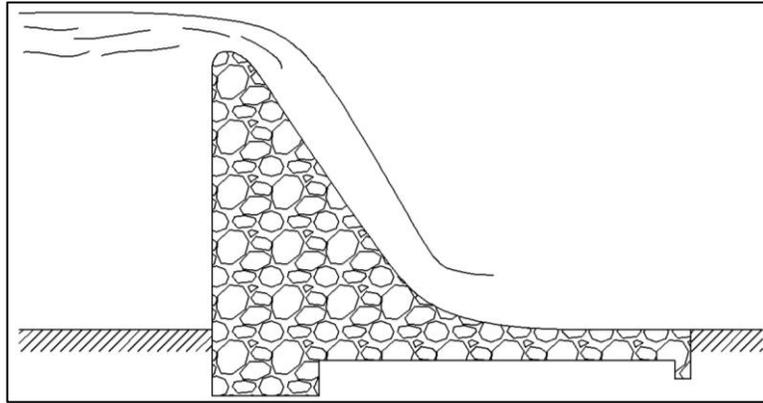
$$Q = C_d * \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} * b * \sqrt{g} * H^{3/2}$$

Donde C_d es el coeficiente de descarga y este depende de las dimensiones con las que se dimensiona el vertedero.

6.3. Vertederos de desbordamiento

Este tipo de vertederos tiene una pequeña rampa redondeada en la que el agua descarga en un vertedero de pared delgada, se puede decir que es una combinación, las funciones que tiene son la de dejar fluir el agua que exceda la capacidad de conducto.

Figura 66. **Vertedero de desbordamiento**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

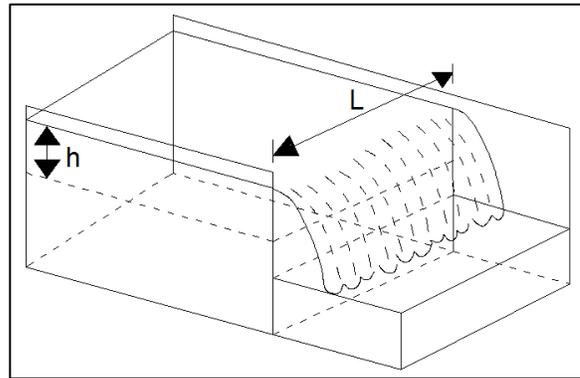
6.3.1. **Sección rectangular**

Para un vertedero de sección rectangular sin contracciones Francis recomienda una ecuación del caudal, esta es:

$$Q = 1,84Lh^{3/2}$$

La constante 1,84 ya incluye el coeficiente de descarga.

Figura 67. **Vertedero rectangular, de cresta aguda sin contracciones**

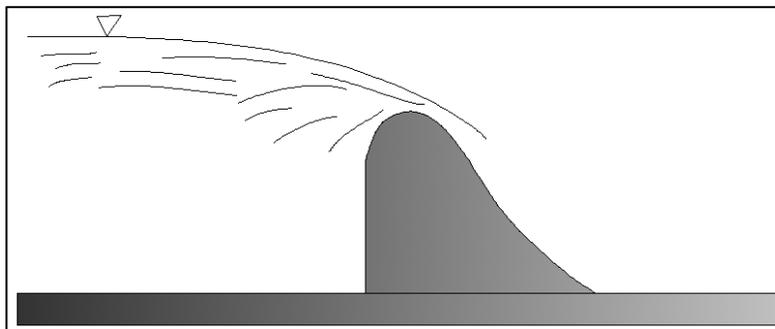


Fuente: elaboración propia empleando AutoCAD 2013.

Para un vertedero con el perfil de Creager la ecuación para determinar el caudal es:

$$Q = 2Lh^{3/2}$$

Figura 68. **Perfil de Creager**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Para un vertedero rectangular con cresta aguda la ecuación para determinar el caudal es:

$$Q = 1,84(L - 0,1nh)h^{3/2}$$

Donde:

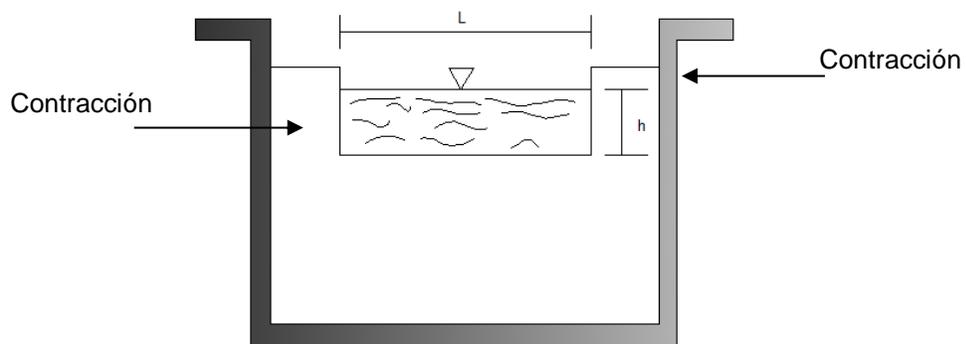
Q: caudal del vertedero, en m³/s

L: ancho de la cresta, en m

n: número de contracciones (1 o 2)

h: carga en el vertedero, en m

Figura 69. **Vertedero con doble contracción lateral**

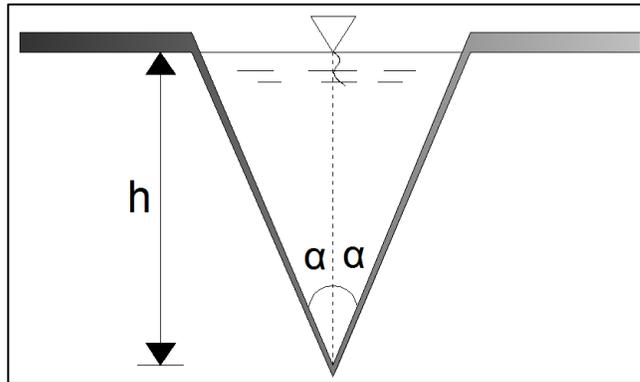


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

6.3.2. Sección triangular

A continuación, se muestra la sección triangular del vertedero triangular de cresta aguda.

Figura 70. **Vertedero triangular de cresta aguda**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Para una sección triangular con ángulos 2α , donde $\alpha=45^\circ$ se tiene $C_d=1,4$, la ecuación para determinar el caudal se representa así:

$$Q = 1,4h^{3/2}$$

Para otros valores de 2α , los valores de C_d se obtienen de la siguiente tabla.

Tabla XVIII. **Valores de C_d en función del ángulo 2α**

Ángulo α	15°	30°	45°	60°	90°	120°
Cd	0,206	0,392	0,596	0,819	1,4	2,465
Válido para h>	0,15	0,205	0,185	0,17	0,14	0,10

Fuente: VILLÓN BÉJAR, Máximo. *Hidráulica de canales*. p. 402.

Cuando en el canal fluyen caudales pequeños se aplica la ecuación de King, las cuales son:

$$Q = 1,34h^{2.47} \text{ si } 2\alpha = 90^\circ, \alpha = 45^\circ$$

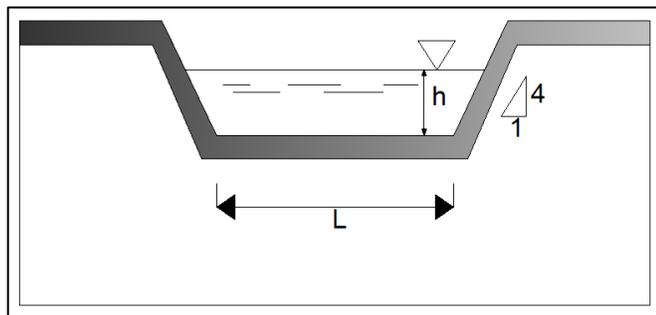
$$Q = 0,77h^{2.47} \text{ si } 2\alpha = 60^\circ, \alpha = 30^\circ$$

Siendo h carga sobre el vertedero en m, Q caudal en m^3/s .

6.3.3. Sección trapezoidal

El vertedero con sección trapezoidal más usado es el Cipolletti, ya que el talud será $Z=1/4$ (1 horizontal para 4 vertical). Este vertedero es una combinación de una forma rectangular y una triangular, el cual ofrece mayor capacidad de caudal.

Figura 71. Vertedero de Cipolletti



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

La ecuación que define esta sección para determinar el caudal es:

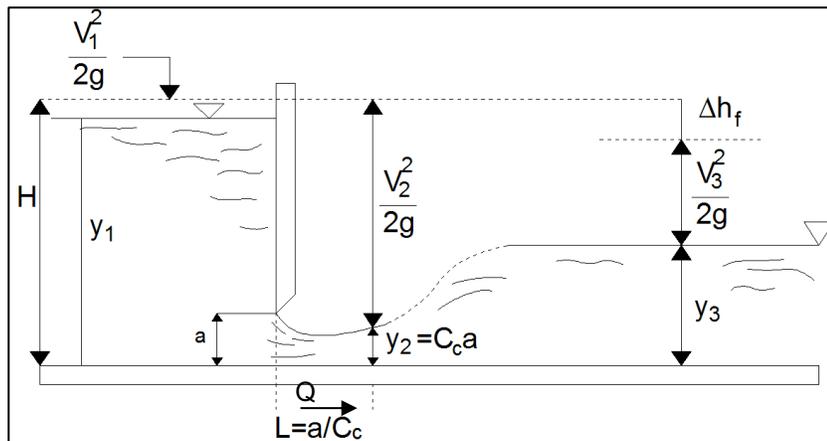
$$Q = 1,859Lh^{3/2}$$

Siendo L la longitud de cresta en metros, h la carga sobre el vertedero en m.

6.4. Compuertas de esclusas

Las compuertas de esclusas o de descarga por el fondo son muy utilizadas en obras hidráulicas cuando se quiere disminuir el tirante y aumentar la velocidad. Estas estructuras dejan pasar el flujo por debajo de ellas, para esto se emplea una placa como puerta curva, puerta plana o puerta móvil que se eleva para graduar el tirante y controlar el caudal.

Figura 72. Compuerta plana



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Los elementos de una compuerta plana son:

$H=y_1+V^2_1/2g$: carga total de la compuerta aguas arriba

$V^2_1/2g$: carga de velocidad

y_1 : tirante aguas arriba

$y_2: C_c * a$: tirante de la vena contraída

a : abertura de la compuerta

b : ancho de la compuerta

C_c : coeficiente de contracción

$L=a/C_c$: longitud desde la compuerta hasta y_2 (sección contraída)

y_3 : tirante normal (si las condiciones lo permiten), aguas abajo de la compuerta.

La ecuación para determinar el caudal usando una compuerta de forma rectangular es:

$$Q = C_d b a \sqrt{2gy_1}$$

Donde:

$$C_d = \frac{C_c * C_v}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}}$$

$$C_c = \frac{1}{2} \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2 + \sqrt{\left[\frac{1}{2} \frac{a}{y_1} \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{C_d}{C_v} \right)^2}$$

$$C_v = 0,960 + 0,979 \frac{a}{y_1}$$

También:

$$C_d = \frac{C_c * \left(0,960 + 0,979 \frac{a}{y_1}\right)}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}}$$

Siendo:

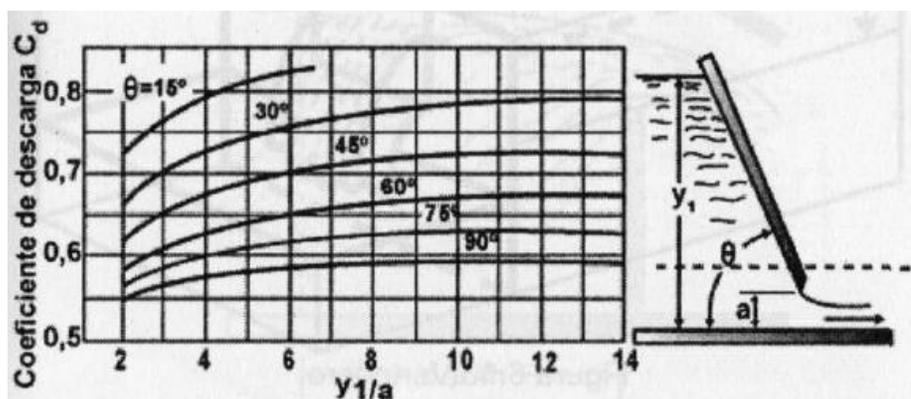
Cd: coeficiente de descarga

Cc: coeficiente de contracción

Cv: coeficiente de velocidad

Cuando la compuerta sea inclinada, Cd se calcula con el nomograma siguiente:

Figura 73. **Coeficiente de descarga para compuertas planas inclinadas con descarga libre**



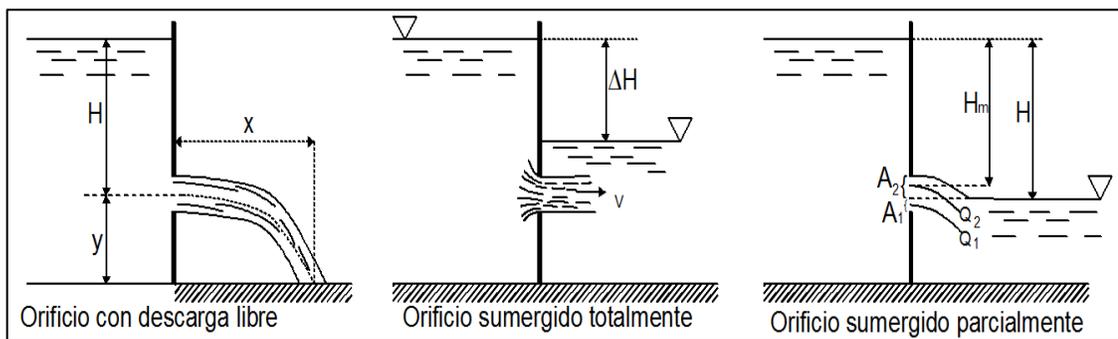
Fuente: VILLÓN BÉJAR, Máximo. *Hidráulica de canales*. p.397.

Para este tipo de compuertas se recomienda usar el valor de $C_c = 0,62$ tanto para descargas sumergidas o descarga libre.

6.5. Orificios

Los orificios son perforaciones que se emplea en la pared de un canal para que el agua circule a través de ellos, los orificios pueden trabajar sumergidos parcialmente o totalmente, con descarga libre o ahogada.

Figura 74. Orificios de acuerdo con la forma de descarga

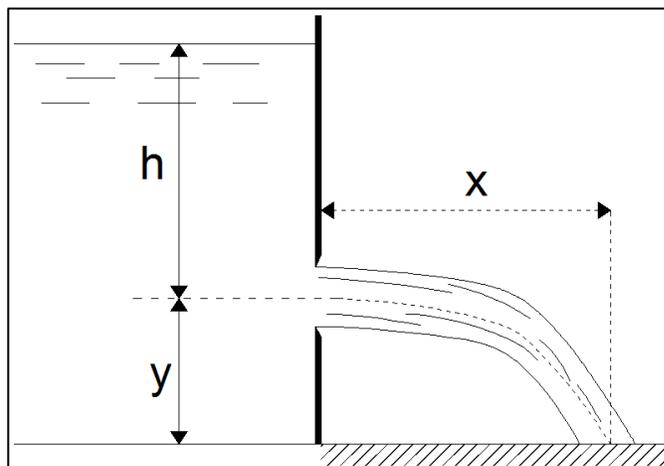


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

6.5.1. Orificio de pared delgada

En este tipo de orificios la vena líquida sufre una contracción por efecto del aumento de la velocidad al atravesar el orificio. Normalmente, el perímetro del orificio es biselado, con el propósito de disminuir el rozamiento con el agua y lograr mayor eficiencia hidráulica.

Figura 75. Orificio de pared delgada



Fuente: elaboración propia empleando AutoCAD 2013.

La ecuación empleada para calcular el caudal en un orificio de pared delgada es:

$$Q = C_d * A * \sqrt{2gh}$$

Donde:

$C_d = 0,60$ para orificio de pared delgada

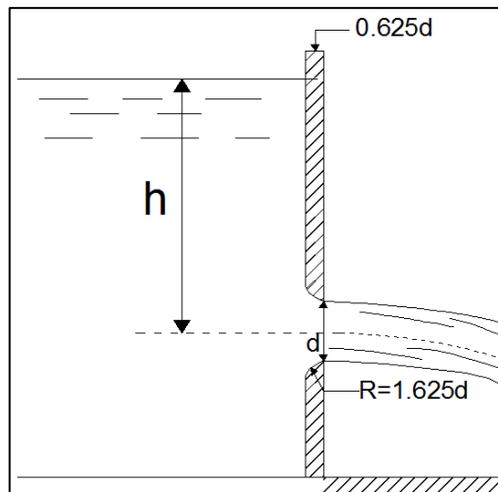
$A =$ área del orificio, m^2

$h =$ carga sobre el orificio (medida desde la superficie del agua hasta el centro del orificio)

6.5.2. Orificio de pared gruesa

Este tipo de pared en el contorno no contiene aristas afiladas, se le da una forma curva (abocinada) y permite que el agua al salir tenga más puntos de contacto, haciendo que genere un chorro de la misma dimensión del diámetro del orificio.

Figura 76. Orificio de pared gruesa abocinada



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

La ecuación empleada para calcular el caudal en un orificio de pared gruesa es:

$$Q = C_d * A * \sqrt{2gh}$$

Donde:

$C_d = 0,97$ para orificio de pared abocinada

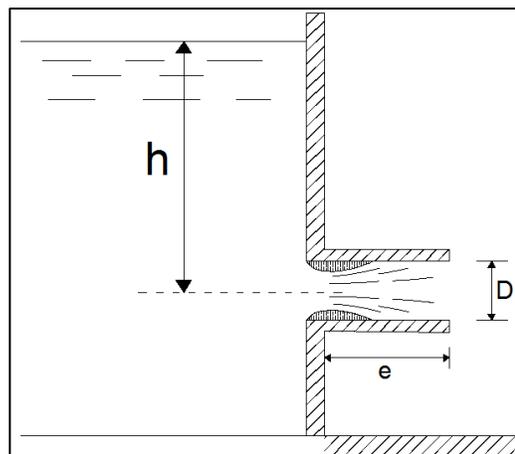
$A =$ área del orificio, m^2

$h =$ carga sobre el orificio, m (medida desde la superficie hasta el centro del orificio)

6.5.3. Orificio con salida de tubo

A este orificio se le provee de un tubo corto que le da un espacio al líquido para expandirse cuando ha pasado la zona de contracción, no permite que el líquido esté expuesto de manera inmediata a la superficie. La longitud del tubo (e) puede ser 2 o 3 veces el diámetro del orificio aproximadamente.

Figura 77. Orificio de tubo



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

La ecuación empleada para calcular el caudal en un orificio con salida de tubo es:

$$Q = C_d * A * \sqrt{2gh}$$

Donde:

$C_d = 0,82$ para orificio con salida de tubo

$A =$ área del orificio, m^2

$h =$ carga sobre el orificio, m (medida desde la superficie hasta el centro del orificio)

6.6. Canal Parshall

El canal Parshall o medidor Parshall fue desarrollado por Ralph L. Parshall (1881-1959), tras empezar sus estudios sobre las mediciones de flujo, siendo este una estructura hidráulica previamente calibrada que permite medir el caudal del agua que transita por un canal. Mide el flujo provocando un flujo crítico. Esta estructura también puede ser usada para medir el flujo en canales de irrigación, desagüe y salidas de alcantarilla, entre otras.

El canal Parshall está basado en el efecto de Venturi.

Para la fabricación del canal Parshall se emplean materiales de alta resistencia siendo estos: de acero inoxidable y polipropileno con una alta resistencia a las temperaturas. La estructura puede ser construida directamente en el canal, utilizando elemento de mampostería o con una fundición de concreto reforzado para su durabilidad.

Figura 78. **Canal Parshall metálico**



Fuente: www.construmatica.com. Consulta: 12 de octubre de 2018.

6.6.1. Partes que conforman el medidor Parshall

El medidor Parshall consta de cuatro partes principales.

- Transición de entrada
- Sección convergente
- Garganta
- Sección divergente

La transición de entrada requiere de una elevación entre el piso del canal y el fondo original, requiere de una pendiente suave de 1:4 (1 vertical y 4 horizontal), pasando la transición de entrada donde las paredes van reduciéndose de forma lineal o circular llegando así a la entrada de la sección convergente.

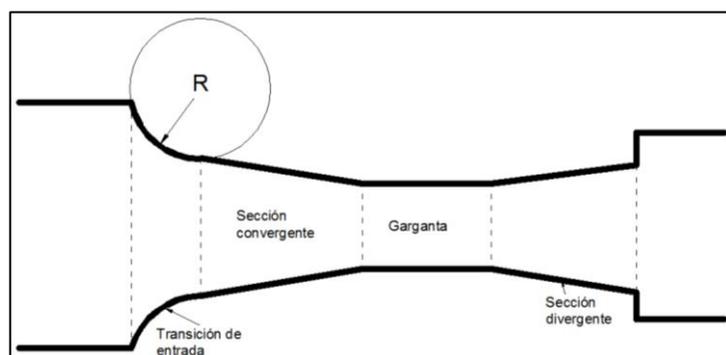
La sección convergente tiene la característica de que su fondo es completamente horizontal y su ancho va disminuyendo hasta situarse a la garganta.

La garganta tiene una pendiente descendente de 3:8 (3 vertical y 8 horizontal).

En la sección divergente la pendiente asciende teniendo una pendiente de 1:6 (1 vertical y 6 horizontal).

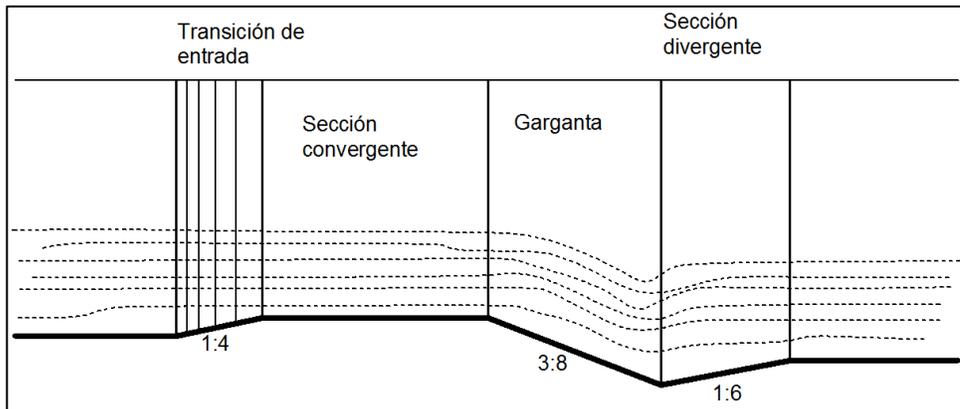
El medidor Parshall cuenta con una geometría rectangular desde el inicio de la transición de entrada hasta la salida.

Figura 79. **Partes del medidor Parshall (planta)**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Figura 80. Partes del medidor Parshall (perfil)



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

6.6.2. Dimensiones del medidor Parshall

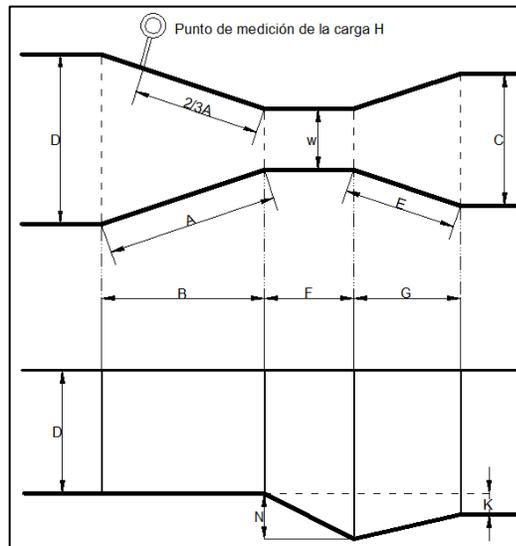
Las dimensiones que se disponen en los canales Parshall están en función a su ancho de garganta, la tabla muestra las dimensiones típicas utilizadas en la práctica.

Tabla XIX. Dimensiones típicas de canales Parshall en cm

W		A	B	C	D	E	F	G	K	N
Pulgadas	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
1"	2,5	36,3	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7
6"	15,2	62,1	61,0	39,4	40,3	45,7	30,5	61,0	7,6	11,4
9"	22,9	88,0	86,4	38,0	57,5	61,0	30,5	45,7	7,6	11,4
1'	30,5	137,2	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
1½'	45,7	144,9	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
2'	61,0	152,5	149,6	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
3'	91,5	167,7	164,5	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
4'	122,0	183,0	179,5	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
5'	152,5	198,3	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
6'	183,0	213,5	209,0	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
7'	213,5	228,8	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
8'	244,0	244,0	239,2	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
10'	305,0	274,5	427,0	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3

Fuente: De AZEVEDO, J. M.; ACOSTA, Guillermo. *Manual de hidráulica*. p. 472.

Figura 81. Dimensiones del medidor Parshall



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

6.6.3. Fórmulas para el cálculo del caudal en un medidor Parshall

La ecuación define el caudal a través de un canal Parshall, deducida como resultado de diversos experimentos, se expresa por medio de la siguiente fórmula:

$$Q = KH^n$$

Donde:

Q = caudal en m³/s,

H = carga en la garganta, en m.

K = coeficiente mostrado en la tabla XX

n = coeficiente mostrado en la tabla XX

Tabla XX. Valores de exponente “n” y coeficiente “K”

W		N	K	
pulgadas	(m)		S.I.	S. Ingles.
3"	0,076	1,547	0,176	0,992
6"	0,152	1,580	0,381	2,06
9"	0,229	1,530	0,535	3,07
1'	0,305	1,522	0,690	4,00
1½'	0,457	1,538	1,054	6,00
2'	0,610	1,550	1,426	8,00
3'	0,915	1,566	2,182	12,00
4'	1,220	1,578	2,935	16,00
5'	1,525	1,587	3,728	20,00
6'	1,830	1,595	4,515	24,00
7'	2,135	1,601	5,306	28,00
8'	2,440	1,606	6,101	32,00

Fuente: De AZEVEDO, J. M.; ACOSTA, Guillermo. *Manual de hidráulica*. p. 476.

La siguiente tabla muestra los caudales calculados para medidores Parshall construidos con las dimensiones más comunes.

Tabla XXI. Caudales en medidores Parshall en l/s

H (cm)	Ancho de garganta W (pulg)							
	3"	6"	9"	1'	1½'	2'	3'	4'
3	0,8	1,4	2,5	3,1	4,2	---	---	---
4	1,2	2,3	4,0	4,6	6,9	---	---	---
5	1,5	3,2	5,5	7,0	10,0	13,8	20	---
6	2,3	4,5	7,3	9,9	14,4	18,7	27	35
7	2,9	5,7	9,1	12,5	17,8	23,2	34	45
8	3,5	7,1	11,1	14,5	21,6	28,0	42	55
9	4,3	8,5	13,5	17,7	26,0	34,2	50	66
10	5,0	10,3	15,8	20,9	30,8	40,6	60	78
11	5,8	11,6	18,1	23,8	35,4	46,5	69	90
12	6,7	13,4	24,0	27,4	40,5	53,5	79	105
13	7,5	15,2	23,8	31,0	45,6	60,3	93	119
14	8,5	17,3	26,6	34,8	51,5	68,0	101	133
15	9,4	19,1	29,2	38,4	57,0	75,5	112	149
16	10,8	21,1	32,4	42,5	63,0	83,5	124	165
17	11,4	23,2	35,6	46,8	69,0	92,0	137	182
18	12,4	25,2	38,8	51,0	75,4	100,0	148	198
19	13,5	27,7	42,3	55,2	82,2	109,0	163	216
20	14,6	30,0	45,7	59,8	89,0	118,0	177	235
25	20,6	42,5	64,2	83,8	125,0	167,0	248	331
30	27,4	57,0	85,0	111,0	166,0	221,0	334	446
35	34,4	70,2	106,8	139,0	209,0	280,0	422	562
40	42,5	89,5	131,0	170,0	257,0	345,0	525	700
45	51,0	107,0	157,0	203,0	306,0	414,0	629	840
50	---	---	185,0	240,0	362,0	486,0	736	990
55	---	---	214,0	277,0	418,8	563,0	852	1 144
60	---	---	243,0	314,0	478,3	642,0	971	1 308
65	---	---	---	356,0	543,4	730,0	1 110	1 490
70	---	---	---	402,0	611,3	821,0	1 249	1 684

Fuente: De AZEVEDO, J. M.; ACOSTA, Guillermo. *Manual de hidráulica*. p. 476.

6.7. Ejercicios de aplicación con hojas de cálculo

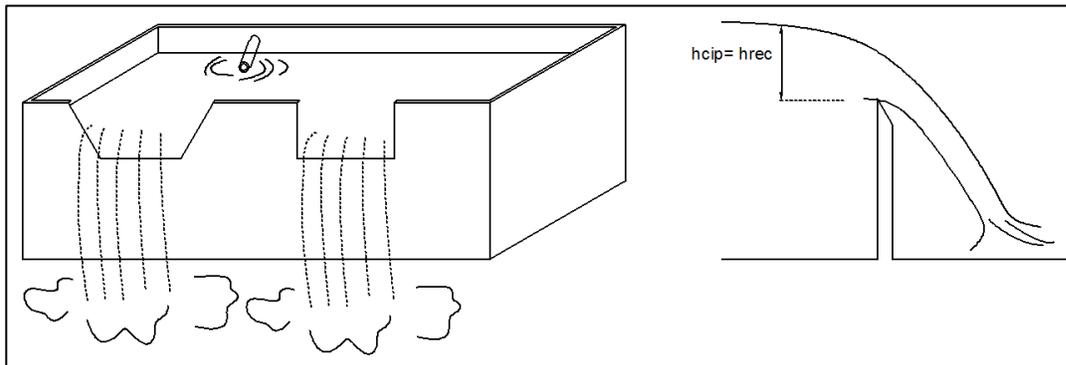
A continuación, se muestra un ejemplo de los ejercicios de aplicación de cálculo.

6.7.1. Ejemplo 11

En la caja distribuidora de caudales, ingresa un flujo de 450 l/s la cual tiene dos vertederos, uno tipo cipolleti con un ancho de cresta de $L=30$ cm y otro en forma rectangular con 2 contracciones y ancho de cresta de $L=40$ cm.

Si los dos vertederos están al mismo nivel, determinar la distribución de caudales.

Figura 82. Vertedero trapezoidal y rectangular



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Se procederá a calcular el caudal total, para esto se tiene que usar la ecuación tanto de un vertedero Cipolleti como la de un vertedero rectangular.

$$Q_{TOTAL} = Q_{Cipolleti} + Q_{rectangular}$$

$$Q_{Cipolleti} = 1,859 Lh^{3/2}$$

$$Q_{Cipolleti} = 1,859 (0,3)h^{3/2}$$

$$Q_{Cipolleti} = 0,5577h^{3/2}$$

$$Q_{rectangular} = 1,84(L - 0,1nh)h^{3/2}$$

$$Q_{rectangular} = 1,84(0,4 - 0,1 * 2 * h)h^{3/2}$$

$$Q_{rectangular} = 1,84(0,4 - 0,2h)h^{3/2}$$

Sustituyendo se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$Q_{TOTAL} = 0,5577h^{3/2} + 1,84(0,4 - 0,2h)h^{3/2}$$

Se procederá a utilizar una hoja de cálculo para resolver la ecuación por iteraciones.

Tabla XXII. **Resultado de las iteraciones en hoja de cálculo**

h (m)	Q Cipolleti (m ³ /s)	Q rectangular (m ³ /s)	Q total (m ³ /s)
1,000	0,558	0,368	0,926
0,500	0,197	0,195	0,392
0,600	0,259	0,239	0,499
0,550	0,227	0,218	0,445
0,555	0,231	0,220	0,450

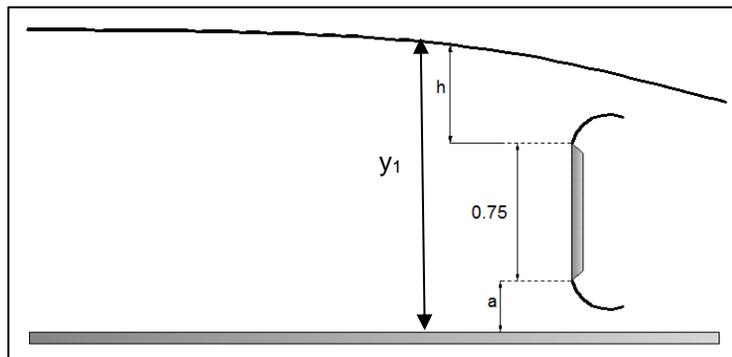
El flujo que ingresa a la caja distribuidora es de 450 l/s = 0,450 m³/s, al hacer la iteración e igualando la ecuación se tiene la distribución de caudales: Q Cipolleti es de 0,231 m³/s y el Q rectangular es de 0,220 m³/s para una carga común de 0,555 m.

6.7.2. Ejemplo 12

En un canal rectangular de 1,20 m, que conduce un caudal de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ se instala una placa de arista viva, como la mostrada en la figura 82, lo que da lugar a una compuerta y a un vertedero. Si la placa tiene $0,75 \text{ m}$ de alto, calcular la abertura a de la compuerta necesaria para que tanto la compuerta como el vertedero descarguen el mismo caudal.

Suponer que el coeficiente de descarga de la compuerta es $C_d = 0,60$.

Figura 83. **Compuerta y vertedero en un canal**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2013.

Datos:

$B = 2 \text{ m}$

$Q_v = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_c = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}$

$C_d = 0,60$

Primero se calculará la altura h del vertedero, por lo que se utilizará la ecuación de Francis.

$$Qv = 1,84Lh^{3/2}$$

Donde:

$$Qv = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L = b = 1,2 \text{ m}$$

Despejando h de la ecuación se obtiene:

$$h = \left(\frac{Qv}{1,84L} \right)^{3/2}$$

$$h = \left(\frac{0,30}{1,84 * 1,2} \right)^{3/2}$$

$$h = 0,2343 \text{ m}$$

El tirante aguas arriba de la compuerta es:

$$y_1 = a + 0,75 + h$$

$$y_1 = a + 0,75 + 0,2643$$

$$y_1 = a + 1,0143$$

Utilizando la ecuación de descarga en la compuerta, se tiene:

$$Qc = C_d ba\sqrt{2gy_1}$$

Ingresando los valores que proporcionó el problema a la ecuación se tiene:

$$0,30 = 0,60 * 1,20 * a * \sqrt{2 * 9,81(a + 1,0143)}$$

$$a\sqrt{a + 1,0143} = 0,094067$$

Utilizando una hoja de cálculo para hacer las iteraciones y obtener el valor de a, se obtiene:

Tabla XXIII. **Resultado de las iteraciones en hojas de cálculo del ejemplo 12**

a	$a\sqrt{a + 1,0143}$	igualdad
1	1,4193	0,0941
0,9	1,2452	0,0941
0,1	0,1056	0,0941
0,09	0,0946	0,0941
0,0895	0,0940	0,0941

Fuente: elaboración propia.

El resultado de las iteraciones da un valor de $a = 0,0895$ m.

CONCLUSIONES

1. En un canal hidráulico es muy importante la geometría, ya que al utilizar geometrías conocidas como el rectángulo, el trapecio, el triángulo y el círculo se evitan procesos matemáticos engorrosos al realizar los cálculos, ya que las ecuaciones se vuelven más simples de trabajar.
2. Las herramientas alternas para resolver aplicaciones en la hidráulica de canales, tales como las hojas de cálculo de Excel y el software HCANALES, facilitan el proceso de cálculo en el diseño de canales abiertos, ya que permite obtener resultados de una manera rápida y confiable.
3. La clasificación de los perfiles ayuda a determinar el comportamiento en cuanto a la velocidad y tirante, permitiendo realizar un análisis y diseño de la estructura hidráulica necesaria.
4. Cuando un flujo se acelera, como efecto de la estructura física por la que se conduce, provocará cambio en su velocidad, lo mismo sucederá con cambio en la pendiente de fondo, estos cambios formarán distintos tipos de flujo, así como en su régimen, ya sea subcrítico o supercrítico, cuyas características definirán el proceso matemático por seguir para cada aplicación. Resalta la importancia del análisis hidráulico y la aplicación correcta de las respectivas ecuaciones.
5. La sección hidráulicamente eficiente la tiene una geometría circular, ya que presenta un menor perímetro mojado en comparación con las demás

formas geométricas, por esa razón es muy utilizada en alcantarillados y tuberías.

6. El flujo con condiciones eficientes se obtendrá cuando se tenga la energía específica mínima y un caudal máximo.
7. Para realizar el aforo en canales abiertos existen muchas formas e instrumentos para realizarlos, entre ellos se destacan los vertederos, dada su facilidad de construcción y operación, tanto para caudales pequeños como para grandes.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar el presente trabajo de graduación como una guía para el estudiante del curso de Hidráulica de canales, ya que le facilitará su comprensión y entenderá la metodología en la aplicación de los principios hidráulicos; por lo que puede adoptar su uso en la resolución de los diferentes tipos de problemas que pueden encontrarse en el diseño de un canal abierto.
2. Al lector se le sugiere emplear las metodologías utilizadas en el trabajo de graduación, haciendo uso de las hojas de cálculo y del software HCANALES, ya que con ambas obtendrá resultados rápidos y confiables, permitiéndole analizar y comparar resultados al resolver problemas de hidráulica de canales.
3. Es conveniente que el lector analice la solución de los ejemplos planteados en este trabajo de graduación, así, cuando quiera aplicarlos a otros casos usando una hoja de cálculo o el software HCANALES, comprenderá de mejor manera los resultados obtenidos.
4. Es indispensable entender las ecuaciones que se utilizan en el diseño de un canal hidráulico, ya que no siempre se podrán aplicar las mismas ecuaciones a todos los problemas, por lo que es importante utilizar las correctas, de acuerdo con la geometría del canal y las características del flujo.

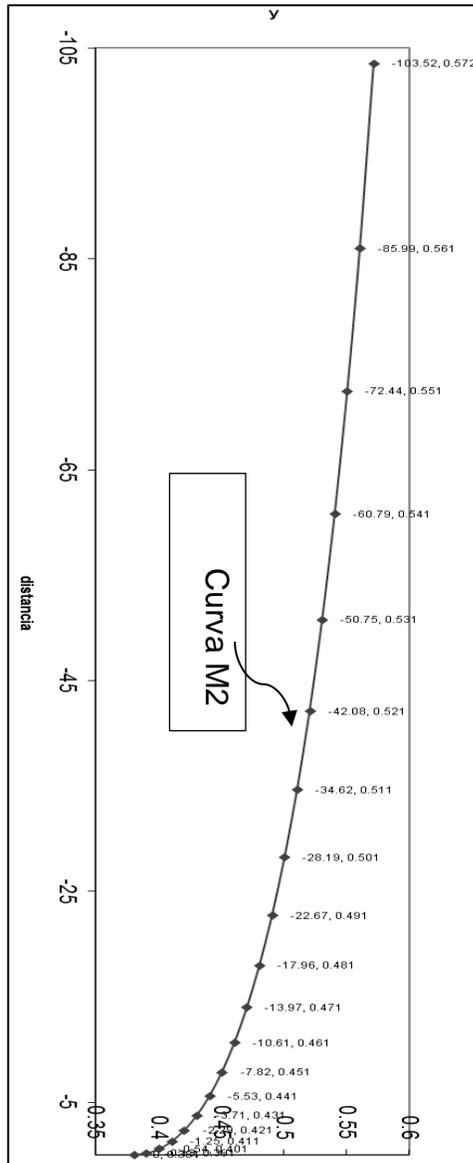
BIBLIOGRAFÍA

1. CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill, 1994. 667 p.
2. FRENCH, Richard H. *Hidráulica de canales abiertos*. México: McGraw-Hill, 1988. 724 p.
3. J.M. DE AZEVEDO, Netto y ACOSTA ÁLVAREZ, Guillermo. *Manual de hidráulica*. 6a ed. México: Harla, 1976. 578 p.
4. LUX MONROY, Manuel Agustín. *Medidores de flujo en canales abiertos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. 109 p.
5. MARÍN ENAMORADO, Estuardo René. *Construcción de un modelo hidráulico para la simulación de tipos de flujo en canales abiertos para el laboratorio de mecánica de fluidos e hidráulica de la Facultad de Ingeniería, USAC*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2017. 88 p.
6. REYES VENTURA, Miguel Antonio. *Guía teórica y práctica sobre hidráulica de canales*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1997. 138 p.

7. RODRÍGUEZ RUIZ, Pedro. *Hidráulica II*. México: Pedro Rodríguez Ruiz, 2008. 494 p.
8. SOTELO, Ávila, Gilberto. *Hidráulica de canales*. México: UNAM, Facultad de Ingeniería, 2002. 836 p.
9. _____. *Hidráulica de general*. México: Limusa, S.A., 1997. 561 p.
10. SPARROW ALAMO, Edgar Gustavo. *Hidráulica básica de canales*. Manual de Mecánica de Fluidos II, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa, 2008. 168 p.
11. VILLON, Máximo G. *HCANALES Manual del usuario*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2003. 92 p.
12. VILLON, Máximo G. *Hidráulica de canales*. 2a ed. Lima, Perú: Villón, 2007. 508 p.

APÉNDICE

Apéndice 1. Perfil M2 calculado por el método de integración gráfica



Fuente: elaboración propia.

