

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



DISEÑO DE UN CANAL CON FLUJO GRADUAL Y BRUSCAMENTE VARIADO

POR: ANGELA RAMÍREZ CIFUENTES

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Diseño de un canal con flujo gradual y bruscamente variado

POR: ANGELA RAMÍREZ CIFUENTES

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO DE

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobada por el comité de asesoría:

Aprobada por:



DR. Sergio Zeferino Garza Vara

ASESOR PRINCIPAL



Ing. Nazario Rosas Pizano

ASESOR EXTERNO



DR. Luis Samaniego Moreno

ASESOR

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Diseño de un canal con flujo gradual y bruscamente variado

POR: ANGELA RAMÍREZ CIFUENTES

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
TÍTULO DE

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

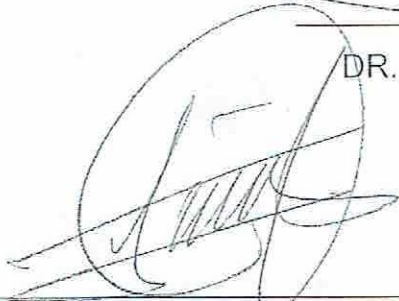
Aprobada por el jurado examinador:

Aprobada por:



DR. Sergio Zeferino Garza Vara

ASESOR PRINCIPAL



Ing. Nazario Rosas Pizano

ASESOR EXTERNO



DR. Luis Samaniego Moreno

ASESOR



M.C. Sergio Sánchez Martínez

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA



Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Junio 2024

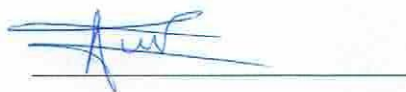
Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos si9n citar al autor original y/o fuentes, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Angela Ramírez Cifuentes

AGRADECIMIENTOS

A Dios por la vida, sus bendiciones y seguir cuidándome en cada paso para alcanzar mis metas.

Agradezco a mis padres por amarme de tal manera que me permiten ver la vida con amor y esperanza ante desigualdades sociales, por enfatizar cada día que están para mí sin cuestionar mis decisiones y buscando maneras para hacerme saber que me aman, por enseñarme tantas cosas sobre principios que rigen la conducta humana, por orientarme y todo el apoyo incondicional que sin duda me han permitido llegar hasta aquí con alegría y ganas de seguir descubriendo el mundo.

A mis hermanas Alexandra y Guadalupe, por su amor incondicional, complicidad en cada aventura, por creer en mí, apoyarme en cada decisión y estar ahí esperándome con cálidos abrazos para cada decisión que me traen consecuencias negativas.

A mi asesor, el doctor Sergio Garza Vara por su admirable calidez humana (lo que hizo más agradable desarrollar este proyecto), por compartir conmigo sus conocimientos, experiencias, cosmovisión y orientarme en este proyecto.

DEDICATORIA

A mis padres José Joel Ramírez y Ernestina Maribel Cifuentes por su amor y apoyo sin condiciones.

a mi hermana Alexandra por su amor, compañía, enseñanzas sobre temas sociales y todo el apoyo incondicional.

A mi hermana Guadalupe por enseñarme lo que es la dedicación, creatividad y responsabilidad, y por todo su amor y apoyo incondicional.

A mi abuelo Bernardo (Q.D.E.P) por todo el amor, cariño, apoyo y por creer en mi cuando apenas empezaba el kínder.

A quien fue mi profesor en el CECyTE platel # 17, al ingeniero Ramón Méndez Moreno, por su manera de dar clases donde era notoria su pasión por la enseñanza, y calidez humana lo que hizo crecer mis ganas de seguir estudiando y aprendiendo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	1
OBJETIVOS PARTICULARES	1
REVISIÓN DE LITERATURA	2
CAPÍTULO 1	2
GENERALIDADES	2
DEFINICIÓN DE FLUIDO	2
DEFINICIÓN DE CANAL	2
TIPOS DE CANALES	3
ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LOS CANALES	4
CAPITULO 2.	5
FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL MOVIMIENTO DEL FLUJO DENTRO DE UN CANAL	5
ENERGÍA DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS	5
ENERGÍA ESPECÍFICA.....	7
ESTADOS DE FLUJO.....	7
NÚMERO DE REYNOLDS	8
EFECTO DE LA GRAVEDAD.	9
ECUACIONES EMPÍRICAS DE FRICCIÓN	10
RUGOSIDAD SUPERFICIAL.....	10
DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES EN UNA SECCIÓN DE CANAL.	12
CLASIFICACIÓN DEL FLUJO	14
CAPÍTULO 3.	15
FLUJO VARIADO	15
DEFINICIÓN	15
EL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO.....	15
HIPÓTESIS PARA EL DESARROLLO DE LA TEORÍA DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO.....	16
CARACTERÍSTICAS DE LOS PERFILES DEL FLUJO.....	17
CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DE FLUJO.....	17
FLUJO BRUSCAMENTE VARIADO	18

SALTO HIDRÁULICO	18
LAS APLICACIONES PRÁCTICAS DEL RESALTO HIDRÁULICO	19
TIPOS DE RESALTO.....	20
LONGITUD DEL RESALTO.....	21
LOCALIZACIÓN DEL RESALTO.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
FLUJO UNIFORME	24
FLUJO GRADUALMENTE VARIADO CON UN PERFIL S1 Y CON PENDIENTE PRONUNCIADA.....	25
CLASIFICACIÓN DE LAS PENDIENTES Y ZONAS DE UN CANAL.....	26
ZONAS EN EL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO.....	26
CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO.....	27
DISEÑO DEL PROYECTO DEL CANAL RECTANGULAR PARA FLUJO VARIADO EN ESTADO PERMANENTE.....	33
PRIMERA PARTE DEL CANAL CON FLUJO SUPERCRÍTICO.....	35
FLUJO UNIFORME SUPERCRÍTICO.....	35
LONGITUD DEL RESALTO HIDRÁULICO	35
UBICACIÓN DE LA COMPUERTA.....	37
SEGUNDA PARTE DEL CANAL CON PENDIENTE SUAVE.....	38
LONGITUD DEL SALTO HIDRÁULICO	38
UBICACIÓN DE LA COMPUERTA.....	39
TERCERA PARTE DEL CANAL CON PENDIENTE SUAVE.....	39
TIRANTES DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO M3	39
LONGITUD DEL SALTO HIDRÁULICO CON LA SIGUIENTE FÓRMULA.....	40
TIRANTES DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO M2	40
VOLUMEN DE OBRA.....	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
PRIMERA PARTE DEL CANAL CON FLUJO SUPERCRÍTICO.....	43
SEGUNDA ETAPA DEL CANAL CON PENDIENTE SUAVE	44
TERCERA ETAPA DEL CANAL CON PENDIENTE SUAVE.....	46
CONCLUSIONES.....	49
LITERATURA CITADA.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE UN CANAL.....	5
TABLA 2: ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE FRICCIÓN C DE CHEZY. SOTELO (2002).....	11
TABLA 3: COEFICIENTES DE RUGOSIDAD. SOTELO (2002).....	12
TABLA 4: VALORES DE COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD. SOTELO (2002)	13
TABLA 5: CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE FLUJO. RODRÍGUEZ (2008)	14
TABLA 6: DE DATOS PARA EL DISEÑO DEL CANAL RECTANGULAR CON FLUJO GRADUAL Y BRUSCAMENTE VARIADO.....	33
TABLA 7: ESPECIFICACIONES PARA EL VOLUMEN DE OBRA.	41
TABLA 8: CANTIDAD DE MATERIALES PARA CALCULAR EL VOLUMEN DE OBRA DE ALTA RESISTENCIA (TIPO D).	42
TABLA 9: CANTIDAD DE MATERIALES CALCULADOS PARA LA OBRA CON ALTA RESISTENCIA (TIPO D). ELABORACIÓN PROPIA.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

ILUSTRACIÓN: 1 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS MÁS IMPORTANTES, VILLÓN (2008).....	4
ILUSTRACIÓN 2: ENERGÍA DE UN FLUJO GRADUALMENTE VARIADO EN UN CANAL ABIERTO (ADAPTADO DE VEN TE CHOW 1954 POR ANDRADE 2013).....	6
ILUSTRACIÓN 3: FLUJO VARIADO. RODRÍGUEZ (2008)	15
ILUSTRACIÓN 4: JARDÍN HIDRÁULICO EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO. GOOGLE EARTH.....	23
ILUSTRACIÓN 5: FLUJO UNIFORME. CHANSON, 2002).....	24
ILUSTRACIÓN 6: CLASIFICACIÓN DEL PERFIL M1 DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO EN PENDIENTE SUAVE. CHOW (1994).....	27
ILUSTRACIÓN 7: CLASIFICACIÓN DEL PERFIL S1 DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO EN UNA PENDIENTE PRONUNCIADA. CHOW (1994).....	27
ILUSTRACIÓN 8: TIRANTES Y LONGITUD TOTAL DEL PERFIL DEL FLUJO S1.	44
ILUSTRACIÓN 9: TIRANTES Y LONGITUD TOTAL DEL PERFIL DEL FLUJO M1.	46
ILUSTRACIÓN 10: TIRANTES Y LONGITUD TOTAL DEL PERFIL DEL FLUJO M3.	47
ILUSTRACIÓN 11: TIRANTES Y LONGITUD TOTAL DEL PERFIL DEL FLUJO M2.	48
ILUSTRACIÓN 12: DIFERENCIAL DE LONGITUD DEL EN UN CANAL. CHOW (1994).....	53
ILUSTRACIÓN 13: ÁREA SOMBREADA DE LA SUPERFICIE QUE CUANTIFICA LA INTEGRAL. CHOW, 1959	57
ILUSTRACIÓN 14: SE TIENE UN PERFIL DE FLUJO GRADUALMENTE VARIADO, DONDE LA DISTANCIA X, INICIA EN EL CRUCE DE LOS EJES CHOW, 1959.	57

ILUSTRACIÓN 15: EL ÁREA SOMBREADA ES IGUAL A ΔA . CHOW, 1959	58
ILUSTRACIÓN 16: CURVAS QUE RELACIONA $f(y)$ VS y PARA DIFERENTES PERFILES M Y S. SOTELO (1986)	61
ILUSTRACIÓN 17: DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE LOS TIRANTES DEL FLUJO GRADUALMENTE VARIADO, AL EMPLEAR LA SOLUCIÓN DE LA INTEGRACIÓN NUMÉRICA CON LA REGLA DEL TRAPECIO, PARA CUALQUIER PERFIL DEL FLUJO. CHOW (1994).....	62
ILUSTRACIÓN 18: LOCALIZACIÓN DEL SALTO HIDRÁULICO, EN EL CASO A. CHOW (1959)	74
ILUSTRACIÓN 19: LOCALIZACIÓN DEL SALTO HIDRÁULICO, EN EL CASO B. CHOW (1959)	75
ILUSTRACIÓN 20: LOCALIZACIÓN DEL SALTO HIDRÁULICO, EN EL CASO C. CHOW (1959)	76

APÉNDICES

APÉNDICE A.....	53
Ecuación diferencial dinámica del flujo gradualmente variado.....	53
APÉNDICE B.....	56
Integración de la ecuación diferencial dinámica del flujo gradualmente variado.	56
APÉNDICE C	63
Codificación del programa de Microsoft Visual Basic 6.0, para el cálculo de tirantes del flujo gradualmente variado.	63
APÉNDICE D	69
Resalto hidráulico en canales rectangulares con pendiente	69
APÉNDICE E.....	73
Localización del salto hidráulico	73

INTRODUCCIÓN

En 1989 en el periodo del ingeniero MS. Reginaldo de Luna Villarreal como rector de la universidad Autónoma Agraria Antonio Narro se empezó la construcción del "jardín hidráulico" que consta de tres etapas, para que los alumnos que estudian la carrera de Ingeniero Agrónomo en Irrigación pudieran tener prácticas de las materias de Hidráulica I, Hidráulica II, equipos y sistemas de abastecimiento de agua y de canales y obras hidráulicas.

La primera etapa fue la construcción de un conducto en serie y paralelo con tuberías de diámetros de 4,6,8,10 y 12 pulgadas, este sistema es alimentado por dos bombas centrifugas tipo voluta de 30 HP marca Berkeley para alimentar una pila de carga constante. La segunda etapa consta de un vertedor de demasías con un vertedor triangular de 90 grados y un canal de flujo uniforme que posteriormente desemboca en un medidor Parshall y la última etapa es la construcción de un canal con flujo gradual y abruptamente variado.

Las dos primeras etapas se construyeron en el año de 1989 y la última etapa aún no se construye.

El objetivo de este trabajo es el diseño de un canal con pendientes variables para obtener diferentes flujos gradualmente variados y abruptamente variados conocidos como resaltes hidráulicos para ello se tendrá que utilizar la teoría hidráulica del flujo en canales en flujo permanente.

OBJETIVO GENERAL.

Diseñar un canal rectangular por el que fluye una corriente gradual y bruscamente variada para completar toda la estructura física del jardín hidráulico.

OBJETIVOS PARTICULARES

Determinar la sección del canal.

Determinar las dimensiones del canal.

Determinar el volumen de obra.

Determinar los tirantes que va a tener el flujo de todo el canal de los flujos gradual y bruscamente variados.

Los alumnos puedan tener prácticas relacionadas con la teoría hidráulica de flujo de canales.

REVISIÓN DE LITERATURA

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

Definición de fluido

Los líquidos y gases (sustancias de baja cohesión) toman la forma de los recipientes que los contienen y se les conocen comúnmente como fluidos. Los fluidos pueden tener una superficie a la intemperie, es decir en contacto con la presión atmosférica o estar confinados en un espacio cerrado ejerciendo una presión en el recipiente que lo contiene, que pueden ser canales o tuberías. los fluidos líquidos se comportan de diferentes maneras dependiente del conducto. Las fuerzas de gravedad, resistencia, presión y viscosidad están presentes dentro del flujo en las tuberías y canales, debido a que el líquido en un canal está en contacto con la atmosfera, se le adiciona la tensión superficial y a las fuerzas que provoca el fluido debido a sedimentos arrastrados sobre el piso del canal. (Sotelo-Ávila citado por Hermes, 2017).

Definición de canal

French (2020), expresa que el conducto en el cual una de las zonas del flujo está expuesta a la atmosfera, se le conoce como canal abierto. la superficie libre es básicamente la interface entre un líquido y el aire, estos son fluidos con diferente densidad siendo el aire de densidad más baja. un flujo en movimiento en canales es causado por efectos de la gravedad y la distribución de presiones dentro del fluido es generalmente hidrostática.

(Sotelo 2002), ratifica que:

El flujo en un canal se produce principalmente por la acción de la fuerza de gravedad y se caracteriza porque expone una superficie libre a la presión atmosférica, siendo el fluido siempre un líquido por lo general agua.

El movimiento de un líquido a superficie libre se ve afectado por las mismas fuerzas que intervienen en el flujo dentro de un tubo, a saber, que:

La fuerza de gravedad, como la más importante en el movimiento.

La fuerza de resistencia ocasionada en las fronteras rígidas por la fricción y la naturaleza casi siempre turbulenta del flujo.

La fuerza producida por la presión que se ejerce sobre las fronteras del canal, particularmente en las zonas donde cambia su geometría.

La fuerza debida a la viscosidad del líquido, de poca importancia si el flujo es turbulento.

A estas se agregan, excepcionalmente, las siguientes:

La fuerza de tensión superficial, consecuencia directa de la superficie libre.

Las fuerzas ocasionales debidas al movimiento del sedimento arrastrado.

La superficie libre se considera como la intercara entre dos fluidos. El superior, que es aire estacionario o en movimiento, y el inferior, que usualmente es agua en movimiento. Las fuerzas de gravedad y de tensión superficial resisten cualquier fuerza tendiente a distorsionar la intercara, la cual constituye una frontera sobre la que se tiene un control parcial. (p. 91)

Tipos de canales

(Chow, 2004; Marín, 2012 citado por Castellanos, Hermes E. et al 2017), expresan que:

Un canal puede ser natural o artificial. Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyos en zonas montañosas, hasta quebradas, ríos grandes y pequeños ciénagas y los mares. Los canales artificiales son aquellos construidos o desarrollados por los seres humanos un ejemplo de ellos es: canales de vegetación, canales de centrales hidroeléctricas, canales y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos, canales de desborde, canales de madera, así como canales de modelos construidos en el laboratorio con propósitos experimentales.

Elementos geométricos de los canales

Citando a Villón (2008), los canales naturales normalmente son de sección transversal irregular cambiado de un lugar a otro, dado que los canales artificiales son desarrollados por los seres humanos se pueden diseñar formas geométricas regulares (prismáticos)

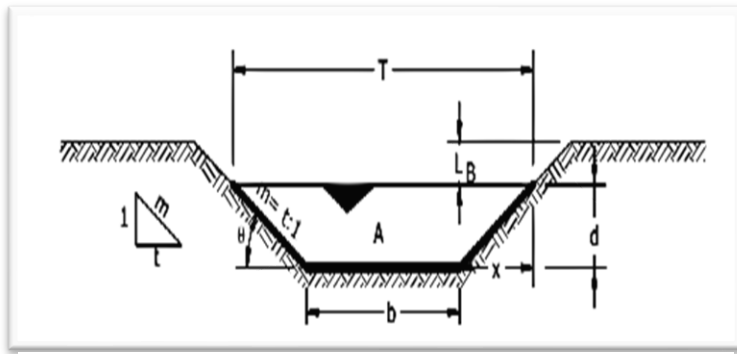


Ilustración: 1 Elementos geométricos más importantes, Villón (2008)

A continuación, se presenta la nomenclatura de la sección transversal de los canales.

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLOS
Tirante de agua: Es la profundidad máxima del agua en el canal.	y
Ancho de solera: Ancho de plantilla, o plantilla, es el ancho de la base de un canal.	b
Espejo de agua: Es el ancho de la superficie libre del agua.	T
Ancho de corona	C
Profundidad total del canal	H
Bordo libre: Es la distancia que hay desde la superficie libre del agua hasta la corona del bordo, se expresa en m.	$H - y$
ángulo de inclinación de las paredes laterales con la horizontal.	θ

Talud: Es la relación de la proyección horizontal a la vertical de la pared lateral (se llama también talud de las paredes laterales del canal). Es decir, Z es el valor de la proyección horizontal cuando la vertical es 1.	$Z = ctg \theta.$
Área hidráulica: Es la superficie ocupada por el líquido en una sección transversal normal cualquiera.	A
Perímetro de mojado: Es la parte del contorno del conducto que está en contacto con el líquido	p
Radio hidráulico: Es la dimensión característica de la sección transversal, hace las funciones del diámetro en tuberías.	$R = \frac{A}{P}$
Profundidad media: Es la relación entre el área hidráulica y el espejo de agua.	$\bar{y} = \frac{A}{T}$
Gasto: Es el volumen de agua que pasa en la sección transversal del canal en la unidad de tiempo, y se expresa en m ³ /s.	Q

Tabla 1: descripción de elementos geométricos de un canal.

CAPITULO 2.

FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL MOVIMIENTO DEL FLUJO DENTRO DE UN CANAL

Energía del flujo en canales abiertos

Andrade, (2013), menciona lo siguiente:

La energía total de un flujo uniforme o gradualmente variado en unidades de longitud por peso de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección del canal puede expresarse como una altura total, que es igual a la suma de la elevación por encima de un nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad, de la siguiente forma.

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

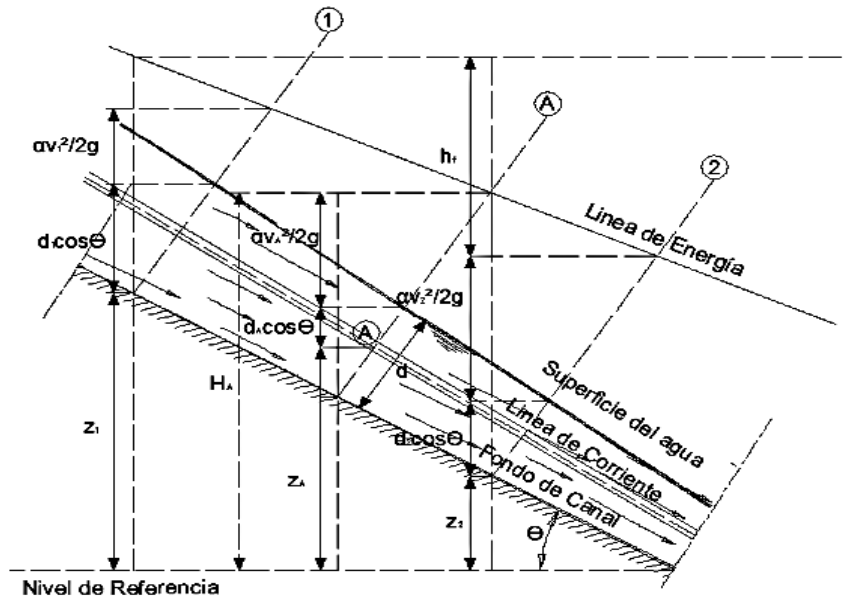


Ilustración 2: energía de un flujo gradualmente variado en un canal abierto (adaptado de Ven Te Chow 1954 por Andrade 2013).

Donde:

Z: Elevación del punto A por encima del plano de referencia (m)

θ : Ángulo de inclinación del canal ($^{\circ}$).

$y = d \cos \theta$: Altura de presión, lo cual para flujo en canales abiertos es equivalente a la profundidad de la lámina de agua en el punto A (m).

V_A : Velocidad media del flujo en el punto A (m/s).

g : Aceleración de la fuerza de gravedad (m/s^2).

En general cada línea de corriente que pasa a través de la sección del canal tendrá una altura de velocidad diferente, debido a la distribución no uniforme de la velocidad; en términos prácticos esto se remedia afectando la cabeza de velocidad con el coeficiente de Coriolis (α) con lo que la energía total en una sección del canal es:

$$H = Z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g}$$

De acuerdo con el principio de conservación de energía, la altura de energía total en la sección localizada aguas arriba, debe ser igual a la altura

de energía total localizada aguas abajo más la pérdida de energía (h_f) entre las dos secciones”.

$$H = Z_1 + d_1 \cos\theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + d_2 \cos\theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

Energía específica

El concepto de energía específica fue introducido por Bakhmeteff en 1912 (Chaudhry, 2008). Como se notará a continuación, tiene una importante aplicación para el planteamiento de la ecuación de Bernoulli entre dos puntos de una determinada línea de corriente en el flujo. La velocidad del flujo en una sección del canal puede variar de un punto a otro (Gallardo et al., 2022).

En la sección de un canal se define como la energía por peso medida respecto al fondo de éste. Entonces si $Z = 0$, la ecuación se expresa de la siguiente forma:

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

Estados de flujo.

(Gallardo et al., 2022), afirmó lo siguiente:

Los estados de flujo en canales abiertos o flujos libres están regidos por la relación que se tiene entre el efecto de la viscosidad y el de la gravedad, en concordancia a las fuerzas inerciales del flujo. Estos flujos pueden ser de dos tipos: flujos laminares y turbulentos. Se dice que un flujo es laminar cuando el fluido se mueve a lo largo de líneas suaves y definidas y el flujo se ve como capas delgadas que se mueven entre sí. Por el contrario, en el flujo turbulento, se produce un movimiento caótico de las partículas líquidas (movimientos en órbitas irregulares e irregulares en el espacio y el tiempo). En mecánica de fluidos básica, dependiendo de la magnitud relativa de las fuerzas de inercia frente a las viscosas, el flujo se puede clasificar como se

describe anteriormente. Si el flujo es laminar prevalecerá la fuerza viscosa, caso contrario prevalecerá el flujo turbulento si prevalece la fuerza de inercia. Al mismo tiempo, el flujo también puede estar en un estado de transición de fase, ni estratificado ni turbulento. Esta función se denomina flujo transicional.

A juicio de Sotelo (2002)

El flujo laminar en canales ocurre muy rara vez debido a sus dimensiones relativamente grandes y a la baja viscosidad cinemática del agua. La única posibilidad se presenta cuando el flujo es en láminas muy delgadas, con poca velocidad, como en el movimiento del agua de lluvia sobre cubiertas y superficies pavimentadas. (p.20)

Número de Reynolds

(Chow, 1994 citado por Gallardo et al.,2022) afirmó lo siguiente:

Para poder estudiar la resistencia del flujo bajo las diferentes condiciones de comportamiento en los estados laminar y turbulento, Osborne Reynolds hacia el año 1883, basado en sus experimentaciones, planteó el criterio para distinguir los flujos laminares, turbulento y de transición, mediante el número que lleva su nombre. Él observó que el movimiento de los fluidos en ductos o canales en algunas ocasiones conserva un movimiento ordenado y en otras es desordenado. El numero Reynolds es un numero adimensional que corresponde al cociente entre los términos convectivos y los términos viscosos que gobiernan el movimiento de los fluidos.

$$R_e = \frac{vR}{V}$$

De donde, v es la velocidad media, R es el radio hidráulico del conducto (relación entre el área mojada del fluido y el perímetro mojado de la sección que lo transporta) y V es la viscosidad cinemática del fluido.

Reynolds estableció unos rangos de valores para describir el comportamiento de flujo. Cuando el valor es muy bajo el flujo es laminar, pero cuando se acerca a un valor de 500 pasa de esta característica a un estado de transición, manteniéndose en esta condición para valores entre 500 y 2000 aproximadamente, y para valores mayores, para a ser turbulento. (p.15)

Efecto de la gravedad.

Sotelo (2002), señala lo siguiente:

El efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación está dada por el número de Froude, definido como $F = \frac{V}{\sqrt{gL}}$

Donde V es la velocidad media del flujo en pies/s, g es la aceleración de la gravedad en pies/s² y L es una longitud característica en pies.

En el flujo en canales abiertos, la longitud característica se hace igual a la profundidad hidráulica D, la cual está definida como el área de la sección transversal del agua perpendicular a la dirección del flujo en el canal dividido por el ancho de la superficie libre. Para canales rectangulares ésta es igual a la profundidad de la sección de flujo.

Cuando F es igual a la unidad, la ecuación anterior se convierte en

$$V = \sqrt{gD}$$

y se dice que el flujo está en un estado crítico si F es menor que la unidad, o $V < \sqrt{gD}$ el flujo es subcrítico. En este estado el papel jugado por las fuerzas gravitacionales es más pronunciado; por tanto, el flujo tiene una velocidad baja y a menudo se describe como tranquilo y de corriente lenta. Si F es mayor que la unidad, o $V > \sqrt{gD}$, el flujo es supercrítico. En este estado

las fuerzas inerciales se vuelven dominantes; el flujo tiene una alta velocidad y se describe usualmente como rápido, ultrarrápido y torrencial. (p.20)

Ecuaciones empíricas de fricción

Sotelo (2002), da a conocer que:

El uso de la ecuación de Chezy en canales tiene la dificultad de tener que hacer una estimación adecuada del factor de fricción, toda vez que éste depende del número de Reynolds.

Sin embargo, la mayor parte de los problemas de canales que se presentan en la práctica están dentro de la región hidráulicamente rugosa del flujo turbulento. Para esta condición se han obtenido de manera experimental una buena cantidad de ecuaciones que valúan el factor C.

Las ecuaciones fueron obtenidas por distintos autores, pero deben aplicarse para el mismo ámbito de condiciones de geometría del canal, rugosidad, número de Reynolds, etc., para el cual fueron obtenidas. Las rugosidades estudiadas han sido muy restringidas en la mayoría de los casos.

Rugosidad superficial

(Gallardo et al., 2022), señalan que:

La rugosidad superficial está definida por la forma y tamaño que poseen las partículas del material ubicadas en el perímetro mojado del canal, generando oposición al flujo. Si se presentan partículas finas el valor de n puede ser bajo, y para partículas de mayor tamaño los valores de n son altos.

Ecuaciones para el cálculo del factor de fricción C de Chezy, donde R_h , es el radio hidráulico y S es la pendiente hidráulica. Son válidas para el sistema internacional de unidades.

Autor	Ecuación	Observaciones
Ganguillet y Kutter	$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R_h}}}$	Aconsejable en canales naturales, para los que usualmente conduce a resultados. Es compleja y tiene la desventaja de que ocurren grandes cambios en C para cambios pequeños en n . este coeficiente depende de la rugosidad del canal.
Kutter	$C = \frac{100\sqrt{R_h}}{m + \sqrt{R_h}}$	En una simplificación de la de Ganguillet y Kutter, m es un coeficiente de rugosidad.
Bazzin	$C = \frac{87}{1 + \frac{N_B}{\sqrt{R_h}}}$	Está basada en una buena cantidad de experimentos y es relativamente sencilla, N_B es un coeficiente de rugosidad.
Kozeny	$C = 20 \log \frac{A}{T} + N_K$	Es análoga a la de los conductos a presión y fue obtenida con base en los resultados experimentales de von Misses y Bazzin. N_K es un coeficiente de rugosidad.
Martíec	$C = 17.7 \log \frac{R_h}{d_m} + 13.6$	Se obtuvo de muchas mediciones en ríos de la ex Unión Soviética. d_m es el diámetro medio del grano de material en el fondo del río en m. es válida cuando $0.15 \leq R_h \leq 2.25$ m, $0.00004 \leq S \leq 0.0039$ y $0.004 \leq d_m \leq 0.25$ m.
Manning	$C = \frac{R_h^{\frac{1}{6}}}{n}$	Originalmente fue obtenida a partir de las siete ecuaciones diferentes basadas en ensayos de Bazin, y posteriormente verificada por observaciones. Es una de las más utilizadas por su sencillez. n es el mismo coeficiente que utilizo Ganguillet y Kutter.
Pavlovski	$C = \frac{R_h^2}{n}$	Considera que el exponente en la ecuación de Manning no es constante, sino que varía con la forma del canal y la rugosidad, como sigue: $z = 1.5\sqrt{n}$, para $R_h < 1$ m, y $z = 1.3\sqrt{n}$, para $R_h > 1$ m. El valor de n es el mismo que el de Manning.

Tabla 2: Ecuaciones para el cálculo del factor de fricción C de Chezy. Sotelo (2002)

1. Conductos cerrados Parcialmente llenos	Ganguillet y Kutter n	Kutter m	Bazzin N_B	Kozeny N_k
Fierro fundido nuevo.	0.12	0.20	0.06	
Fierro fundido usado.		0.25	0.12	
Fierro colado.	0.12	0.20		
Barro vitrificado nuevo.		0.25		
Barro vitrificado usado.	0.017	0.30 a 0.35		
Tubos de alcantarillado.	0.017 a 0.020	0.30 a 0.35		
túneles de concreto pulido.	0.11 a 0.013	0.20 a 0.25	0.22	

2. Canales abiertos	Ganguillet y Kutter n	Kutter m	Bazzin N_B	Kozeny N_k
Madera cepillada.	0.10	0.15 a 0.20	0.6	
Madera de acabado rugoso.		0.30 a 0.35		
Mampostería de ladrillo bien acabada.	0.013	0.25	0.16	70 a 76
Cemento pulido.		0.20 a 0.25	0.10 a 0.16	84 a 90
Concreto pulido.	0.012	0.20	0.11 a 0.22	
Concreto rugoso	0.017	0.65	0.45	58 a 62
Piedra brasa bien acabada.	0.017	0.65	0.46	60 a 70
En tierra, arroyos y ríos.	0.025	1.75	1.4 a 1.6	
En tierra con material grueso y platas.	0.035	2.0 a 2.5	1.75	
Con cantos rodados.	0.04 a 0.5	3.5 a 5.0	Hasta 3.5	
Con gran rugosidad de fondo y maleza tupida.	0.9			
Roca acomodada.				36 a 50
Roca a volteo				28 a 36
Grava	<ul style="list-style-type: none"> Gruesa (10 a 15 cm). Media (5 a 10 cm). Fina (2 a 3 cm). 			32 a 38
				38 a 42
				42 a 46
Cantos rodados (10 a 15 cm).				28 a 32

Tabla 3: Coeficientes de rugosidad. Sotelo (2002)

Distribución de velocidades en una sección de canal.

De acuerdo con Sotelo (2002):

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por 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.

Como resultado de la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal, la altura de velocidad de un flujo en canales abiertos es por lo general mayor que el valor calculado de acuerdo con la expresión $\frac{V^2}{2g}$, donde V es la velocidad media. Cuando se utiliza el principio de energía en cálculos, la altura de velocidad real puede expresarse como $\alpha \frac{V^2}{2g}$, donde α se conoce como coeficiente de energía o coeficiente de Coriolis, en honor de G. Coriolis quien lo propuso por primera vez. Datos experimentales indican que

el valor de α varía desde 1.03 hasta 1.36 para canales prismáticos aproximadamente rectos. Por lo general el valor es alto para canales pequeños y bajo para corrientes grandes con profundidad considerable.

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

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

Para propósitos prácticos, Kolupaila propuso los valores mostrados a continuación para los coeficientes de distribución de velocidad. Valores reales de los coeficientes para un cierto número de canales. (p.49)

Canales	Valores de α			Valores de β		
	Min.	Prom.	Max.	Min.	Prom.	Max.
Canales rectangulares vertederos.	1.10	1.15	1.20	1.03	1.05	1.07
Corrientes naturales y torrentes.	1.15	1.30	1.50	1.05	1.10	1.17
Ríos bajo cubiertas de hielo.	1.20	1.50	2.00	1.07	1.17	1.33
Valles de ríos inundados	1.50	1.75	2.00	1.17	1.25	1.33

Tabla 4: valores de coeficientes de distribución de velocidad. Sotelo (2002)

Clasificación del flujo

Rodríguez (2008), indica que existe más de un tipo de flujo en canales abiertos los cuales se puede clasificar y describirse de varias maneras.

La siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio de los parámetros de profundidad, velocidad, área etc. del flujo con respecto al tiempo y al espacio. La clasificación del flujo en canales abiertos se resume de la siguiente manera:

<p>Flujo permanente: El flujo es permanente si los parámetros (tirante, velocidad, área, etc.), no cambian con respecto al tiempo, es decir, en una sección del canal en todos los tiempos los elementos del flujo permanecen constantes. Matemáticamente se pueden representar: $\frac{dA}{dt} = 0; \quad \frac{dV}{dt} = 0; \quad \frac{da}{dt} = 0;$</p>	<p>1. Flujo uniforme: Flujo uniforme permanente: La profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración, es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos</p> <p>2. Flujo variado <i>a) flujo gradualmente variado:</i> El flujo gradualmente variado es aquel en el cual los parámetros cambian en forma gradual a lo largo del canal, como es el caso de una curva de remanso. <i>b) Flujo rápidamente variado</i> El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas, como es el caso del resalto hidráulico.</p>
<p>Flujo no permanente: Si los parámetros cambian con respecto al tiempo el flujo se llama no permanente, es decir: $\frac{dA}{dt} \neq 0; \quad \frac{dV}{dt} \neq 0; \quad \frac{da}{dt} \neq 0; \quad \text{etc.}$</p>	<p>Flujo uniforme no permanente (raro): El establecimiento de un flujo uniforme no permanente requeriría que la superficie del agua fluctuara de un tiempo a otro, pero permaneciendo paralela al fondo del canal, como esta es una condición prácticamente imposible, Flujo uniforme no permanente es poco frecuente (raro).</p> <p>3. Flujo variado <i>c) flujo gradualmente variado:</i> El flujo gradualmente variado es aquel en el cual los parámetros cambian en forma gradual a lo largo del canal, como es el caso de una curva de remanso. <i>d) Flujo rápidamente variado</i> El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas, como es el caso del resalto hidráulico.</p>

Tabla 5: Clasificación de tipos de flujo. Rodríguez (2008)

En la mayor parte de los problemas de canales abiertos es necesario estudiar el comportamiento del flujo solo bajo condiciones permanentes. Sin embargo, si el cambio en la condición del flujo con respecto al tiempo es importante, el flujo debe tratarse como no permanente.

CAPÍTULO 3.

FLUJO VARIADO

Definición

Rodríguez (2008)

El flujo gradualmente variado puede tener tirantes que decrecen respecto al tiempo y el espacio, al cual se le llama flujo gradualmente

variado acelerado por

el contrario puede tener tirantes que aumenta respecto al tiempo y se trata de Un flujo gradualmente variado retardado o remanso. Un caso muy típico de remanso es aquel que se presenta aguas arriba de un vertedor o cualquier obstrucción semejante (p.8).

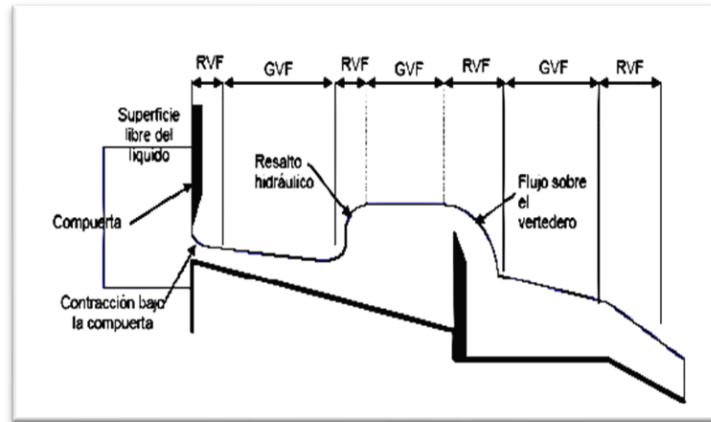


Ilustración 3: flujo variado. Rodríguez (2008)

A juicio de Chow (1994)

El flujo variado puede ocurrir en cualquier canal (prismático o no) pero su tendencia será tratar de alcanzar las condiciones del uniforme en los tramos prismáticos de la conducción. Esto puede o no lograrse plenamente dependiendo de la rugosidad del canal y de la longitud que tenga.

El flujo gradualmente variado

Como el uniforme, el flujo gradualmente variado se produce en un canal de gasto constante y está íntimamente relacionado con la pérdida por fricción, la cual es factible de valorar previamente. Cualquier otra pérdida es

secundaria, pero puede tomarse en cuenta localmente o a lo largo del canal si se valúa previamente. Es el caso de la pérdida por cambios bruscos o graduales de la sección, como resultado de la separación del flujo de las paredes y plantilla, o por la turbulencia inducida al cambiar la velocidad de una sección a otra en un tramo o en todo el canal. Es pues, un problema que se analiza con la ecuación de energía, lo que elimina a flujos rápidamente variados, como el salto hidráulico, o el espacialmente variado de gasto creciente, donde las pérdidas se valúan con el principio del momentum.

Hipótesis para el desarrollo de la teoría del flujo gradualmente variado.

a) El fondo del canal es plano y de pendiente uniforme e induce sólo pequeñas curvaturas en el perfil longitudinal del flujo, y líneas de corriente prácticamente paralelas; por lo mismo, la distribución hidrostática de la presión prevalece en cada sección. Esta suposición no implica eliminar pendientes supercríticas.

b) La distribución de la velocidad en una sección es fija, por tanto, los coeficientes que dependen de dicha distribución son constantes en todo el canal.

c) La pérdida de energía más importante es la de fricción. Para el cálculo de la pendiente local de fricción (en una sección del canal) se utiliza una ecuación igual que en flujo uniforme, con la velocidad, área, radio hidráulico y factor de fricción que haya en la sección; este último independiente del tirante. Esta suposición no ha sido verificada ni teórica ni experimentalmente, sin embargo, los errores que induce son pequeños si se comparan con los que se incurre al seleccionar el factor de fricción. La suposición es probablemente más precisa cuando el flujo se contrae que cuando se expande, debido a que en el primero la pérdida de energía es causada casi enteramente por fricción; en el segundo, pueden existir además pérdidas por turbulencia en gran escala.

d) En los desarrollos no se considera el efecto del arrastre de aire al interior del flujo. Cuando dicho arrastre sea importante, el problema se resuelve como si no lo hubiera; después, el perfil resultante se corrige para tomar en cuenta dicho efecto. (p.213).

Características de los perfiles del flujo

Sotelo (2002), afirmó lo siguiente:

El perfil que adopta la superficie libre del agua en cualquier condición de flujo en un canal se conoce como perfil del flujo o perfil hidráulico. La primera clasificación de los perfiles del flujo variado fue hecha por Bakhmeteff y está basada en la pendiente del canal y la zona en que se aloja el perfil.

Cualquiera que sea la pendiente, el gasto y la sección del canal, las líneas que indican la altura del tirante normal y del crítico respecto de la plantilla, dividen al espacio en que puede desarrollarse el perfil del flujo en tres zonas, llamadas:

Zona 1. El espacio arriba de la línea superior.

Zona 2. El espacio entre las dos líneas.

Zona 3. El espacio abajo de la línea inferior. (p.396).

Clasificación de los perfiles de flujo

Chow (1994), expresa que:

Los perfiles de flujo pueden clasificarse en trece tipos diferentes de acuerdo con la naturaleza de la pendiente del canal y la zona en la cual se encuentra la superficie del flujo. Estos tipos se designan como H2, H3; M1, M2, M3, C1, C2, C3; S1, S2, S3; y A2, A3; donde la letra describe la pendiente: H para horizontal, M para suave (subcrítica), C para crítica, S para empinada

(supercrítica) y A para pendiente adversa, y el número representa el número de la zona. De los trece perfiles de flujo, doce son para flujo gradualmente variado, y uno, C2, es para flujo uniforme. Nótese que a menudo ocurre un perfil de flujo continuo sólo en una zona. Como los perfiles cerca de la profundidad crítica y del fondo del canal no pueden definirse con exactitud mediante la teoría de flujo gradualmente variado, éstos se muestran con líneas punteadas.

Flujo bruscamente variado

Chow (1994), afirmó lo siguiente:

El flujo rápidamente variado tiene curvatura de sus líneas de corriente muy pronunciadas. El cambio de la curvatura puede volverse tan abrupto que el perfil de flujo virtualmente se rompe, dando como resultado un estado de alta turbulencia; éste es el flujo rápidamente variado con perfil discontinuo, del cual el resalto hidráulico es un ejemplo. (p.326).

Salto hidráulico

Sotelo (2002)

La evidencia experimental muestra con toda claridad que la transferencia del régimen supercrítico a subcrítico es en forma brusca, acompañada de mucha turbulencia y gran pérdida de energía. Al entrar el agua a la zona del resalto, se reduce rápidamente la gran velocidad del flujo, ocurre un incremento brusco del tirante que virtualmente rompe el perfil del flujo, y se produce un estado de gran turbulencia y pérdida de energía propia del fenómeno. El salto hidráulico ocurre con fuertes pulsaciones, como si el agua entrara en ebullición, indicación visible de la inclusión de aire. Después de un incremento irregular y brusco de la superficie del agua, la energía específica final es con frecuencia la apropiada para establecer un tirante casi igual al normal en un tramo relativamente corto del canal aguas abajo, el frente

turbulento se regulariza de manera inmediata y continúa libremente en régimen subcrítico.

La rápida variación del tirante toma lugar en un tramo relativamente corto; con ella, la pérdida de fricción en la frontera es relativamente pequeña y, en muchos casos, insignificante, si se compara con la pérdida por la expansión turbulenta y desaceleración de la corriente de gran velocidad desarrollada en el fenómeno.

El salto hidráulico constituye la única manera posible de cambiar el régimen supercrítico a subcrítico. Con frecuencia ocurre al pie de la descarga de una compuerta reguladora, de un cimacio, o de un cambio de pendiente.

Las aplicaciones prácticas del resalto hidráulico

se utiliza para:

- 1) disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras hidráulicas, y prevenir de esta manera la socavación aguas abajo de las estructuras
- 2) recuperar altura o aumentar el nivel del agua en el lado de aguas abajo de una canaleta de medición y mantener un nivel alto del agua en el canal de irrigación o de cualquier estructura para distribución de aguas.
- 3) incrementar el peso sobre la zona de aguas abajo de una estructura de mampostería y reducir la presión hacia arriba bajo dicha estructura aumentando la profundidad del agua en su zona de aguas abajo
- 4) aumentar el caudal por debajo de una compuerta deslizante manteniendo alejada la profundidad de aguas abajo, debido a que la altura efectiva se reducirá si la profundidad de aguas abajo ahoga el resalto

- 5) para indicar condiciones especiales de flujo, como la existencia de flujo supercrítico o la presencia de una sección de control, de tal manera que pueda localizarse una estación de aforo
- 6) mezclar químicos utilizados para la purificación de agua y casos similares
- 7) airear el agua en sistemas de suministros urbanos
- 8) remover bolsas de aire en las líneas de suministro de agua y prevenir el taponamiento por aire. (p.308).

Tipos de resalto

Chow (1994)

Los resaltos hidráulicos en fondos horizontales se clasifican en varias clases. De acuerdo con los estudios del U. S. Bureau of Reclamation, éstos pueden clasificarse convenientemente según el número de Froude F_1 , del flujo entrante como sigue:

Para $F_1 = 1$, el flujo es crítico y por consiguiente no se forma resalto.

Para $F_1 = 1$ a 1.7, la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta el resalto ondulante.

Para $F_1 = 1.7$ a 2.5, se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta entonces el resalto débil.

Para $F_1 = 2.5$ a 4.5, existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Cada oscilación produce una onda grande con periodo irregular, muy común en canales, que puede viajar a lo largo de varias millas causando daños ilimitados a bancas en tierra y a enrocados de protección. Se produce entonces el resalto oscilante.

Para $F_1 = 4.5$ a 9.0 , la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición de este resalto son menos sensibles a la variación en la profundidad de aguas abajo. El resalto se encuentra bien balanceado y su comportamiento es el mejor. La disipación de energía varía de 45% a 70%. Se presenta entonces el resalto estable.

Para $F_1 = 9.0$ y mayores, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Se produce entonces el resalto fuerte. Nótese que los rangos del número de Froude dados arriba para los diferentes tipos de resalto no están claramente demarcados, sino que se traslapan en cierto modo según las condiciones locales.

Longitud del resalto.

Ésta puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino. En teoría, esta longitud no puede determinarse con facilidad, pero ha sido investigada experimentalmente por muchos ingenieros hidráulicos.

Localización del resalto.

El resalto hidráulico ocurre en un flujo supercrítico cuando su profundidad cambia abruptamente a su profundidad secuente. En teoría, el resalto ocurrirá en un canal horizontal rectangular si las profundidades iniciales y secuentes y el número de Froude de aproximación satisfacen la ecuación.

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

Esta condición teórica por lo general se utiliza para localizar la posición de un resalto. Para un cálculo más exacto de la posición del resalto, sin embargo, debe considerarse la longitud de este. (p.388).

MATERIALES Y MÉTODOS

Este proyecto de investigación teórico se realizó en la sala de cómputo del departamento de riego y drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro la cual se encuentra localizada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, en las coordenadas geográficas $25^{\circ} 21' 13''$ latitud norte y $101^{\circ} 1' 56''$ longitud oeste, con una elevación de 1,742 msnm. Con una temperatura media anual de 16.8°C , con una precipitación media anual de 350 a 450 mm.

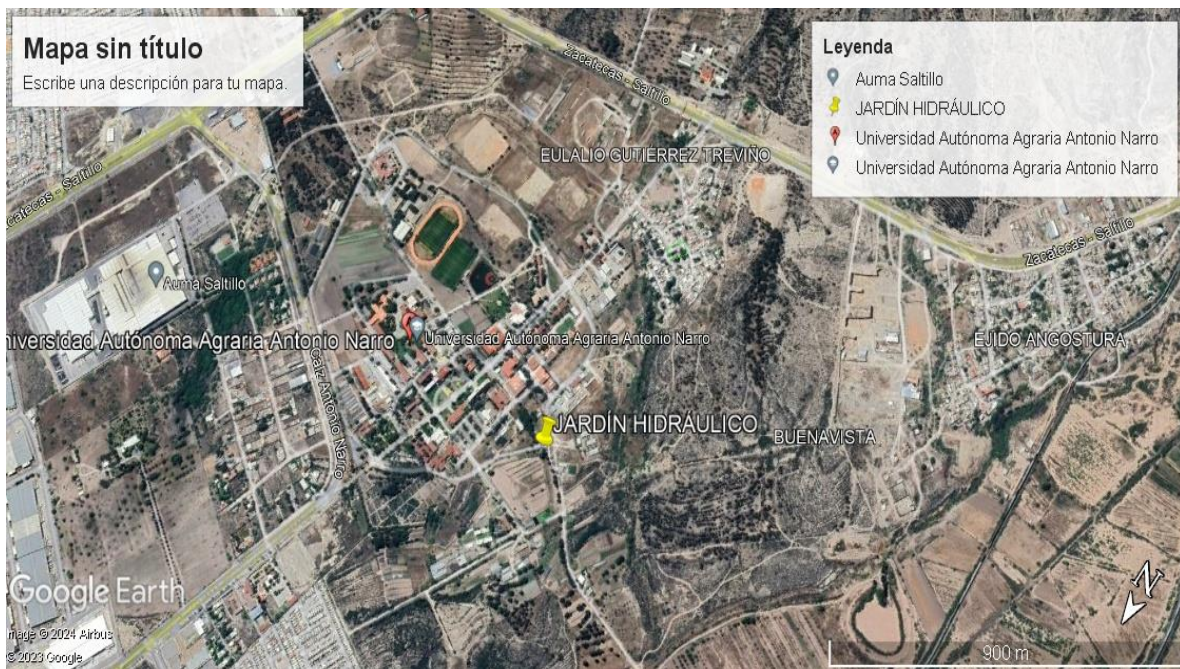


Ilustración 4: jardín hidráulico en la universidad autónoma Agraria Antonio Narro. Google Earth

Se plantea construir un canal rectangular con flujo gradual y bruscamente variado en el jardín hidráulico de esta institución como tercera y última etapa.

Para ello se toman los datos topográficos del terreno; longitud y altimetría y se procede a diseñar el canal a prueba y error.

Flujo uniforme

En el canal que se diseñó, el inicio del flujo es uniforme y los flujos uniformes en canales tiene la característica de tener un tirante constante y una velocidad media constante (Chanson, 2002).

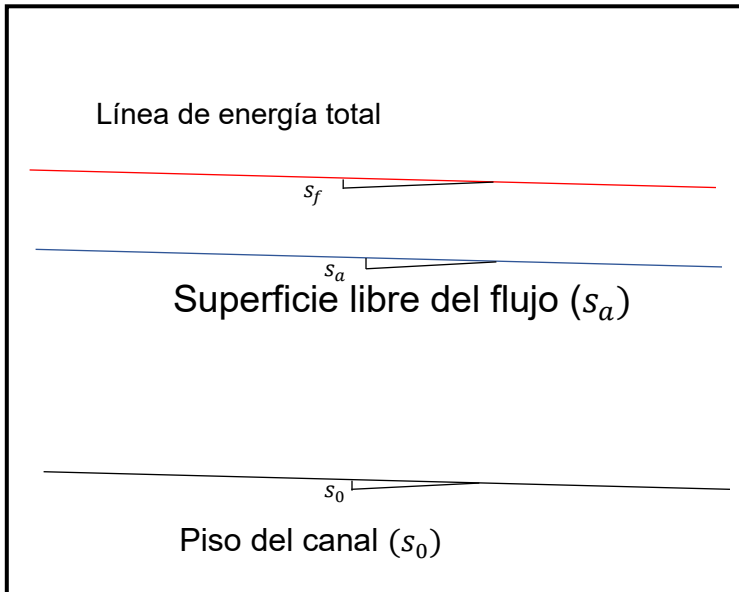


Ilustración 5: flujo uniforme. Chanson, 2002).

En el flujo uniforme las tres líneas anteriores son paralelas por lo que sus pendientes son iguales. ($s_0 = s_a = s_f$) y la ecuación que se empleó fue la ecuación de Manning tal como se presenta a continuación.

$$Q = \frac{A}{n} R h^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}}$$

Donde

Q = Es el caudal del flujo en el canal $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$

A = Área de la sección transversal del flujo en el canal (m^2)

n = Coeficiente de rugosidad (adimensional)

R_h = Radio hidráulico (m)

S_0 = pendiente del canal (adimensional)

Para diseñar un canal se tiene que conocer el caudal que debe conducir, si es revestido o desnudo y la pendiente que debe de tener dado la topografía del lugar. Por lo tanto, se despejan las variables conocidas de la ecuación que son caudal, rugosidad y pendiente, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{nQ}{\sqrt{S_0}} = ARh^{\frac{2}{3}}$$

En la formula anterior el área y el radio hidráulico están en función del tirante, por lo tanto, se suponen los tirantes del flujo hasta que se cumpla la igualdad de la ecuación que se describió para obtener el tirante del flujo uniforme. Chow (1994).

Para poder obtener este tirante se puede resolver a prueba y error hasta que dé aproximadamente la igualdad de la ecuación anterior o por métodos numéricos como podría ser el método de Newton-Raphson.

$$\frac{0.015(0.1 \text{ m}^3)}{\sqrt{0.022}} = (0.0576 \text{ m}^2)(0.0727 \text{ m})^{\frac{2}{3}}$$

$$y_h = 0.096 \text{ m}$$

Flujo gradualmente variado con un perfil s1 y con pendiente pronunciada.

El flujo gradualmente se realiza en un canal, cuando el tirante del flujo varía lentamente a lo largo de él. Si el flujo es gradualmente variado acelerado, el tirante disminuye lentamente y se conoce como “caída”. Si el flujo es gradualmente variado frenado el tirante aumenta lentamente a lo largo del canal y a este tipo de flujo se le conoce como “remanso”.

Clasificación de las pendientes y zonas de un canal.

Para poder clasificar las pendientes y zonas del canal se toma como referencia la pendiente crítica del canal S_0 .

Pendientes del canal.

Pendiente horizontal. Se identifica con la letra mayúscula **H**; donde $S_0 = 0$ y $S_0 < S_c$; por lo tanto se establece un flujo subcrítico.

Pendiente adversa; Se identifica con la letra mayúscula **A**; donde $S_0 < 0$ y $S_0 < S_c$; a este tipo de pendientes se le conoce como contrapendiente y esto lógicamente origina un flujo subcrítico.

Pendiente suave; Se identifica con la letra mayúscula **M**; donde $S_0 > 0$ y $S_0 < S_c$; esto da como resultado un flujo subcrítico.

Pendiente crítica; Se identifica con la letra mayúscula **C**; donde $S_0 > 0$ y $S_0 = S_c$; esto da origen a un flujo crítico.

Pendiente pronunciada; Se identifica con la letra mayúscula **S**; donde $S_0 > 0$ y $S_0 > S_c$; esta condición establece en el canal un flujo supercrítico.

Zonas en el flujo gradualmente variado.

Las zonas a lo largo del flujo gradualmente variado se catalogan por números. Estas son únicamente tres; la zona 1, la 2 y la 3. Se localizan de la siguiente manera:

La zona 1. Se encuentra en la parte superior en el perfil del flujo.

La zona 3. Se encuentra en la parte inferior en el perfil del flujo, en contacto con el piso del acueducto.

La zona 2. Se encuentra en medio de la zona 1 y la 3.

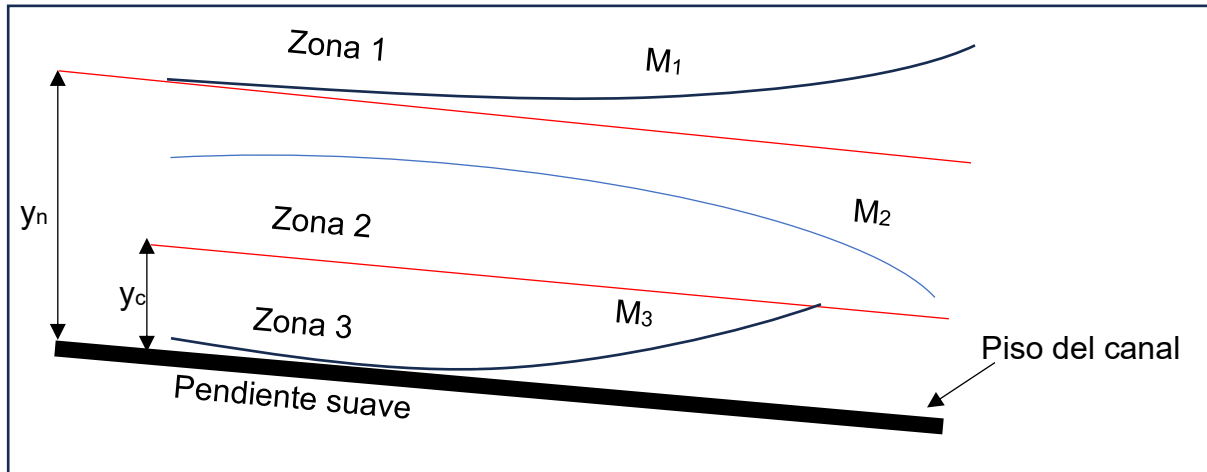


Ilustración 6: clasificación del perfil M_1 del flujo gradualmente variado en pendiente suave. Chow (1994)

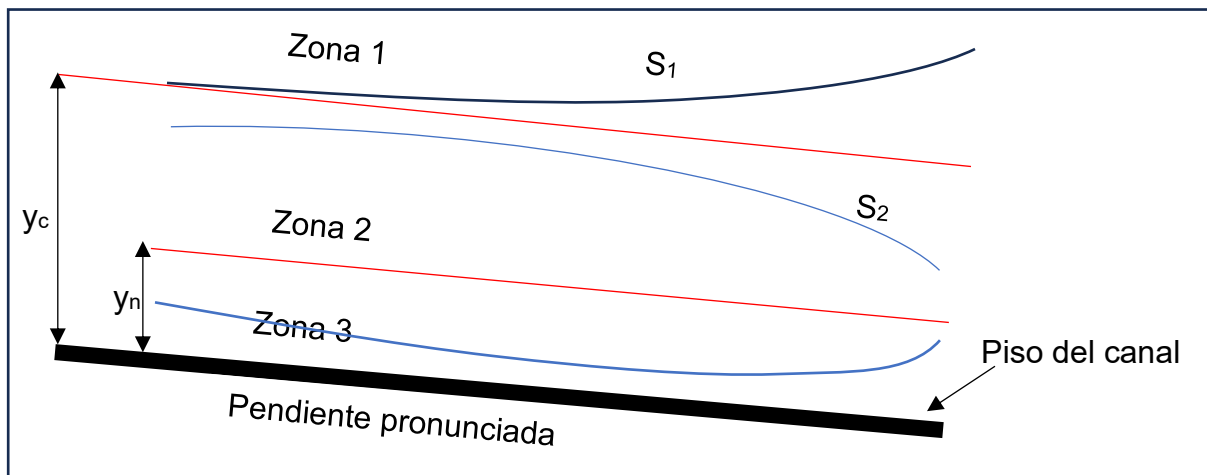


Ilustración 7: clasificación del perfil S_1 del flujo gradualmente variado en una pendiente pronunciada. Chow (1994)

Clasificación de los perfiles del flujo gradualmente variado.

Para clasificar los perfiles del flujo gradualmente variado se tienen que combinar los diferentes tipos de pendientes del canal, con las zonas en la cual se localizan las superficies libres del flujo, que da como resultado 13 perfiles. En el cual doce pertenecen al flujo gradualmente variado y una al flujo uniforme.

Estos perfiles se designan de la siguiente manera:

Del flujo gradualmente variado:

H2, H3; M1, M2, M3; C1, C3; S1, S2, S3; A2 y A3.

Del flujo uniforme crítico:

C2.

Condiciones para clasificar los perfiles del flujo gradualmente variado.

Flujo perfil **M** (canal con pendiente suave o moderada). Para que un flujo sea tipo **M** debe de tener la siguiente condición.

$$y_n > y_c \text{ y } 0 < S_0 < S_c.$$

Flujo perfil M1 tiene las siguientes características:

- $y > y_n > y_c$
- $d_y/d_x > 0$; la derivada es positiva (+).
- El tirante aumenta a medida que el flujo avanza.
- El flujo es subcrítico.
- Es un remanso.
- La superficie libre se encuentra en la zona 1.

El perfil M1 es el más importante de todos los perfiles del flujo gradualmente variado (Chow 1959). Un ejemplo del perfil M1 es el flujo de un canal atrás de una compuerta abierta, donde se forma un remanso.

Flujo perfil M2 tiene las siguientes características:

- $y_n > y > y_c$
- $d_y/d_x < 0$; la derivada es negativa (-).
- El tirante disminuye a medida que el flujo avanza.
- El flujo es subcrítico.
- Es una caída.
- La superficie libre se encuentra en la zona 2.

Un ejemplo clásico del perfil M2, es el flujo en un canal antes de un escalón, en donde se forma una caída.

Flujo perfil M3 tiene las siguientes características:

- $y_n > y_c > y$
- $d_y/d_x > 0$; la derivada es positiva (+).
- El tirante aumenta a medida que el flujo avanza.
- El flujo es supercrítico.
- Es un remanso.
- La superficie libre se encuentra en la zona 3.

Un ejemplo clásico del perfil M3, es el flujo después de una compuerta que tiene una abertura menor que el tirante crítico. Y delante de la compuerta se crea un flujo es supercrítico, que dibuja el perfil de un remanso en un tramo relativamente corto, en el cual posteriormente se forma un salto hidráulico porque el flujo pasa de un supercrítico a subcrítico, Ya que la pendiente del canal es suave.

Flujo perfil **S** (canal con pendiente pronunciada). Para que un flujo sea tipo sea tipo S debe de tener la siguiente condición:

$$y_n < y_c \text{ y } S_0 > S_c > 0.$$

El flujo perfil S1 tiene las siguientes características:

- $y > y_c > y_n$
- $d_y/d_x > 0$; la derivada es positiva (+).
- El tirante aumenta a medida que el flujo avanza.
- El flujo es subcrítico.
- Es un remanso.
- La superficie libre se encuentra en la zona 1.

Un ejemplo del perfil S1, es el de un canal con pendiente pronunciada que llega a un embalse. Antes del perfil S1 se tiene un buen salto hidráulico.

El flujo perfil S2 tiene las siguientes características:

- $y_c > y > y_n$
- $d_y/d_x < 0$; la derivada es negativa (-).
- El tirante aumenta a medida que el flujo avanza.
- El flujo es supercrítico.
- Es una caída.
- La superficie libre se encuentra en la zona 2.

Un ejemplo del perfil S2, es el de un canal que cambia su pendiente de suave a pronunciada donde el flujo pasa de subcrítico a supercrítico, en la cual teóricamente el tirante se establece en el cambio de pendiente, sin embargo, en la realidad se encuentra antes; el perfil S2 se inicia en el cambio de pendiente.

El flujo perfil S3 tiene las siguientes características:

- $y_c > y_n > y$
- $d_y/d_x > 0$; la derivada es positiva (+).
- El tirante aumenta a medida que el flujo avanza.
- El flujo es supercrítico.
- Es un remanso.
- La superficie libre se encuentra en la zona 3.

Un ejemplo del perfil S3, es el flujo de un canal de mayor a menor pendiente pronunciada donde el flujo S3 inicia en el cambio de pendiente.

Flujo perfil **C** (canal con pendiente crítica). Para que un flujo sea tipo C debe de tener la siguiente condición:

$$y_n = y_c \text{ y } S_0 = S_c > 0.$$

El flujo perfil C1 tiene las siguientes características:

- $y > y_n = y_c$
- $d_y/d_x > 0$; la derivada es positiva (+).
- El tirante aumenta a medida que el flujo avanza.
- El flujo es subcrítico.
- Es un remanso.

- La superficie libre se encuentra en la zona 1.

Un ejemplo del perfil C1, se presenta en un canal de pendiente crítica, que llega a un embalse.

El flujo perfil C3 tiene las siguientes características:

- $y_c = y_c > y$.
- $d_y/d_x > 0$; la derivada es positiva (+).
- El tirante aumenta a medida que el flujo avanza.
- El flujo es supercrítico.
- Es un remanso.
- La superficie libre se encuentra en la zona 3.

Un ejemplo del perfil C3, se presenta delante de una compuerta que tiene una abertura menor al tirante crítico, en un canal con pendiente crítica.

Flujo perfil H (canal horizontal o sin pendiente). Para que un flujo sea tipo sea tipo H debe de tener la siguiente condición:

$$y_n \xrightarrow{\infty} \infty \text{ (en teoría) y } S_0 = 0$$

El flujo perfil H2 tiene las siguientes características:

- $y > y_c$
- $d_y/d_x < 0$; la derivada es negativa (-).
- El tirante disminuye a medida que el flujo avanza.
- El flujo es subcrítico.
- Es una caída.
- La superficie libre se encuentra en la zona 2.

Un ejemplo del perfil H2, es el flujo en un canal sin pendiente antes de un escalón, esto se conoce como caída.

El flujo perfil H3 tiene las siguientes características:

- $y_c > y$
- $d_y/d_x > 0$; la derivada es positiva (+).

- El tirante aumenta a medida que el flujo avanza.
- El flujo es supercrítico.
- Es un remanso.
- La superficie libre se encuentra en la zona 3.

Un ejemplo clásico del perfil H3, es cuando ocurre un flujo después de una compuerta cuya apertura es menor al tirante crítico en un canal sin pendiente en el cual posteriormente se forma un salto hidráulico.

Flujo perfil **A** (canal con pendiente adversa). Para que un flujo sea tipo sea tipo A debe de tener la siguiente condición:

$$y_n \rightarrow \infty \text{ (en teoría) y } S_0 < 0$$

El flujo perfil A2 tiene las siguientes características:

- $y > y_c$
- $d_y/d_x < 0$; la derivada es negativa (-).
- El tirante disminuye a medida que el flujo avanza.
- El flujo es subcrítico.
- Es una caída.
- La superficie libre se encuentra en la zona 2.

Un ejemplo del perfil A2, es el flujo en un canal con pendiente adversa en el que aguas abajo existe un cambio brusco de altura o un escalón de bajada.

El flujo A3 tiene las siguientes características:

- $y_c > y$
- $d_y/d_x > 0$; la derivada es positiva (+).
- El tirante aumenta a medida que el flujo avanza.
- El flujo es supercrítico.
- Es un remanso.
- La superficie libre se encuentra en la zona 3.

Un ejemplo del perfil A3, es un flujo después de una compuerta que tiene una abertura menor al tirante crítico sobre un canal de en el cual en un corto tramo

cambia posteriormente a una pendiente a favor del flujo; entre la compuerta y el cambio de pendiente se presenta el perfil A3 y un salto hidráulico.

Diseño del proyecto del canal rectangular para flujo variado en estado permanente.

Lo primero que se dimensiono el canal a prueba y error con un caudal máximo de 100 lps.

Datos		
Primera pendiente del canal	S_{0_1}	0.0022
Segunda pendiente del canal	S_{0_2}	0.004
Tercera pendiente del canal	S_{0_3}	0.0024
Ancho de platilla	b	0.60 m
Altura de la corona	H	1.0 m
Rugosidad	n	0.015
Coefficiente alfa de Coriolis	α	1.10
Gasto máximo	Q	0.10 m ³ /s ²
Longitud total del canal	L	115 m.

Tabla 6: de datos para el diseño del canal rectangular con flujo gradual y bruscamente variado.

Se obtiene la pendiente crítica del flujo del canal a partir de las siguientes formulas.

Área del flujo crítico con la siguiente formula

$$A_c = y_c b$$

$$A_c = (0.146 \text{ m})(0.6 \text{ m}) = 0.0876 \text{ m}^2$$

Perímetro de mojado con la siguiente fórmula.

$$P_m = 2y_c + b$$

$$P_m = 2(0.146 \text{ m}) + 0.6 \text{ m} = 0.892 \text{ m}$$

Pendiente critica con la formula síguete.

$$S_0 = \frac{n^2 g P m^{\frac{4}{3}}}{\alpha T A^{\frac{1}{3}}}$$

Donde

δ_0 = pendiente critica

n= coeficiente de rugosidad (adimensional)

g = Aceleración de la gravedad terrestre ($\frac{m^2}{s}$)

Pm = perímetro de mojado del canal (m)

α = coeficiente alfa de Coriolis (adimensional)

T = Ancho superficial (m)

a = área del canal (m^2)

$$S_0 = \frac{(0.015^2)(9.81 \frac{m}{s^2}) (0.892 m)^{\frac{4}{3}}}{(1.1)(0.6 m)(0.876 m^2)^{\frac{1}{3}}} = 0.006466$$

Se obtiene el tirante crítico con la siguiente fórmula.

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

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{1.1 \left(0.167 \frac{m^2}{s}\right)^2}{9.81 \frac{m}{s^2}}} = 0.146$$

PRIMERA PARTE DEL CANAL CON FLUJO SUPERCRITICO.

Flujo uniforme supercrítico.

La primera parte del canal va a tener un flujo supercrítico dado a su primera pendiente pronunciada con flujo uniforme y su tirante se obtiene a prueba y error utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{0.015(0.1 \text{ m}^3)}{\sqrt{0.022}} = (0.0576 \text{ m}^2)(0.0727 \text{ m})^{\frac{2}{3}}$$

$$y_h = 0.096 \text{ m}$$

El tirante anterior va a tener una longitud de 5 m desde la entrada del canal.

Longitud del resalto hidráulico

Después del flujo uniforme supercrítico se desarrollará un resalto hidráulico debido a una compuerta semiabierta aguas abajo donde su primer tirante será el tirante del flujo uniforme de la entrada del canal.

$$y_1 = 0.096 \text{ m}$$

Se obtiene el segundo tirante a partir de las siguientes fórmulas:

Primero se obtiene el gasto unitario con la siguiente fórmula.

$$q = \frac{Q}{b}$$

$$q = \frac{0.1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.6 \text{ m}} = 0.167 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Segundo se obtiene el número de Froude para canales rectangulares.

$$F = q \sqrt{\frac{\alpha}{gy^3}}$$

$$F = 0.167 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \sqrt{\frac{1.1}{\left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.096 \text{ m})^3}} = 1.87$$

Como primer intento se determina el segundo tirante del resalto hidráulico considerando un canal de pendiente horizontal.

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

$$y_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8(1.87)^2} - 1 \right) 0.096 \text{ m} = 0.21 \text{ m}$$

Se obtiene la longitud del resalto hidráulico.

$$L_{sh} = 6(y_2 - y_1)$$

Posteriormente se utiliza la ecuación del resalto hidráulico con pendiente.

$$y_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8G_1^2} - 1 \right) y_1$$

$$G = \frac{Fr_1}{1 - \frac{KL_{sh} \text{sen}(\theta)}{y_2 - y_1}}$$

Hasta que el y_2 propuesto sea aproximadamente igual al y_2 calculado con la ecuación de resalto hidráulico con pendiente.

$$G = \frac{1.87}{\sqrt{1 - \frac{(1.2)(0.624 \text{ m}) \text{sen}(1.26)}{0.22 \text{ m} - 0.096 \text{ m}}}} = 1.99$$

$$y_2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8(1.999)^2} - 1 \right) 0.096 \text{ m} = 0.22 \text{ m}$$

Ubicación de la compuerta

Para una compuerta plana vertical, el coeficiente C_d esta en función de la relación $\frac{y_1}{a}$, en un rango de 0.55 hasta 0.60. Con una abertura de la compuerta.

Se obtiene el primer tirante antes de la compuerta plana rectangular con la siguiente fórmula.

$$y_1 = \frac{Q^2}{C_d^2 b^2 a^2 2g}$$

$$y_1 = \frac{\left(0.1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)^2}{(0.58 \text{ m})^2 (0.6 \text{ m})^2 (0.08 \text{ m})^2 \left(19.62 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 0.657 \text{ m}$$

Para obtener los tirantes y longitud del flujo gradualmente variado S1 se utilizó el programa de visual Basic donde el primer tirante es y_2 del resalto hidráulico y el último tirante es el primer tirante antes de la compuerta, y_1 .

SEGUNDA PARTE DEL CANAL CON PENDIENTE SUAVE.

Debido al cambio de flujo supercrítico a subcrítico dado por la pendiente pronunciada a suave se produce un resalto hidráulico. Para conocer en cuál de las pendientes se establecerá se obtiene la longitud de la energía específica con la siguiente fórmula:

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

$$E = 0.096 + \frac{(1.1) \left(0.1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)^2}{19.62 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0.265 \text{ m}$$

A continuación, se obtiene el tirante conjugado supercrítico a partir de la fórmula de la energía específica.

$$E = y + \frac{\alpha q^2}{2gy^2}$$

$$y^3 - 0.265y^2 + 0.0015636 = 0$$

$$y'_1 = -0.0685$$

$$y'_1 = 0.0963$$

$$y'_1 = 0.2372$$

Longitud del salto hidráulico

$$L_{sh} = 6(y_2 - y_1)$$

$$L_{sh} = 6(0.21\text{m} - 0.096 \text{ m}) = 0.70 \text{ m}$$

Ubicación de la compuerta

Se obtiene el primer tirante antes de la compuerta con la siguiente fórmula.

$$y_1 = \frac{Q^2}{Cd^2b^2a^22g}$$
$$y_1 = \frac{\left(0.1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)^2}{(0.58 \text{ m})^2(0.6\text{m})^2(0.12 \text{ m})^2 \left(19.62 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 0.292 \text{ m}$$

Para obtener los tirantes y longitud del flujo gradualmente variado M1 se utilizó el programa de visual Basic donde el primer tirante es y_2 del resalto hidráulico y el último tirante es el primer tirante antes de la compuerta, y_1 .

TERCERA PARTE DEL CANAL CON PENDIENTE SUAVE

Tirantes del flujo gradualmente variado M3

En la tercera y última parte del canal primero se calcula los Tirantes y del flujo gradualmente variado M3.

Se obtiene el primer tirante del flujo gradualmente variado M3.

$$y_1 = y_{vc}$$

$y_{vc} = 90\%$ de la apertura de la compuerta en flujo supercrítico y se localiza a una distancia igual a la apertura de la compuerta a partir de la compuerta.

$$y_{vc} = (0.12 \text{ m})(0.9) = 0.10 \text{ m}$$

Se obtiene el segundo tirante del flujo gradualmente variado M3.

$$y_2 < y_c$$

$$y_2 = (0.146 \text{ m})(0.99) = 0.144 \text{ m}$$

Para obtener los tirantes y longitud del flujo gradualmente variado del perfil M3 se utiliza el programa de visual Basic donde el primer tirante es y_{vc} y el último tirante es $y_2 < y_c$.

Longitud del salto hidráulico con la siguiente fórmula.

El salto hidráulico se obtiene después del último tirante del flujo gradualmente variado con perfil M3, dado que para obtener los tirantes y longitud del flujo gradualmente variado M2 se consideró como primer tirante, y_1 en seguida de la compuerta, se calcula la longitud del resalto hidráulico y el resultado se compara con los tirantes obtenidos del perfil M2, cuando el tirante del resalto hidráulico y uno de los tirantes del perfil M2 se igualan, a ese tirante le se considera como primer tirante del perfil M2 y por lo tanto la longitud del mismo cambia.

Se obtiene la longitud del salto hidráulico con la siguiente fórmula.

$$L_{sh} = 6(y_2 - y_1)$$

Tirantes del flujo gradualmente variado M2

Se calculan los tirantes del flujo gradualmente variado M2 a descarga libre, para ello se determina la distancia del tirante crítico al final del canal con la siguiente relación.

$$y_c = 3.5y_c = 0.5 \text{ m.}$$

Se obtiene el primer tirante del flujo gradualmente variado M2 el cual tendrá un valor de 1% más que el tirante crítico.

$$y_1 = 1\%y_c + y_c$$

$$y_1 = 1\%0.146 + 0.146 = 0.147 \text{ m}$$

Flujo gradualmente variado M2 en seguida de la compuerta,

$$y_2 = 0.203$$

Para obtener los tirantes y longitud del flujo gradualmente variado M2 se utilizó el programa de visual Basic donde el primer tirante es y_1 en seguida de la compuerta y el último tirante es 1% más que el tirante crítico.

Volumen de obra

Especificaciones para el volumen de obra	
Espesor	0.15 m
Longitud	115 m
Varilla	3/8" calibre 3

Tabla 7: especificaciones para el volumen de obra.

Se obtiene el perímetro total del canal

$$P_c = 2H + b + 2(e)$$

$$P_c = 2(1\text{m}) + 0.6 \text{ m} + 2(0.15 \text{ m}) = 2.90 \text{ m}$$

Se calcula el volumen de obra con la siguiente ecuación:

$$V_0 = P_c \cdot e \cdot L_c$$

Donde

P_c = Perímetro del canal

e = Espesor

L_c = Longitud del canal

$$V_0 = (118.5 \text{ m})(0.15)(115 \text{ m}) = 118.5 \text{ m}^3$$

Concreto para muros impermeables de alta resistencia (Tipo D)	Resistencia = $210 \text{ Kg}_f/\text{cm}^2$
Volumen de obra en %	Tipo de material
15.19	Cemento
45.55	Grava
30.37	Arena
8.89	Agua

Tabla 8: Cantidad de materiales para calcular el volumen de obra de alta resistencia (Tipo D).

Cantidad de material a utilizar

Volumen de obra m^3	Tipo de material
18	Cemento
59.98	Grava
35.99	Arena
10.53	Agua

Tabla 9: Cantidad de materiales calculados para la obra con alta resistencia (Tipo D). Elaboración propia

Cantidad de mallas de rollos de 100 m^2 a utilizar.

$$A_{\text{malla}} = P_c \cdot L_c$$

$$A_{\text{malla}} = (2.90 \text{ m})(115 \text{ m}) = 333.5 \text{ m}^2$$

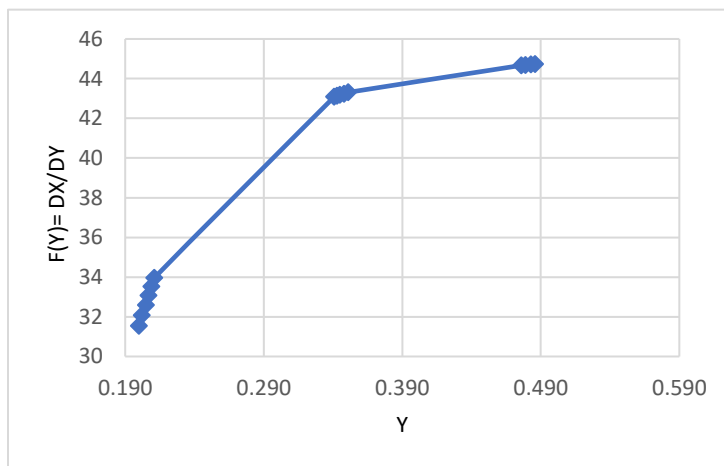
$$\frac{333.5 \text{ m}^2}{100 \text{ m}^2} = 3.335 \text{ m}^2 \text{ de rollos de malla.}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primera parte del canal con flujo supercrítico.

En la primera parte el canal debe de tener una pendiente pronunciada para que exista un flujo supercrítico de tal forma que a prueba y error a la pendiente S_{01} , se le dio un valor de 0.0022 lo que permitió obtener un tirante de 0.096 m en flujo uniforme por una longitud de 5 m. De ahí se inicia el primer resalto hidráulico; $y_1 = 0.096 \text{ m}$ a un tirante $y_2 = 0.20 \text{ m}$ con una longitud del salto hidráulico entre esos dos tirantes de 0.62 m que posteriormente a partir del segundo tirante del resalto hidráulico se inicia un flujo gradualmente variado S1 con un tirante inicial de 0.20 m hasta un tirante final de 0.657 m, con una longitud total entre esos dos tirantes de 20 m donde en este punto final se encuentra una compuerta semiabierta con una abertura de 0.08 m. después del paso del flujo en la primera compuerta el tirante normal volvió a tener 0.096 m por un largo de 28.72 m y es seguida hubo un cambio de pendiente.

y (m)	Fy (m)
0.200	31.54
0.202	32.08
0.205	32.59
0.207	33.07
0.209	33.53
0.211	33.96
0.341	43.09
0.343	43.14
0.345	43.19
0.348	43.24
0.351	43.31
0.476	44.67
0.479	44.69
0.483	44.71
0.486	44.73



Grafica 1 grafica 1: distribución de los tirantes del flujo gradualmente variado S1.

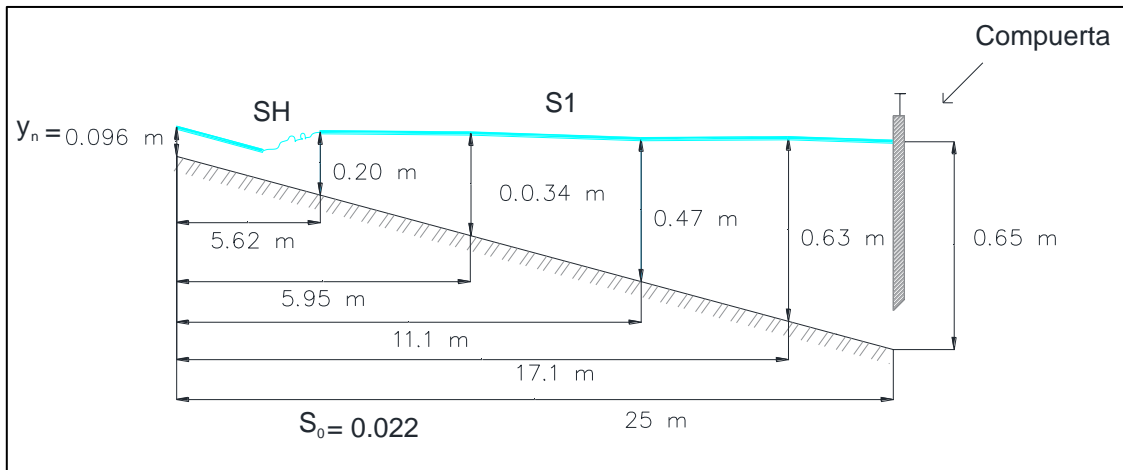


Ilustración 8: tirantes y longitud total del perfil del flujo S1.

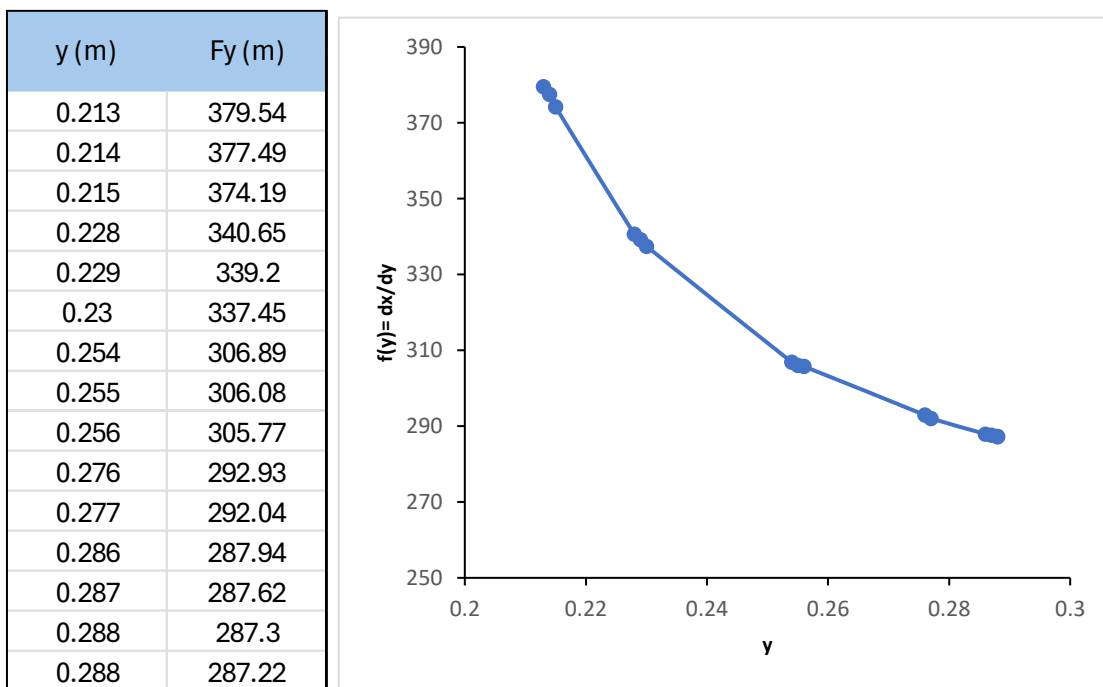
Segunda etapa del canal con pendiente suave

En la segunda parte el canal se consideró una pendiente suave y a prueba y error a la pendiente S_{02} se le dio un valor de 0.004, en donde podría existir un resalto hidráulico y un flujo gradualmente variado M1 dado que hay un cambio de pendiente de pronunciada a suave la incógnita fue saber en cuál de las dos pendientes se establecerá el resalto hidráulico. Para ello se obtiene el tirante conjugado del supercrítico (que es el tirante subcrítico, cuya característica es que tiene la misma energía). Se obtiene el valor total de la energía específica del flujo con su gasto unitario para formar una ecuación cúbica que al resolverla nos va a dar tres resultados, uno negativo que se descarta y se escoge el valor mayor de los resultados positivos el cual es el tirante alternativo del tirante supercrítico de la pendiente pronunciada. Si el segundo tirante del resalto hidráulico es mayor que el tirante alternativo de este flujo con pendiente pronunciada, el resalto hidráulico se presentará en esta pendiente de lo contrario se establecerá en la pendiente suave.

Para poder saber lo anterior se utiliza el tirante del flujo uniforme igual a 0.096 m (es el mismo tirante que se obtuvo al comienzo del canal), donde su energía específica del flujo que es de 0.266 m. Se obtuvo el segundo tirante del resalto hidráulico $y_2 = 0.238$ el tirante alternativo, $y'_1 = 0.237$ m y se cumple la condición;

$y_2 < y'_1$, que indica que el salto se establecerá en la pendiente suave y exactamente se inicia en el cambio de pendiente.

La longitud del resalto hidráulico es de 0.7 m y a partir del segundo tirante del resalto hidráulico se inicia un flujo gradualmente variado M1 con un tirante inicial de 0.213 m, hasta un tirante final de 0.29 m, de 24.3 m de longitud donde va a existir cierto número de tirantes que varían gradualmente. El ultimo tirante del flujo gradualmente variado se encuentra atrás de una compuerta con una abertura de 0.12 m.



Grafica 2: distribución de los tirantes del flujo gradualmente variado M1.

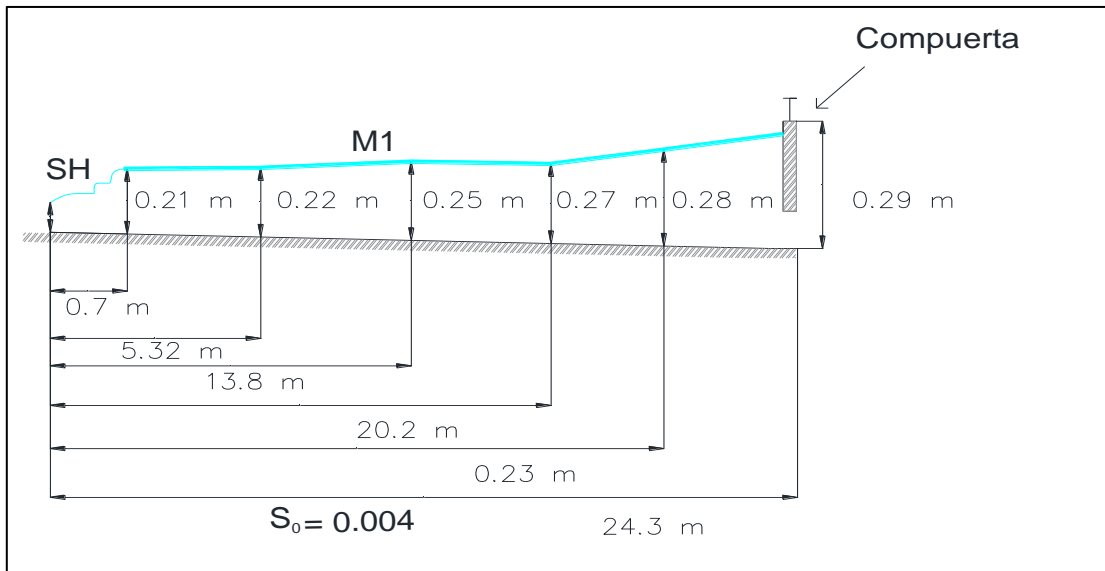
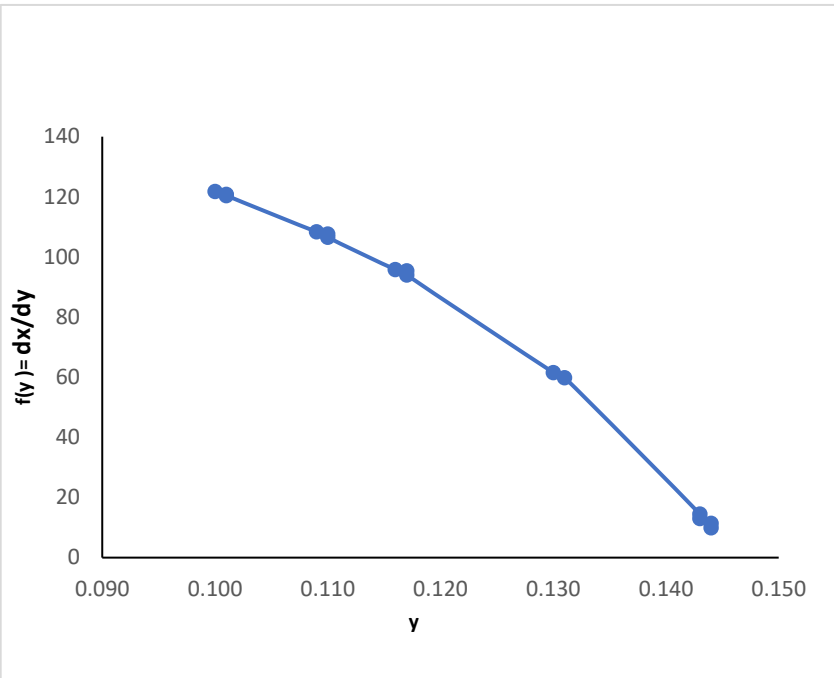


Ilustración 9: tirantes y longitud total del perfil del flujo M1.

Tercera etapa del canal con pendiente suave

En un principio se proponía diseñar un canal con dos pendientes, una pronunciada y la otra suave, pero después de la segunda compuerta se intentó formar un resalto hidráulico a prueba y error pero no fue posible dada la longitud restante, por lo que después de la compuerta se tuvo que cambiar la pendiente del canal y utilizando diferentes pendientes a prueba y error logramos obtener el resalto hidráulico con una pendiente suave deseado que posterior a él se formó un flujo gradualmente variado M2 a descarga libre. La pendiente suave $S_{03} = 0.0024$. A una distancia de $3.5 y_c$ del final del canal se va a localizar el tirante crítico, de 0.146 m. Tomando en cuenta lo anterior el primer tirante del flujo gradualmente variado M2 tendrá un valor de 1% de más que el tirante crítico y el último tirante estará en seguida de la compuerta como primer intento. Después de la vena contracta se formará un flujo gradualmente variado M3 y su primer tirante será de profundidad de la vena contracta hasta un tirante igual al 99% del tirante crítico. Proponiendo tirantes del M3 como el primer tirante del resalto hidráulico se obtenía el segundo tirante del resalto y tomando en cuenta la longitud del resalto se ubica el segundo tirante en el canal y se compara con el tirante que corresponde del flujo M2, si son diferentes se vuelve a buscar otro tirante del M2 y se repite la operación hasta que coincida aproximadamente el segundo tirante del resalto con el tirante respectivo del M2, con la finalidad de ubicar el resalto hidráulico.

y (m)	Fy (m)
0.100	121.81
0.101	120.85
0.101	120.44
0.109	108.37
0.110	107.64
0.110	106.54
0.116	95.83
0.117	95.39
0.117	94.05
0.130	61.59
0.131	59.92
0.143	14.53
0.143	13.021
0.144	11.49
0.144	9.94



Grafica 3: distribución de los tirantes del flujo gradualmente variado M3.

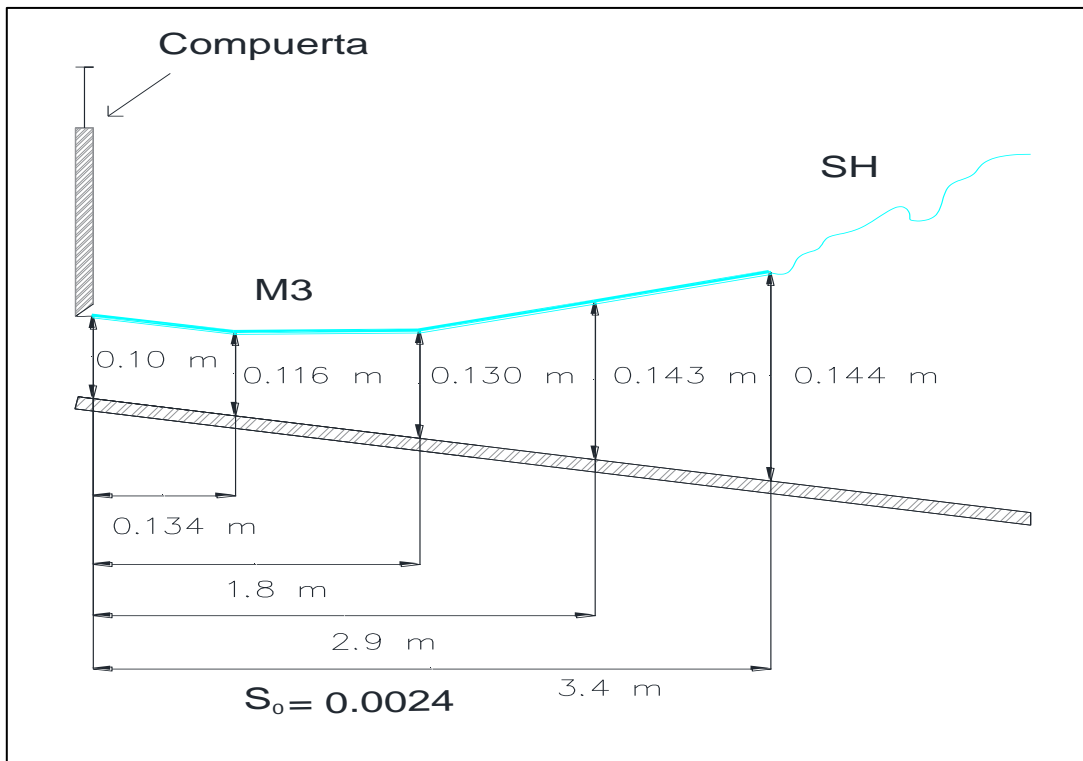
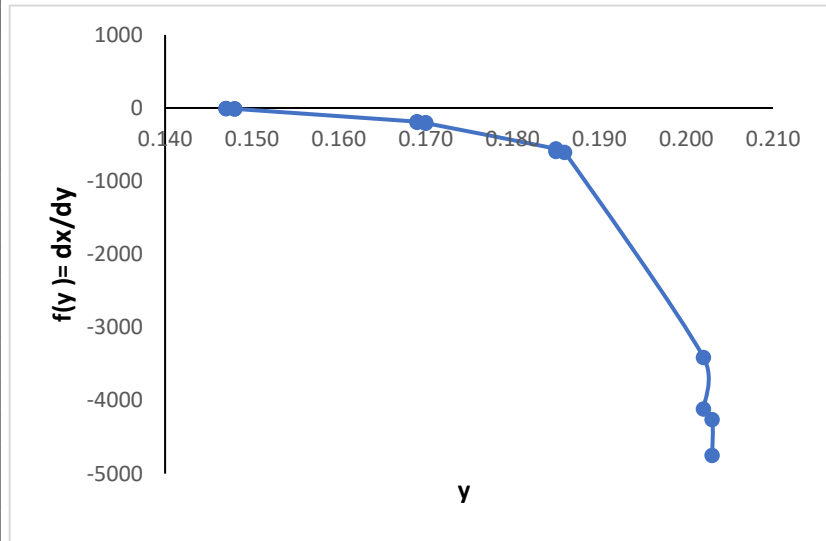


Ilustración 10: tirantes y longitud total del perfil del flujo M3.

y (m)	Fy (m)
0.150	-20.39
0.149	-17.96
0.149	-12.46
0.203	-4749.76
0.202	-4113.61
0.202	3410.34
0.186	-604.35
0.185	-586.05
0.184	-546.000
0.17	-206.05
0.169	-198.08
0.169	-186.58
0.148	-11.69
0.148	-7.89
0.147	-4.93



Grafica 4: distribución de los tirantes del flujo gradualmente variado M2.

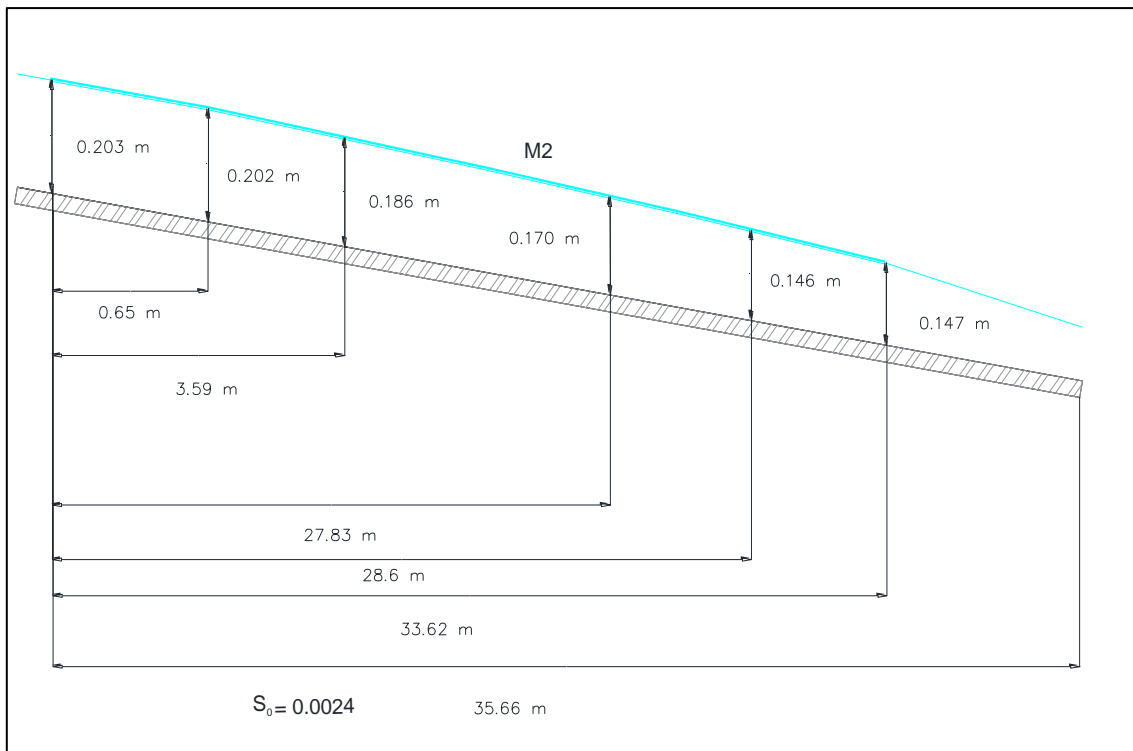


Ilustración 11: tirantes y longitud total del perfil del flujo M2.

CONCLUSIONES

El canal que fue diseñado en este trabajo va a ser la tercera y última etapa del jardín hidráulico, para concluir el proyecto íntegramente, y poder realizar todas las prácticas de la materia de hidráulica I, hidráulica II, equipos y sistemas de abastecimiento de agua, automatización de sistemas de riego, canales y obras hidráulicas. Lo que permitirá a los alumnos llevar a la práctica todo el aspecto teórico de las materias mencionadas.

En la tercera parte del jardín hidráulico se podrán hacer prácticas del flujo gradual y bruscamente variado en un canal rectangular ya que generalmente el resalto hidráulico se produce en el mundo real, cuando en una presa se vierte el exceso de agua en un vertedor de demasías debido a lluvias intensas generalmente provocado por un ciclón o fenómenos atípicos, en donde el agua vertida forma un resalto hidráulico en un canal rectangular conocido como colchón de amortiguamiento por ello el canal tuvo la forma de un rectángulo y por lo general en los canales trapeciales cuando hay un cambio de él debido a una contracción o ensanchamiento en la transición de este cambio el canal es rectangular para volver hacer trapecial.

La teoría del flujo gradualmente variado en donde el tirante puede ir aumentando lentamente debido a que aguas abajo se encuentra una compuerta semiabierta que frena al flujo y la velocidad del canal va disminuyendo paulatinamente y eso permite que el tirante vaya aumentando gradualmente a medida que el flujo avance, por lo que el estudio del flujo gradualmente variado permite prevenir el desbordamiento de agua por la corona del canal.

Al contrario, en un flujo gradualmente variado acelerado, el tirante del flujo va disminuyendo lentamente y la velocidad aumenta progresivamente a medida que el flujo avance.

Para que ocurra un resalto hidráulico en el flujo de un canal su corriente debe de pasar de supercrítico a subcrítico

La teoría del resalto hidráulico sobre todo en canales rectangulares con pendiente o sin pendiente nos permite determinar los tirantes que tiene este tipo de flujo para calcular la altura de la corona que evite fugas del agua por desbordamiento.

LITERATURA CITADA

Castellanos, Hermes E, Collazos, Carlos A, Farfan, Javier C, & Meléndez-Pertuz, Farid. (2017). Design and Construction of a Hydraulic Channel of Variable Slope. *Información tecnológica*, 28(6), 103-114. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000600012>. consultado el 16/mayo/2024.

González Espino, David. (2020). Modelo hidráulico virreinal utilizado en el centro histórico de Lima para abastecimiento de agua (*). *Devenir*, 7(14), 91-106. <https://dx.doi.org/10.21754/devenir.v7i14.811>. Consultado el 21/mayo/2024.

Calixto, n, GALLARDO AMAYA, R y Guerrero Gómez, G. (2022). *Hidráulica de canales análisis del flujo uniforme y flujo gradualmente variado*. Bogotá - Ecoe Ediciones S.A.S.. <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/6724>. Consultado el 01/junio /2024.

Calixto, n, GALLARDO AMAYA, R y Guerrero Gómez, G. (2022). *Hidráulica De Canales Principios Fundamentales*. Bogotá-Ediciones Nueva Jurídica. https://repositorio.ufps.edu.co/bitstream/handle/ufps/6733/Hidraulica%20de%20Canales_Principios%20Fundamentales_ebook%20%281%29.pdf?sequence=1&isAllo wed=y. Consultado el 03/junio /2024.

Manrique Andrade, V. A. (2013). *Comportamiento del resalto hidráulico en canales con pendiente y sección rectangular* (Doctoral dissertation). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52033>. Consultado el 26/ mayo /2024.

Ruíz, P. R. (2008). *Hidráulica de canales*. 8 p.

Sotelo, A.G. 1998. *Hidráulica II. Apuntes*. División de ingeniería, Civil, Topografía y Geodésica. Departamento de Hidráulica. Universidad Nacional Autónoma de México. 182 p.

Sotelo, A.G. 1974. *Hidráulica general. Volumen I. Primera edición*. Ed. Limusa, México.

Ávila, G. S. (2002). *Hidráulica de canales*. México. UNAM, facultad de ingeniería. 91 p.

French, H. R. Hidráulica de canales abiertos. Primera edición.

Armijos, P. G. (2018). Diseño de canales abiertos.

Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Editorial Nomos S. A. Colombia. 213 p.

Béjar, M. V. (2008). Hidráulica de canales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 18 p.

Chanson, h. (2002). Hidráulica del flujo en canales abiertos. (E. A. h., Ed.) Bogotá Colombia.

Silber, R. (1972). Hidráulica del régimen permanente en canales y ríos. Madrid: edición española.

APÉNDICE A

Ecuación diferencial dinámica del flujo gradualmente variado.

En el perfil de un flujo gradualmente variado, se considera un diferencial de longitud de canal a su largo que es dx , tal como dice la ilustración 12. En donde la energía específica del flujo H es la energía que la corriente tiene por unidad de peso de fluido, medida a partir de un nivel de referencia horizontal, donde H es una distancia vertical.

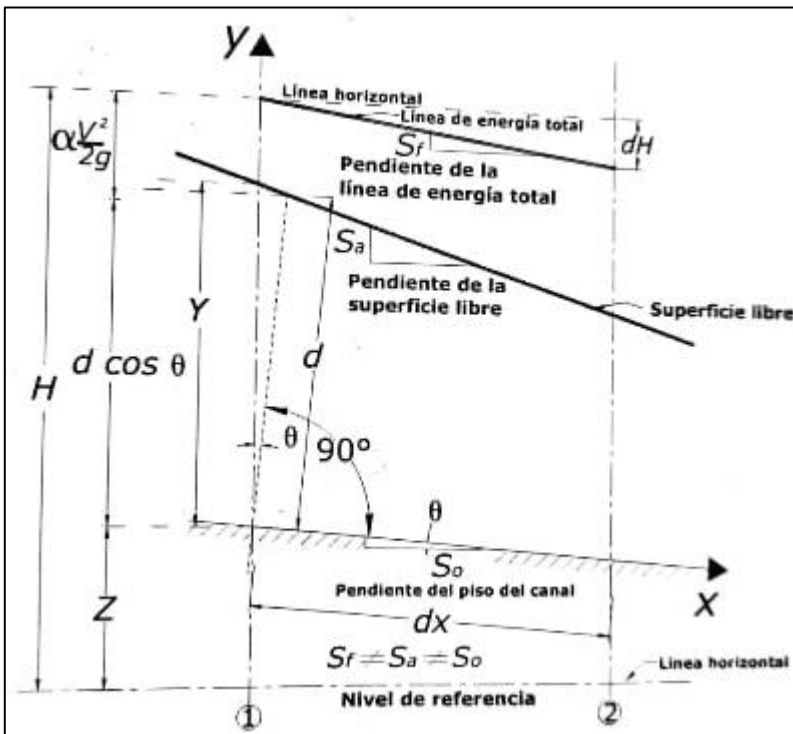


Ilustración 12: diferencial de longitud del en un canal. Chow (1994)

Los tres términos que sumados constituyen H (según la ilustración 12) son los siguientes.

$$H = Z + d \cos \theta + \alpha \frac{\bar{V}^2}{2g} \tag{1.1}$$

Al derivar la ecuación 1.1 con respecto a x , se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dZ}{dx} + \cos \theta \frac{dd}{dx} + \alpha \frac{d}{dx} \left(\frac{\bar{V}^2}{2g} \right) \tag{1.2}$$

Donde:

$$\frac{dH}{dx} = -s_f \quad 1.3$$

$$\frac{dZ}{dx} = -s_0 \quad 1.4$$

En la cual s_f es la pendiente de la línea de energía total y s_0 es la pendiente del piso del canal a su largo. Las dos derivadas dan términos negativos (s_f y s_0) porque pierden altura a medida que aumenta x o a medida que el flujo avanza (según la ilustración 12).

Si se sustituyen las ecuaciones 2.3 y 2.4 en la ecuación 2.2, se tiene la siguiente ecuación:

$$-s_f = -s_0 + \cos\theta \frac{dd}{dx} + \alpha \frac{d}{dx} \left(\frac{\bar{V}^2}{2g} \right) \quad 1.5$$

Como no existe una ecuación directa que relacione los cambios de velocidad media del flujo V en función de la distancia a lo largo del canal, x y sin embargo se sabe que existe una relación matemática de la velocidad media del flujo V en función del tirante; dd por lo tanto habrá que cambiar la derivada por la carga por velocidad $\frac{V^2}{2g}$ con respecto a dx a la derivada de la carga por velocidad con respecto a dd . Por esta razón la ecuación 1.5 se multiplica por $\frac{dx}{dd}$ para obtener la ecuación deseada:

$$-\frac{dx}{dd} s_f = -\frac{dx}{dd} s_0 + \cos\theta + \alpha \frac{d}{dd} \left(\frac{\bar{V}^2}{2g} \right) \quad 1.6$$

Al factorizar $\frac{dx}{dd}$ en la ecuación 1.6, se tiene:

$$\frac{dx}{dd} (s_0 - s_f) = \cos\theta + \alpha \frac{d}{dd} \left(\frac{\bar{V}^2}{2g} \right) \quad 1.7$$

Si se despeja $\frac{dx}{dd}$ de la ecuación 1.7, se obtiene:

$$\frac{dx}{dd} = \frac{\cos\theta + \alpha \frac{d}{dd} \left(\frac{\bar{V}^2}{2g} \right)}{(s_0 - s_f)} \quad 1.8$$

Si se invierte la ecuación 1.8, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dx}{dd} = \frac{(s_0 - s_f)}{\cos\theta + \alpha \frac{d}{dd} \left(\frac{\bar{V}^2}{2g} \right)} \quad 1.9$$

La ecuación 1.9, es la ecuación diferencial dinámica del flujo gradualmente variado. Una de las condiciones del flujo gradualmente variado, es que el ángulo θ de la pendiente del canal sea pequeño, esto implica que el $\cos \theta \approx 1$ y por lo tanto el tirante del flujo perpendicular al piso del canal d es aproximadamente igual al tirante vertical y ($d \cong y$); por lo cual la ecuación 1.9 se puede transformar en lo que sigue:

$$\frac{dx}{dd} = \frac{(s_0 - s_f)}{1 + \alpha \frac{d}{dy} \left(\frac{\bar{V}^2}{2g} \right)} \quad 1.10$$

APÉNDICE B

Integración de la ecuación diferencial dinámica del flujo gradualmente variado.

Para cuantificar los tirantes del perfil del flujo gradualmente variado, tomado en cuenta la ubicación de cada tirante a lo largo del flujo, es necesario integrar la ecuación diferencial dinámica del flujo gradualmente variado (ecuación 1.9 o 1.10). Esta ecuación diferencial es casi imposible de integrarse con una ecuación directa, tal como se muestra en la siguiente expresión (Chow, 1959).

$$y = \int \left[\frac{\delta_o - \delta_f}{1 + \alpha \frac{d}{dy} \left(\frac{v^2}{2g} \right)} \right] dx \quad 1.12$$

Las ecuaciones 1.9 y 1.10 son ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, no lineal, donde y es una función de x . Debido a que no existe alguna relación directa matemática del tirante y y la distancia longitudinal x para todas las formas de secciones transversales que tienen los canales, se tiene que integrar por métodos numéricos, que son integrales aproximadas donde está presente cierto error, existen varios métodos para integrar la ecuación diferencial dinámica, pero es el método que se emplea en este proyecto, es la integración numérica con la regla del trapecio, que es el que más se acopla para resolver la ecuación diferencia 1.9 o 1.10.

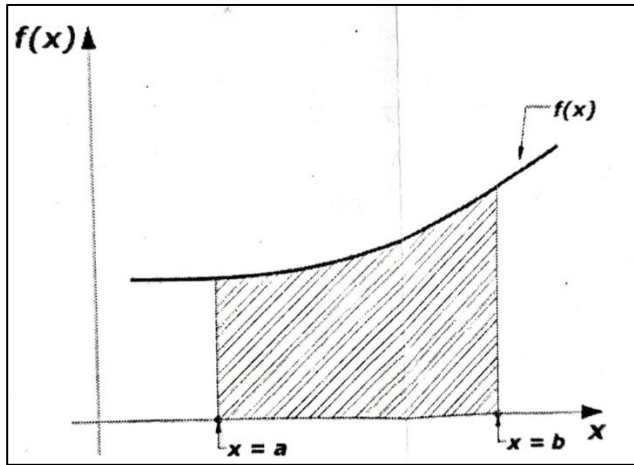


Ilustración 13: área sombreada de la superficie que cuantifica la integral. Chow, 1959

La solución de la integral con límites viene a ser el área bajo la curva que se encuentra entre los límites de la integral. Tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$\int_{x=a}^{x=b} f(x)dx = A \quad 1.13$$

La ecuación 1.13 es el área bajo la curva de la ilustración13.

si se tiene un canal con flujo gradualmente variado (puede ser cualquiera de los doce perfiles del flujo gradualmente variado), tal como lo muestra la ilustración13 donde se conoce la magnitud de los tirantes y_1 y y_2 y la ubicación de la profundidad del flujo y_1 , con respecto al punto 0, y se desea conocer la distancia que los separa Δx . Lo anterior se puede lograr de la siguiente manera (ver la ecuación 1.14).

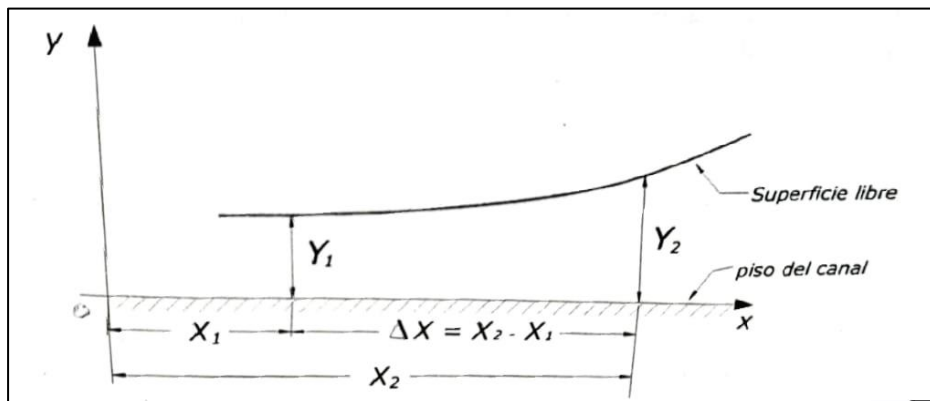


Ilustración 14: se tiene un perfil de flujo gradualmente variado, donde la distancia x , inicia en el cruce de los ejes Chow, 1959.

$$\Delta x = x_1 - x_2 = \int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{y_1}^{y_2} \frac{dx}{dy} dy \quad 1.14$$

$$\frac{dx}{dy} dy = f(y) dy \quad 1.16$$

$$\int_{y_1}^{y_2} f(y) dy = \Delta x \quad 1.17$$

La ecuación 1.17, viene a ser el área bajo la curva de la función $f(y)$ tal como se muestra en la ilustración 16.

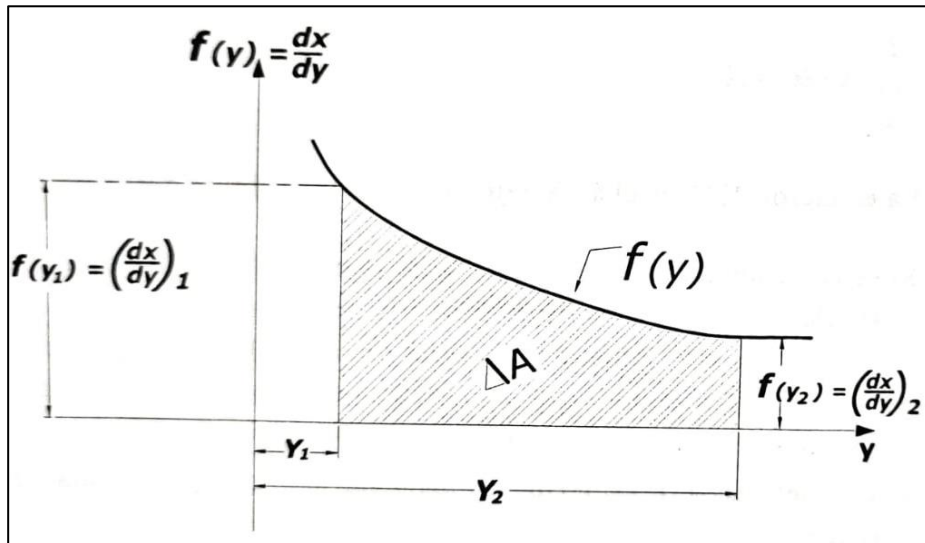


Ilustración 15: el área sombreada es igual a ΔA . Chow, 1959

El incremento del área ΔA (que es el área bajo la curva de la función $f(y)$) es igual a:

$$\Delta A = \Delta x \quad 1.18$$

La ecuación 1.10 es igual a $f(y)$, tal como se ilustra en la siguiente expresión:

$$\frac{dx}{dd} = \frac{(s_0 - s_f)}{1 + \alpha \frac{d}{dy} \left(\frac{\bar{v}^2}{2g} \right)} = f(y) \quad 1.19$$

Para poder graficar la ecuación 1.19, se deben calcular las magnitudes de la pendiente de la línea de energía total s_f y de la derivada de la carga por velocidad

$\frac{d}{dy} \left(\frac{\bar{v}^2}{2g} \right)$ estas dos variables están en función del tirante) y la pendiente del canal s_0 , es un dato previamente conocido.

La pendiente de la línea de energía total s_f , se puede obtener de la ecuación del flujo uniforme, tal como nos indica una de las hipótesis del flujo gradualmente variado, para ello es Δx que es la longitud del canal que separa los dos tirantes (ver figura 1.21), debe de ser lo más reducido posible, de una manera tal que $y_1 \approx y_2$, por lo tanto, se puede suponer que si el Δx es una longitud muy pequeña, el flujo en ese tramo tiende a ser uniforme. La ecuación de Manning, que es una fórmula para el flujo uniforme, se presenta a continuación:

$$Q = \frac{A}{n} Rh^{\frac{2}{3}} \delta_0^{\frac{1}{2}} \quad 1.20$$

Donde Q es el caudal en $\frac{m^3}{s}$, A es el área de la sección transversa por donde pasa el flujo en m^2 , Rh es el radio hidráulico en m , s_0 es la pendiente del canal a su largo (adimensional), y por último n es el coeficiente de rugosidad de Ganguillet y Kutter empleado por Manning que se considera adimensional, una de las características del flujo uniforme es que:

$$s_f = s_0 \quad 1.21$$

Al sustituir la ecuación 1.21 en la ecuación 1.20, se tiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{A}{n} Rh^{\frac{2}{3}} \delta_f^{\frac{1}{2}} \quad 1.22$$

Al despejar δ_f de la ecuación 1.22:

$$\delta_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 Rh^{\frac{4}{3}}} \quad 1.23$$

$$\delta_f = \left[\frac{nQ^2}{A} \right] \left[\frac{1}{Rh} \right]^{\frac{4}{3}} \quad 1.24$$

Con las ecuaciones 1.23 o las 1.24 se determina δ_f .

Las constantes se pueden extraer de una derivada, tal como se observa en la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dy} \left[\frac{V^2}{2g} \right] = \frac{1}{2g} \frac{d}{dy} (V^2) \quad 1.25$$

De la ecuación de continuidad:

$$V = \frac{Q}{A} \quad 1.26$$

Al sustituir la ecuación 1.26 en la ecuación 1.25, se tiene lo siguiente:

$$\frac{1}{2g} \frac{d}{dy} \left(\frac{Q^2}{A^2} \right) \quad 1.27$$

Si el gasto es una constante por ser flujo permanente, se puede extraer la derivada de la ecuación 1.27, tal como lo señala la siguiente expresión que es igual a la derivada de la carga por velocidad:

$$\frac{Q^2}{2g} \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{A^2} \right) = \frac{d}{dy} \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad 1.28$$

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{1}{A^2} \right) = \frac{A^2(0) - 1(2A) \frac{dA}{dy}}{(A^2)^2} = \frac{2 \left(\frac{dA}{dy} \right)}{A^3} \quad 1.29$$

Si T es el ancho de la superficie del agua del flujo de un canal, se tiene la siguiente ecuación no importado la forma de la sección:

$$\frac{dA}{dy} = T \quad 1.30$$

Al sustituir la ecuación 1.30 en la ecuación 1.29, se llega a la siguiente fórmula:

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{1}{A^2} \right) = - \frac{2T}{A^3} \quad 1.31$$

Al sustituir la ecuación 1.31 en la ecuación 128:

$$\frac{Q^2}{2g} \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{A^3} \right) = \frac{Q^2 T}{A^3} \quad 1.32$$

Por lo tanto:

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{V^2}{2g} \right) = - \frac{Q^2 T}{g A^3} \quad 1.33$$

Como se observa en la ecuación 1.33, determina la carga por velocidad.

Si se sustituye las ecuaciones 1.24 y 1.33 en la ecuación 1.29, se tiene la próxima expresión matemática:

$$\frac{d}{dy} = \frac{\delta_0 - \left(\frac{nQ}{A} \right)^2 \left(\frac{1}{Rh} \right)^{\frac{4}{3}}}{1 - \frac{\alpha Q^2 T}{g A^3}} = f(y) \quad 1.34$$

El número de Froude Fr , es un número adimensional que nos indica si es flujo es crítico o supercrítico, su ecuación es la siguiente:

$$Fr = Q \sqrt{\frac{\alpha T}{g A^3}} \quad 1.35$$

Si $Fr = 1$ el flujo es crítico; si $Fr < 1$ el flujo es subcrítico; y si $Fr > 1$ el flujo es supercrítico.

Por lo tanto:

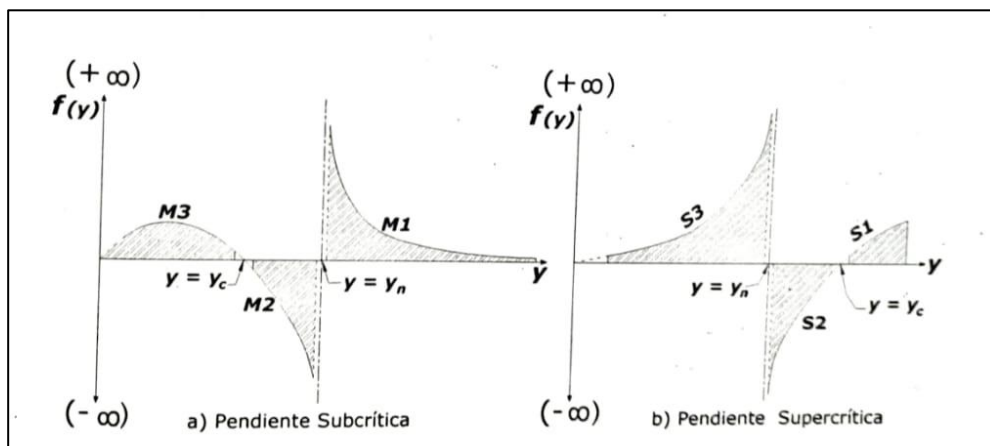


Ilustración 16: Curvas que relaciona $f(y)$ vs y para diferentes perfiles M y S. Sotelo (1986)

$$Fr^2 = \frac{\alpha Q^2 T}{g A^3} \quad 1.36$$

Al sustituir las ecuaciones 1.24 y 1.25 en la ecuación 1.34, se tiene la siguiente expresión:

$$f(y) = \frac{dy}{dx} = \frac{\delta_0 - \delta_f}{1 - Fr^2} \quad 1.37$$

Si se gráfica la ecuación 1.34 o 1.37, al darle valores a la variable independiente que es el tirante y , para evaluar la variable dependiente que es $f(y) = dy/dx$, se obtiene las siguientes graficas para el flujo tipo M y S tal como se muestra en la figura. En estas gráficas el área bajo la curva de cada tipo de flujo (M1, M2, M3, S1, S2, S3), es la longitud del canal en el primero y último.

Como se observa en la ilustración 16, los perfiles del flujo gradualmente variado M1, M3, S1, S3, la variable $f(y) = dy/dx$ es positiva (por ser flujo gradualmente variado frenado), esto ocurre en todos los flujos tipo 1 y 3. En los perfiles M2 y S2 la variable $f(y) = dy/dx$ es negativa (por ser flujos gradualmente variado acelerado), esto ocurre en todos los flujos tipo 2.

Ilustración 19 se muestra un diagrama de flujo, del programa que se utiliza para emplear la integración numérica, con la regla del trapecio, para el cálculo de los tirantes del flujo gradualmente variado.

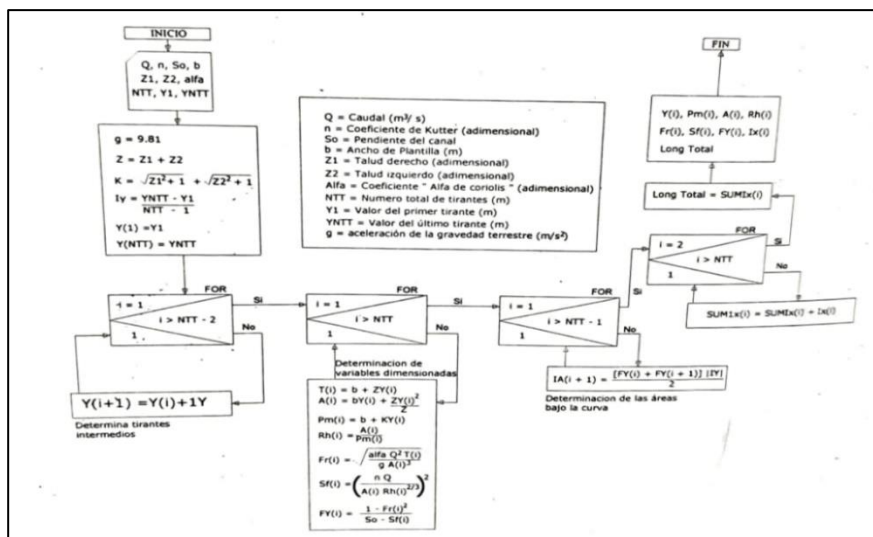


Ilustración 17: diagrama de flujo para el cálculo de los tirantes del flujo gradualmente variado, al emplear la solución de la integración numérica con la regla del trapecio, para cualquier perfil del flujo. Chow (1994)

APÉNDICE C

Codificación del programa de Microsoft Visual Basic 6.0, para el cálculo de tirantes del flujo gradualmente variado.

Dim i, NTT As integer

Dim n, Q, S₀, b, Z1, Z2, Alfa, Y1, YNTT, I Y As Variant

Dim Y(50000), T(50000), A(50000), Pm(5000), Rh(50000), Fr(50000), Sf(50000), FY(5000), IA(5000), IX(50000), SumIX(50000)

Private Sub Command1_Click()

Q = Val (text1. Text)

n = Val (text2. Text)

S₀ = Val (text3. Text)

b = Val (text4. Text)

Z1 = Val (text5. Text)

Z2 = Val (text6. Text)

Alfa = Val (text7. Text)

NTT = Val (text8. Text)

Y1 = Val (text9. Text)

YNTT = Val (text10. Text)

´Valores de las constates

g = 9.81

Z = z1 + z2

K = Sqr(z1*z1+1) + Sqr(z2*z2+1)

IY = (YNTT- Y1) / (NTT – 1)

Y (1) = Y1

Y(NTT) = YNTT

´ Determinación de los tirantes intermedios

For i = 1 To NTT – 2

Y (i + 1) = Y(i) + IY

Next i

'Determinación de variables dimensionadas

For i = 1 To NTT

$T(i) = b + Z * Y(i)$

$A(i) = b * Y(i) + Z * Y(i) * Y(i) / 2$

$Pm(i) = b + K * Y(i)$

$Rh(i) = A(i) / Pm$

$Fr(i) = \text{Sqr}(Alfa * Q * Q * T(i) / (g * A(i)^3))$

$Sf(i) = (n * Q / (A(i) * Rh(i) ^ (2/3))) ^ 2$

$FY(i) = (1 - Fr(i)) / (S_0 - Sf(i))$

Next i

For i = 1 To NTT

grid1.Rows = NTT + 1

'Alineación del arreglo de columnas en el grid

grid1.Rows = i

grid1.Col = 0

grid1.Text = Format\$(i, "0")

grid1.Rows = i

grid1.Col = 1

grid1.Text = Format\$(Y(i), "0.000")

grid1.Rows = i

grid1.Col = 2

grid1.Text = Format\$(Pm(i), "0.000")

grid1.Rows = i

grid1.Col = 3

grid1.Text = Format\$(A(i), "0.000")

grid1.Rows = i

grid1.Col = 4

grid1.Text = Format\$(Rh(i), "0.000")

```

grid1.Rows = i
grid1.Col = 5
grid1.Text = Format$(Fr (i), "0.000")
grid1.Rows = i
grid1.Col = 6
grid1.Text = Format$((Sf (i)), "0.000000000")
grid1.Rows = i
grid1.Col = 7
grid1.Text = Format$(FY (i), "0.000")
Next i

```

‘Determinación de las áreas de la función, para poder integrar numéricamente

```

For i = 1 To NTT - 1
IA (I + 1) = (FY (i) + FY (i + 1))*Abs (IY) / 2
Next i

```

```

For i = 2 To NTT
IX (i) = IA (i)
grid1.Rows = i
grid1.Col = 8
grid1.Text = Format$(Ix (i), "0.000")
Next i

```

‘Determinación de las áreas acumuladas i la suma de todas las áreas,
‘para la integración numérica total

```

For i = 2 To NTT
SumIX(i) = SumIX(i - 1) + IX(i)
grid1.Rows = i
grid1.Col = 9
grid1.Text = Format$(SumIX (i), "0.000")
Next i

```

LONGTOTAL = SumIX (NTT)

Text11. Text = Int (Str\$(LONGTOTAL) * 1000 + 0.5)/1000

'nombres y anchos de columnas

grid1.Rows = 0

grid1.Col = 0

grid1.ColWidth(0) = 600

grid1.Row = 0

grid1.Col = 1

grid1.Text = " Tirante Y (i)"

grid1.ColWidth(1) = 1400

grid1.Rows = 0

grid1.Col = 2

grid1.Text = " Pm (i)"

grid1.ColWidth(2) = 1000

grid1.Row = 0

grid1.Col = 3

grid1.Text = " A (i)"

grid1.ColWidth(3) = 1000

grid1.Row = 0

grid1.Col = 4

grid1.Text = " Rh (i)"

grid1.ColWidth(4) = 1000

grid1.Row = 0

grid1.Col = 6

grid1.Text = " Sf (i)"

grid1.ColWidth(6) = 2000

grid1.Row = 0

grid1.Col = 7

```

grid1.Text = " FY ( i)"
grid1.ColWidth( 7 ) = 2000
grid1.Row = 0
grid1.Col = 8
grid1.Text = " IX ( i)"
grid1.ColWidth( 8 ) = 2000
grid1.Row = 0
grid1.Col = 9
grid1.Text = " IX ( i) ACUM"
grid1.ColWidth( 9 ) = 2000
End sub

Sub text2_keyPress( keyascii As Integer)
If keyascii = 13 Then
Text3. setFocus
End If
End sub

Sub text3_keyPress( keyascii As Integer)
If keyascii = 13 Then
Text4. setFocus
End If
End sub

Sub text4_keyPress( keyascii As Integer)
If keyascii = 13 Then
Text5. setFocus
End If
End sub

Sub text5_keyPress( keyascii As Integer)
If keyascii = 13 Then

```

```
Text6. setFocus
End If
End sub
Sub text6_keyPress( keyascii As Integer)
If keyascii = 13 Then
Text7. setFocus
End If
End sub
Sub text7_keyPress( keyascii As Integer)
If keyascii = 13 Then
Text8. setFocus
End If
End sub
Sub text8_keyPress( keyascii As Integer)
If keyascii = 13 Then
Text9. setFocus
End If
End sub
Sub text9_keyPress( keyascii As Integer)
If keyascii = 13 Then
Text10. setFocus
End If
End sub
Sub text10_keyPress( keyascii As Integer)
If keyascii = 13 Then
Command1. setFocus
End If
End sub9
```


APÉNDICE D

Resalto hidráulico en canales rectangulares con pendiente

Rajaratnam citado por french (1998), señala que los primeros experimentos que Bidone realizó sobre el resalto hidráulico, fue en un canal con pendiente. Lo mismo hizo Basin en 1965, Beebe y Riegel en 1917 también se encargaron del mismo caso. Según Chow (1959), David L. Yarnell inicio 1936 un amplio estudio del resalto hidráulico.

F_f = fuerza de fricción debido al peso del agua del salto hidráulico sobre el piso del canal. No debe confundirse con las fuerzas internas de fricción, del líquido al fluir.

$F_{f_{internas}}$ = son las fuerzas de fricción en el interior del líquido, por el rozamiento entre sus mismas capas cuando está fluyendo.

g = Aceleración de la gravedad terrestre ($g = 9.81 \frac{m}{s^2}$).

β_1, β_2 = coeficiente de Bossisnesq en los extremos del salto hidráulico, se van a considerar iguales y unitarios ($\beta_1 = \beta_2 = 1.0$).

V_1, V_2 = Velocidad en los extremos del salto hidráulico.

F_1, F_2 = fuerzas resultantes en los extremos del salto hidráulico, debido a la presión hidrostática.

El sistema de fuerzas que actúan sobre el resalto hidráulico inclinado, se aplica el principio de impulso y cantidad de movimiento del Newton.

$$F_1 - F_2 + W_{sh} \text{sen}(\theta) - F_f - F_{f_{internas}} = \frac{\gamma_{sho} Q}{g} (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad 2.94$$

Donde:

$F_f = 0$ (se desprecia por ser insignificante).

$F_{f_{internas}} = 0$ (se desprecia por ser insignificante).

$\beta_1 = \beta_2 = 1$ (se suponen iguales a la unidad).

$$y_1 = d_1 \cos \theta \quad ; \quad y_2 = d_2 \cos \theta$$

$$F_1 = \gamma_{h_2o} Q \left(\frac{1}{2} y_1 \right) (y_1 b) = \frac{1}{2} \gamma_{h_2o} y_1^2 b = \frac{1}{2} \gamma_{h_2o} d_1^2 \cos^2 \theta \cdot b$$

$$F_2 = \gamma_{h_2o} Q \left(\frac{1}{2} y_2 \right) d_2 b = \frac{1}{2} \gamma_{h_2o} y_2^2 b = \frac{1}{2} \gamma_{h_2o} d_2^2 \cos^2 \theta \cdot b$$

$$Q = V_1 A_2 = V_1 d_1 b$$

$$V_2 = V_1 \frac{A_2}{A_1} = V_1 \frac{d_1}{d_2}$$

$$W_{Sh} = \gamma_{sh} V_{Sh}$$

Al sustituir lo anterior en la ecuación 2.94, queda de la siguiente manera:

$$\frac{1}{2} \cos^2(\theta)(d_1^2 - d_2^2) + \frac{V_{Sh}(\theta)}{b} = \frac{n}{g} \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right) \quad 2.95$$

Si el volumen del salto hidráulico se idealiza de tal manera que la curvatura de la superficie libre del salto se suponga una línea recta ascendente y que finalmente la forma del perfil del salto llegue a ser un trapecio, cuya área es igual a la suma de las bases por la altura entre dos, y posteriormente se multiplique por un factor K que corrige lo idealizado (lo que no se va a tomar en cuenta es que existe mezcla de aire y agua en el salto hidráulico, que viene a disminuir el peso específico del agua) lo anterior se resume a la siguiente ecuación:

$$V_{SH} = \left[\frac{K(d_1 - d_2) \frac{L_{SH}}{\cos \theta}}{2} \right] b \quad 2.96$$

Lo que esta dentro del corchete es el área del perfil del salto hidráulico.

Sí se sustituye la ecuación 2.96 en la ecuación 2.95 y posteriormente se multiplica por 2, se llega a la siguiente expresión:

$$\cos^2(\theta)(d_1^2 - d_2^2) + K (d_1^2 + d_2^2) \left(\frac{L_{SH}}{\cos \theta} \right) \operatorname{sen} \theta = \frac{2V^2 d_1}{g} \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right) \quad 2.97$$

Al multiplicar la ecuación 2.97 por la expresión $1/(d_1^2 - d_2^2)$, se tiene la siguiente ecuación:

$$\cos^2(\theta) + \frac{K(d_1+d_2)\left(\frac{L_{SH}}{\cos\theta}\right)\text{sen}\theta}{d_1^2-d_2^2} = \frac{2v_1^2 d_1}{g} \left(\frac{d_1}{d_2} - 1\right) \left(\frac{1}{d_1^2-d_2^2}\right) \quad 2.98$$

Si $(d_1^2 - d_2^2) = (d_1 + d_2)(d_1 - d_2)$ al sustituir esta expresión en la ecuación:

$$\cos^2(\theta) + \frac{K\left(\frac{L_{SH}}{\cos\theta}\right)\text{sen}\theta}{d_1-d_2} = \frac{2v_1^2 d_1}{g} \left(\frac{d_1}{d_2} - 1\right) \left(\frac{1}{d_1^2-d_2^2}\right) \quad 2.99$$

$$\cos^2(\theta) - \frac{K\left(\frac{L_{SH}}{\cos\theta}\right)\text{sen}\theta}{d_2-d_1} = \frac{2v_1^2 d_1^2}{g d_2 (d_1-d_2)} - \frac{2v_1^2 d_1^2}{g (d_1^2-d_2^2)} \quad 2.100$$

Si se multiplica la ecuación 2.100 por d_2^3/d_1^3 y se sustituye la ecuación $Fr_1^2 = V_1^2/(gd_1)$ y por último se pasa todo al lado izquierdo:

$$\frac{d_2^3}{d_1^3} \left[\cos(\theta) - \frac{K\left(\frac{L_{SH}}{\cos\theta}\right)\text{sen}\theta}{d_2-d_1} \right] - \frac{2Fr_1^2 d_2^2}{d_1-d_2} + \frac{2Fr_1^2 d_2^3}{g(d_1-d_2)} = 0 \quad 2.101$$

Donde Fr es el número de Froude para canales rectangulares. Si se divide la ecuación 2.201 entre $\left[\cos(\theta) - K\left(\frac{L_{SH}}{\cos\theta}\right)\text{sen}\theta/(d_2 - d_1) \right]$, Se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{d_2^3}{d_1^3} - 2G^2 \left(\frac{d_2^2}{d_1^2+d_2^2} \right) + 2G^2 \left[\frac{d_2^3}{d_1(d_1^2+d_2^2)} \right] = 0 \quad 2.102$$

Donde:

$$G = \frac{Fr_1}{\sqrt{\cos(\theta) - \frac{K\left(\frac{L_{SH}}{\cos\theta}\right)\text{sen}\theta}{d_2-d_1}}} \quad 2.103$$

Si se divide la ecuación 2.102 entre $d_2^2/(d_1^2 - d_2^2)$ y se efectúan más operaciones algebraicas, se tiene la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3 - (2G^2 + 1) \left(\frac{d_2}{d_1}\right) + 2G^2 = 0 \quad 2.104$$

Al factorizar la ecuación 2.104:

$$\left[\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{d_1} \right) - 2G^2 \right] \left(\left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right) \right) = 0 \quad 2.105$$

$$\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{d_1} \right) - 2G^2 = 0 \quad 2.106$$

La solución cuadrática de la ecuación 2.106 es la siguiente expresión:

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8G_1^2} - 1 \right) \quad 2.107$$

La ecuación 2.107, es la solución para resolver el salto hidráulico en canales con pendiente y es análoga a la ecuación 2.33 que es la ecuación en canales sin pendiente.

Si el canal rectangular tiene poca pendiente ($\theta \leq 7^\circ$), la ecuación 2.107 se transforma en la siguiente fórmula:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8G_1^2} - 1 \right) \quad 2.108$$

Donde:

$$G = \frac{Fr_1}{\sqrt{1 - \frac{K L_{SH} \text{sen}(\theta)}{y_2 - y_1}}} \quad 2.109$$

Chow (1959), señala que la ecuación 2.103 o 2.109, se debe de solucionar de manera empírica, donde $G = f(Fr_1, \theta)$; también reporta que la relación y_2/y_1 o d_2/d_1 es una función de Fr_1 y S_0 pero no existe ecuación alguna para obtenerlo.

French (1998), señala que:

$$\frac{L_{SH}}{\cos\theta} = x(d_2 - d_1) \quad \text{o} \quad L_{SH} = x(y_2 - y_1) \quad 2.110$$

Donde Kennison, citado por French (1988) sugirió un valor para $x \cong 3.0$

French (1998), con el fin de simplificar, sugiere que k tenga un valor unitario de $K \cong 1.0$. sin embargo, con el fin de simplificar y ser más exactos (tomando en cuenta la curvatura del perfil del salto) al observar fotografías de perfiles de diferentes tipos de saltos hidráulicos (con excepción del salto ondular, se puede decir que se tiene una media de un 20% más de área que el perfil idealizado de forma trapecial; por lo tanto, se puede sugerir que $K \cong 1.2$.

APÉNDICE E

Localización del salto hidráulico

Para poder localizar el salto hidráulico con cierta precisión, se tiene que hacer uso de la ecuación 2.33 para canales horizontales, o la ecuación 2.107 para canales con pendiente a favor, y considerar la longitud del salto hidráulico.

Chow (1959), presenta tres casos:

Caso A, se refiere a un salto hidráulico que se presenta después de una compuerta deslízate, en un canal con pendiente suave, donde el salto se encuentra entre dos perfiles del flujo gradualmente variado, los cuales son el M3 y M2. La curva AB representa parte del perfil M3, donde el flujo es supercrítico, que son alternos a los

tirantes que dibujan la curva AB y se determinan solucionado la ecuación cúbica de la energía, siempre y cuando sean canales de sección rectangulares ($y^3 - Ey^2 + q^2/2g$). La curva CD la trazan los tirantes del perfil M2. El punto F' es la intersección de la curva BA' y CD; El tirante supercrítico y_1 del salto hidráulico se debe encontrar entre los puntos F' y B, por lo tanto hay que elegir un tirante y_1 en esta zona, y con la ecuación 2.107 determinar el tirante y_2 . Con la localización de y_1 y sumando la longitud del salto hidráulico, cotejar si coincide el tirante y_2 con el tirante del flujo M2 en ese punto.

Si esta más grande o pequeño habrá que probar con otro tirante y_1 hasta que coincida la magnitud del tirante conjugado y_2 del salto hidráulico, con la magnitud del tirante del flujo M2 en el mismo punto. Existen una regla utilizada por Agroskin citado por Chow (1959), de que la vena contracta se localiza a una distancia igual a la apertura de la compuerta, desde el punto de partida es la compuerta ($L_e = h$) Fox y Mc Donald (1983), subrayan que el flujo de un canal en una caída libre o sobre un vertedor de cresta ancha, el tirante del borde $y_b \cong 0.72y_c$ y la localización del tirante crítico a la izquierda del borde aguas arriba $L_c \cong 3.5y_c$.

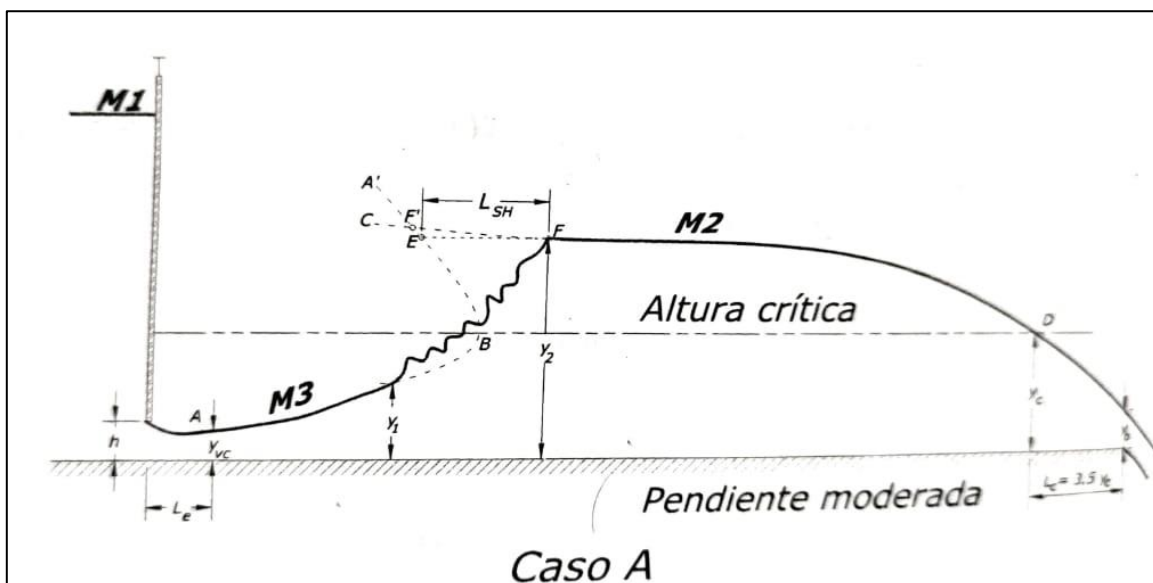
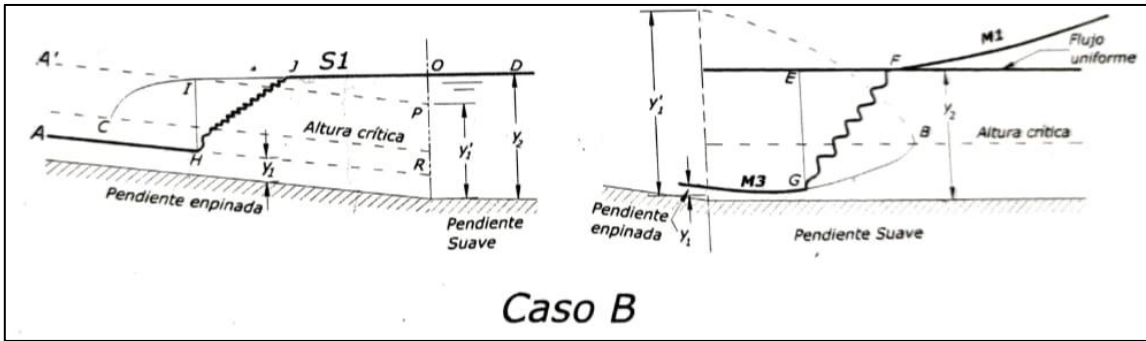


Ilustración 18: localización del salto hidráulico, en el caso A. Chow (1959)

Caso B, el salto hidráulico se forma debido a un cambio de pendiente en el canal de pronunciada a suave. En este caso es muy importante saber si el saltó se



Caso B

Ilustración 19: localización del salto hidráulico, en el caso B. Chow (1959)

establecerá antes o después del quiebre de la pendiente. Se supone un flujo uniforme en la pendiente pronunciada, con la finalidad de simplificar el caso, se puede observar que la línea AR , esta trazada por los tirantes del flujo uniforme supercrítico, y la línea $A'P$ es dibujada por los tirantes supercríticos que son alternos a los tirantes que delinean la recta AR , y que se determinan con la ecuación de la energía como el caso A. y_1' es el tirante subcrítico alternativo o conjugado uniforme y_1 (y_1 viene a ser el tirante del flujo uniforme supercrítico de la pendiente pronunciada). Para obtener el tirante y_2 del salto hidráulico, se va a tomar y_1 como el tirante conjugado supercrítico del salto hidráulico. si $y_1 > y_1'$; el salto se establecerá en la pendiente pronunciada (antes del quiebre); si $y_2 < y_1'$, el salto se formará en la pendiente suave (después del quiebre). En el caso de que se establezca antes del quiebre la solución es más sencilla que en el caso A, por que al tener los valores de y_1, y_2 y la longitud de salto hidráulico, el salto se localiza sin la necesidad de hacerlo a prueba y error. Ahora si el salto hidráulico se forma después del quiebre y se encuentra entre los perfiles M3 y M1, se soluciona de la misma manera que el caso A. si el salto se establece después del quiebre y se encuentra entre el perfil M3 y un flujo uniforme, se resuelve igual que el caso antes del quiebre, pero tomando en cuenta el tirante del flujo uniforme y_2 para obtener y_1 si la segunda pendiente es horizontal, la solución es similar a los procesos anteriores.

Caso C, se muestra un canal de pendiente pronunciada donde se forma un salto hidráulico debido a una barrera de desborde. Si la profundidad alterna y_1' es menor que el tirante alternativo del salto hidráulico y_2 ($y_1' < y_2$), se forma el salto hidráulico y

la solución es similar al caso B. Si $y'_1 > y_2$, solamente se forma una ola estacionaria.

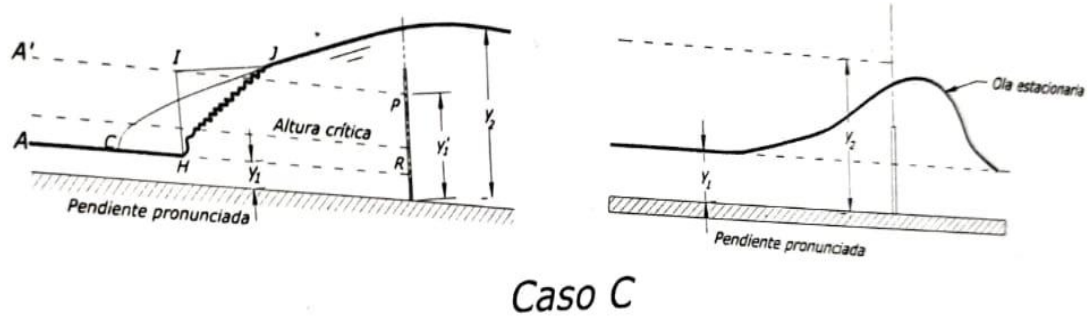


Ilustración 20: localización del salto hidráulico, en el caso C. Chow (1959)

