



**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL.**

**TESIS:**

**“DISEÑO HIDRÁULICO DE CONFLUENCIA DE CANALES  
ABIERTOS.”**

**Presentado por el Bachiller**

**Neiser Antonio PAGAN LUNA.**

**Para optar al Título Profesional de**

**INGENIERO CIVIL.**

**ABANCAY – PERU**

**2016**

## DEDICATORIA

A DIOS, El ser que guía e ilumina mi vida.

A mis padres: Faustina Luna y Clodowaldo Pagán que me supieron inculcar valores morales.

A mi Hermana: Milena por su apoyo moral en todos estos años. A mi Sobrina:

Dalia Guadalupe por ser la alegría de mi vida. A mi Esposa Marina:

Con especial cariño y amor por su apoyo moral. A mis hijos: Neiser Guillermo y Marina Guadalupe

## AGRADECIMIENTO

Agradecimiento a los señores Guillermo Castañeda Sánchez y Avelina Llamaza Maldonado, por haberme abierto las puertas de su casa y haber compartido sus sabias vivencias en tan corto tiempo.

Agradecimiento al Ing<sup>o</sup> Abbon Alex Vásquez Ramírez por haberme orientado en la formación de mi carrera profesional, Ing<sup>o</sup> Erik Alarcón Camacho por su apoyo y orientación desinteresada.

Agradezco al Ing<sup>o</sup> Oscar Morón, Ing<sup>o</sup> Oscar Pinedo, Ing<sup>o</sup> Juan Carlos Tecillo, Ing<sup>o</sup> Bruno Chipa, Ing. Gerardo Segovia.

Agradezco a mis cuñados: Sabina, Otilia, Isolina, Egidia, Leticia, Diomedes, Arturo, Plácido.

Agradecimiento a la Ing<sup>o</sup> Civil Milena Pagán Luna e Ing<sup>o</sup> Civil Raúl Tupa por sus consejos.

Agradezco a mis amigos: Francisco, James, Fernando, armando, Erick, David, Raúl, Claudio, Wilfredo, Werner, Adolfo, Donato, Hernán, Jhon, Víctor, William, Juan, Elizabeth, Beatriz, Nela, Kely, Rocío.

A mis sobrinos, Miguel, Lucero, Avelina, Verónica, Omar, Mari luz.

## RESUMEN

En el presente trabajo que lleva por título Diseño Hidraulico de Confluencia de Canales Abiertos, cuyo objetivo es dimensionar una estructura hidráulica de unión de dos canales abiertos con la ayuda de una hoja de Excel para el cálculo de los parámetros hidráulicos que conlleven a obtener un diseño que garantice el funcionamiento adecuado de la mencionada estructura hidráulica, para poder entender y realizar el presente trabajo se utilizó diferentes publicaciones y textos de hidráulica especializados en el tema, con la creación de la hoja de cálculo Excel es factible dimensionar y diseñar la confluencia de dos canales abiertos en régimen Subcrítico y Supercrítico, con sus respectivos parámetros cuyos valores encontrados mediante ecuaciones y fórmulas que fueron utilizadas en la elaboración de la hoja de cálculo.

Obtenido el dimensionamiento hidráulico con la hoja electrónica es conveniente recurrir a la elaboración de modelos físicos para el diseño definitivo de confluencias. El presente trabajo está dirigido a estudiantes de ingeniería.

## **SUMMARY**

The present work is named Hydraulic Design of Confluence of Opened Channels, whose objective is sizing a hydraulic structure joining two open channels with the help of Excel spreadsheets to achieve the Calculation of the hydraulic parameters that lead to obtain a design that guarantees the correct operation of the mentioned hydraulic structure, to be able to deal and realize the present work different publications and hydraulic books were used, with the creation of the Excel spreadsheet is feasible the sizing and design the confluence of two open channels in a Subcritical and supercritical regime, with its own parameters whose values found by the using of equations and formulas were used in the preparation of spreadsheets.

Once obtained the hydraulic dimensioning with the spreadsheet is convenient develop physical models to perform the final design of confluences. This work is aimed at engineering students.

# INDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pg.</b>
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCION.....	2
1.1. Objetivo principa.....	2
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Hipótesis.....	2
1.5 Justificación de proyecto.....	2
CAPÍTULO II.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 FUNDAMENTOS DE FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES.....	3
2.1.1 Propiedades de los Fluidos.....	3
2.1.1.1 Densidad Específica o Absoluta.....	3
2.1.1.2 Peso Específico.....	3
2.1.1.3 Volumen Específico.....	3
2.1.1.4 Viscosidad.....	3
2.2 CANALES ABIERTOS.....	4
2.2.1 Canales.....	4
2.2.1.1 Canales Abiertos.....	4
2.2.1.2 Secciones transversales más comunes.....	4
2.2.1.3 Geometría del Canal.....	5
2.2.1.3.1 Elementos Geométricos de una Sección de Canal.....	5
2.2.2 Canales de Máxima Eficiencia Hidráulica.....	9
2.2.2.1 Máxima Eficiencia Hidráulica en Canales Hidráulicos.....	9
2.2.3 Distribución de Presión en una Sección de Canal.....	9
2.3 Tipos de Flujo, Energía y Momentum.....	10
2.3.1 Tipos de flujo.....	10
2.3.2 Estados y Regímenes de Flujo.....	13
2.3.3 Energía del Flujo en canales abiertos.....	15
2.3.4 Principio de Conservación de Momentum.....	20
2.4 Transiciones en canales abiertos.....	24
2.4.1 Introducción.....	24
2.4.2 Transiciones en régimen subcrítico.....	24
2.4.3 Transiciones en régimen supercrítico.....	30
CAPÍTULO III.....	36
UNIÓN EN CANALES ABIERTOS (CONFLUENCIAS).....	36
3.1. Introducción.....	36
3.2 Unión de dos canales en régimen Subcrítico.....	37
3.2.1 Teoría y Suposiciones en Flujo Subcrítico.....	37
3.2.2 Deducción de la Ecuación General para uniones de canales, basado en el Principio de Conservación del Momentum.....	37
3.2.3 Ecuación para uniones de canales de sección rectangular.....	40
3.2.4 Simplificación de la Ecuación para uniones de canales trapezoidales.....	41
3.2.5 Ecuación para uniones de canales con ancho del canal principal variable.....	41
3.2.6 Criterios de diseño de confluencias en régimen subcrítico.....	43
3.3 Unión de dos canales en régimen supercrítico.....	43
3.3.1 Escurrimiento Supercrítico.....	43
3.3.2 Formación de ondas estacionarias.....	43
3.3.3 Altura de frente de ondas en una confluencia de canales.....	46

3.3.4 Criterios de diseño en presencia de ondas estacionarias.....	48
CAPÍTULO IV.....	51
PARÁMETROS DE DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE UNIÓN DE DOS CANALES.....	51
4.1 Estudios importantes para el diseño.....	51
4.1.1 Estudios para su ubicación.....	51
4.1.2 Estudio de las características del sistema.....	51
4.1.3 Consideraciones económicas.....	52
4.2 Parámetros de diseño de una estructura de unión de dos canales.....	53
4.2.1 Dimensionamiento en planta de la estructura de unión.....	53
4.2.2 Profundidad del flujo en el centro de la confluencia.....	55
4.2.3 Cálculo de la altura de los muros.....	55
4.3 Parámetros de diseño de la estructura de salida.....	56
4.3.1. Dimensionamiento en planta de la transición.....	56
4.3.1.1 Transición recta.....	56
CAPÍTULO V.....	57
METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA ESTRUCTURA DE UNIÓN DE DOS CANALES EN LA HOJA ELECTRÓNICA EXCEL.	57
.....	57
5.1 Limitaciones.....	57
5.2 Cálculos Tipo.....	57
5.3 Hoja de cálculo en Excel para el dimensionamiento hidráulico de una estructura de unión de dos canales.....	64
5.3.1 Hoja de cálculo en Excel para el dimensionamiento hidráulico de una estructura de unión de dos canales en régimen subcrítico.....	64
5.4 Análisis de resultados.....	68
CAPÍTULO VI.....	70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
6.1. Conclusiones.....	70
6.2. Recomendaciones.....	71
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXOS.....	73

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 SECCION TIPO DE CANALES  
FIGURA 2 PARAMETROS DE LA SECCION TRANSVERSAL  
FIGURA 3 CANAL DE SECCION TRAPEZOIDAL  
FIGURA 4 ELEMENTOS GEOMETRICOS DE UNA SECCION CIRCULAR  
FIGURA 5 DISTRIBUCION DE PRESIONES EN CANLES RECTOS
- FIGURA 6 PERFIL LONGITUDINAL DE UN CANAL, MOSTRANDO FLUJO UNIFORME  
FIGURA 7 PERFIL LONGITUDINAL DE UN CANAL CON FLUJO NO UNIFORME  
FIGURA 8 ESQUEMATIZACIÓN DEL FLUJO PERMANENTE  
FIGURA 9 ESQUEMATIZACIÓN DEL FLUJO NO PERMANENTE  
FIGURA 10 FLUJO RÁPIDAMENTE VARIADO  
FIGURA 11 FLUJO GRADUALMENTE VARIADO  
FIGURA 12 FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO  
FIGURA 13 ENERGÍA TOTAL EN UNA SECCIÓN DE CANAL  
FIGURA 14 INTERPRETACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA  
FIGURA 15 CURVA DE ENERGÍA ESPECÍFICA  
FIGURA 16 GRÁFICO DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA A GASTO CONSTANTE  
FIGURA 17 DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA EN UN CANAL RECTANGULAR  
FIGURA 18 APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DEL MOMENTUM EN UN VOLUMEN DE CONTROL  
FIGURA 19 TRANSICIÓN DE UN CANAL  
FIGURA 20 CURVAS DE LA VARIACIÓN DE LA ENERGÍA ESPECÍFICA CON LA PROFUNDIDAD DE AGUA PARA FLUJO SUBCRÍTICO  
FIGURA 21 TRANSICIONES TÍPICAS PARA FLUJO SUBCRÍTICO  
FIGURA 22 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LAS LÍNEAS DE CORRIENTE EN UN CAMBIO DE DIRECCIÓN EN FLUJO SUPERCRÍTICO  
FIGURA 23 RELACIONES GENERALES ENTRE  $Fr_1$ ,  $\Theta$ ,  $B$ ,  $y_1/y_2$ ,  $Fr_2$ , PARA EL ANÁLISIS DE CONTRACCIONES EN RÉGIMEN SUPERCRÍTICO.  
FIGURA 24 DISEÑO INCORRECTO DE UNA CONTRACCIÓN CON FLUJO SUPERCRÍTICO.
- FIGURA 25 DISEÑO ADECUADO DE UNA CONTRACCIÓN CON FLUJO SUPERCRÍTICO.  
FIGURA 26 ENSANCHAMIENTO EN UN CANAL CON FLUJO SUPERCRÍTICO.  
FIGURA 27 CURVAS GENERALIZADAS DE CONTORNO, PARA DIVERGENCIAS EN RÉGIMEN SUPERCRÍTICO.  
FIGURA 28 PERFIL A LO LARGO DEL CANAL PRINCIPAL EN UNA CONFLUENCIA DE CANALES  
FIGURA 29 APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DEL MOMENTUM  
FIGURA 30 APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DEL MOMENTUM EN LA CONFLUENCIA ENTRE DOS CANALES, CON ANCHO DEL CANAL PRINCIPAL CONSTANTE  
FIGURA 31 APLICACIÓN DEL MOMENTUM EN LA CONFLUENCIA ENTRE DOS CANALES DE DISTINTO ANCHO Y ENSANCHE DEL CANAL PRINCIPAL  
FIGURA 32 ONDAS ESTACIONARIAS EN RÉGIMEN SUPERCRÍTICO  
FIGURA 33 ALTURA MÁXIMA DE LA ONDA CUANDO SÓLO APORTA UN CANAL  
FIGURA 34 ALTURA MÁXIMA DE LA ONDA ESTACIONARIA CUANDO APORTA SÓLO UN CANAL  
FIGURA 35 GEOMETRÍA DEL FLUJO. FRENTE DE ONDA PRINCIPAL.  
FIGURA 36 PATRÓN PLANO DE LÍNEAS DE FLUJO PARA LA CONFLUENCIA (HAGER, 1989)  
FIGURA 37 EJEMPLO DE DISEÑO DE UNA CONFLUENCIA EN CANAL RECTANGULAR  
FIGURA 38 EJEMPLO DE DISEÑO DE UNA CONFLUENCIA EN CANAL TRAPEZOIDAL  
FIGURA 39 CURVA PARA LA DETERMINACIÓN DEL INCREMENTO DE ANCHO, EN EL DISEÑO DE UNIÓN DE CANALES

FIGURA 40 ESQUEMATIZACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA CONFLUENCIA

FIGURA 41 VISTA EN PLANTA DE UNA TRANSICIÓN

FIGURA 42 DIMENSIONES DEL CANAL PRINCIPAL

FIGURA 43 DIMENSIONES DEL CANAL LATERAL

FIGURA 44 ESTRUCTURA DE CONFLUENCIA, CON DATOS CALCULADOS EN EL DISEÑO TIPO

# **CAPITULO I:**

## **INTRODUCCION**

El avance en el estudio del comportamiento de una confluencia ha sido estudiado por algunos investigadores, pero cabe recordar la dificultad que han tenido los antes mencionados para desarrollar una teoría universal que sea capaz de predecir con exactitud lo que ocurre en una confluencia cualquiera.

Las confluencias de canales abiertos son elementos importantes de los canales naturales y artificiales, sin embargo, ha recibido interés limitado debido al número de parámetros que participan en el fenómeno, tales como el ángulo de intersección, de la forma y ancho del canal, del caudal específico y del tipo de flujo.

Según Ven Te Chow (1959), el problema es tan complicado que sólo se han estudiado algunos casos simples y específicos. Las conclusiones de tales estudios indican que la generalización del problema no es posible ni es conveniente. Por lo anterior, lo mejor que se puede hacer en los casos en que la teoría hidráulica no da buenos resultados es un estudio en modelo físico.

Las uniones en canales abiertos no son temas frecuentes en la ingeniería hidráulica de nuestro País, pero existen, y cuando los hay se debe dar una solución conveniente para que la estructura en la confluencia no presente problema alguno, capaz de sufrir un deterioro y hasta la falla del elemento.

La confluencia de flujos en canales abiertos es un desafío que ha sido tomado por distintos científicos desde hace años y que continúa vigente en la actualidad. En particular la unión de flujos a la misma elevación (confluencia horizontal) ha sido extensamente estudiada y modelada. Acerca del tema, a lo largo del tiempo, se han analizado configuraciones específicas muy sencillas, de manera de simplificar al máximo las variables que entran en juego, de esta manera se ha podido obtener ecuaciones aproximadas que nos facilitará el diseño de una estructura de unión de dos canales.

## **1.1. Objetivo Principal**

Dimensionar una estructura hidráulica de unión de dos canales, con la ayuda de una hoja electrónica para el cálculo de los parámetros hidráulicos que conlleven a obtener un diseño que garantice el funcionamiento adecuado, evitando efectos nocivos a la estructura.

## **1.2 Objetivos Específicos**

1. Recopilar y sintetizar la información existente sobre diseños de estructuras hidráulicas de unión de dos canales.
2. Calcular los parámetros hidráulicos de una estructura de unión de dos canales.
3. Elaborar una hoja de cálculo en Excel para el dimensionamiento hidráulico de una estructura de unión de dos canales.

## **1.3 Hipótesis**

De disponer una hoja electrónica que sirva de herramienta para el cálculo y Dimensionamiento Hidráulico de una Estructura de unión de dos canales, permitiría facilitar el diseño de varias alternativas de estas estructuras, conllevando a definir una mejor alternativa de entre las calculadas.

## **1.4 Justificación del Proyecto**

A través del mundo se han realizado abundantes obras de ingeniería hidráulica donde la unión de canales abiertos ha desempeñado un papel importante. A medida que los canales se convirtieron en una estructura de uso práctico; se ha catalogado como uno de los más importantes para la construcción de obras donde el agua cumple un papel primordial. El país requiere estar a la vanguardia en los avances de ciencia y tecnología en lo que a la hidráulica se refiere y seguir formando ingenieros capaces de influir en el diseño y construcción adecuada de dichas obras.

Por ello la labor de este trabajo se centrará en proporcionar una explicación clara y concisa de todos los aspectos que influyen en el dimensionamiento de una estructura de unión de dos canales, desde el aspecto teórico hasta su diseño hidráulico. Basado en recopilación de información y desarrollo de fórmulas para su cálculo.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 FUNDAMENTOS DE FLUJO DE FLUIDOS EN CANALES.

##### 2.1.1 Propiedades de los Fluidos

**Fluidos:** es aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene. Los fluidos se clasifican en líquidos y gases.

##### 2.1.1.1 Densidad Específica o Absoluta.

La densidad es la masa por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

m: masa en kg, SI.

V: volumen, en m<sup>3</sup>, SI.

La densidad absoluta es función de la temperatura y de la presión (Claudio Mataix).

##### 2.1.1.2 Peso Específico.

El peso específico es el peso por unidad de volumen.

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho g$$

Dónde:

W: peso en N, SI.

V: volumen en m<sup>3</sup>, SI.

El peso específico es función de la temperatura y de la presión aunque en los líquidos no varía prácticamente con esta última. (Claudio Mataix).

##### 2.1.1.3 Volumen Específico

En el Sistema Internacional el volumen específico es el recíproco de la densidad absoluta.

$$v = \frac{1}{\rho}$$

##### 2.1.1.4 Viscosidad

Entre las moléculas de un fluido existen fuerzas moleculares que se denominan fuerzas de cohesión. Al desplazarse unas moléculas con relación a otras se produce a causa de ellas una fricción. Por otra parte, entre las moléculas de un fluido en contacto con un sólido y las moléculas del sólido existen fuerzas moleculares que se denominan fuerzas de adherencia. El coeficiente de fricción interna del fluido se denomina viscosidad y se designa con la letra griega ( $\nu$ ) “ $\eta$ ” La

viscosidad, como cualquiera otra propiedad del fluido, depende del estado del fluido caracterizado por la presión y la temperatura.

## **2.2 CANALES ABIERTOS**

### **2.2.1 Canales**

Son canales por donde el agua circula debido a la acción de su propio peso sin estar sometida a más presión que la atmosférica; es decir la superficie libre del líquido esté en contacto con la atmósfera.

#### **2.2.1.1 Canales Abiertos**

Un canal abierto es un conducto en el que el agua fluye con una superficie libre. (VEN TE CHOW 1994)

Clasificado de acuerdo a su origen, un canal puede ser natural o artificial

##### **a. Canal natural.**

Son todos los que existen de manera natural en la tierra: arroyuelos, arroyos, ríos, estuarios de mareas, entre otros. Las propiedades hidráulicas de un canal natural son muy complejas, para su estudio se hacen suposiciones razonables para tratarlos con los principios de la hidráulica teórica. Los estudia la Hidráulica Fluvial. Incluyen todos los cursos de agua que existen de manera natural en la tierra, los cuales varían en tamaño desde pequeños arroyuelos en zonas montañosas, hasta quebradas, arroyos, ríos pequeños y grandes y estuarios de mareas.

##### **b. Canal artificial.**

Son todos los construidos mediante esfuerzo humano: Canales de navegación, canales de centrales hidroeléctricas, canales y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos, canales de desborde, cunetas de carreteras, canales de laboratorio, etc.

Las propiedades hidráulicas de estos canales pueden ser controladas hasta un nivel deseado o diseñadas para cumplir requisitos determinados.

El canal artificial es un canal largo con pendiente suave, construido sobre el suelo, que puede ser no revestido o no revestido con roca, concreto, madera o materiales bituminosos, entre otros.

En este curso se estudiarán canales prismáticos, que se construyen con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante.

#### **2.2.1.2 Secciones transversales más comunes**

Un canal construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante se conoce como canal prismático.

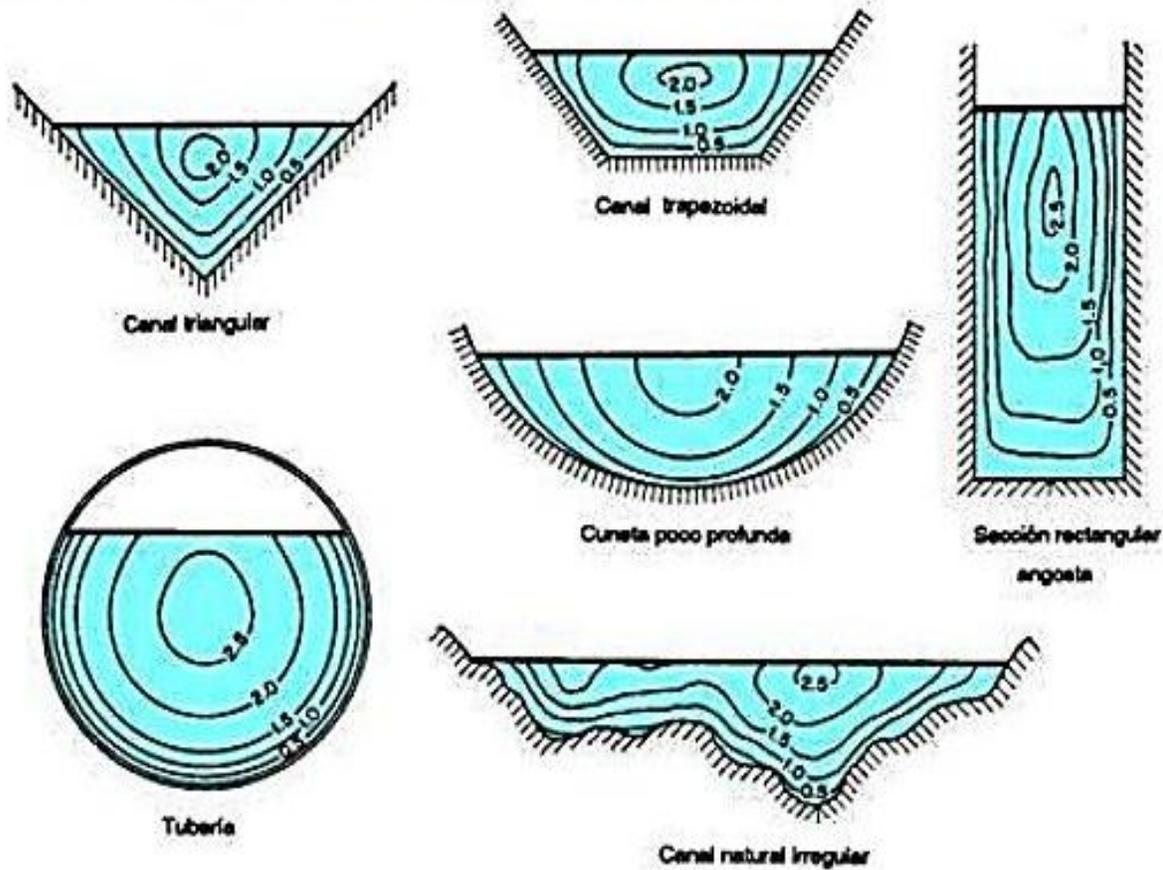
En la tabla 1 se muestran las 7 formas geométricas utilizadas comúnmente (Ven Te Chow)

El estudio hidráulico se orienta en forma principal a los canales superficiales, las secciones transversales puede ser muy diversa pero por lo general se fija en aquellas que presenta una mayor

estabilidad que sea de fácil construcción y que su costo sea menor la forma más utilizada son los siguientes:

- ✓ Trapezoidal
- ✓ Rectangular
- ✓ Circular
- ✓ Semicircular

**Figura 1 secciones tipo de canales**



### 2.2.1.3 Geometría del Canal

Un canal construido con sección transversal constante y pendiente del fondo también constante, se llama canal prismático. De lo contrario el canal es No Prismático.

#### 2.2.1.3.1 Elementos Geométricos de una Sección de Canal

Estos elementos son muy importantes para el cálculo del flujo. En un canal artificial se definen en términos de la profundidad de flujo y las dimensiones de la sección; en canales naturales se determinan curvas que representen la relación entre los elementos y la profundidad del flujo. En la figura se puede apreciar los elementos geométricos de un canal trapezoidal.

**a. Área Mojada (A).** Es el área mojada o área de la sección transversal del flujo, perpendicular a la dirección de flujo.

**b. Perímetro mojado (P).** Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.

**c. Radio hidráulico (R).** Es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado:

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

**d. Ancho superficial (T).** Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

**e. Profundidad hidráulica (D).** Es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie:

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

**f. Factor de sección (Z).** Se utiliza para el cálculo de flujo crítico. Es el producto del área mojada y la raíz cuadrada de la profundidad hidráulica:

$$Z = A\sqrt{D} = A\sqrt{A/T}$$

**g. Profundidad de flujo (y).** Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre, la profundidad de flujo de la sección es la profundidad de flujo perpendicular a la dirección de éste, o la altura de la sección del canal que contiene el agua.

**h. El Factor de Sección para el Cálculo de Flujo ( $AR^{2/3}$ ).** Es el producto del área mojada y el radio hidráulico elevado a la potencia  $2/3$ .

**El Nivel:** es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia o “datum” hasta la superficie libre, no obstante, si el punto más bajo de la sección de canal se escoge como el nivel de referencia, el nivel es idéntico a la profundidad de flujo.

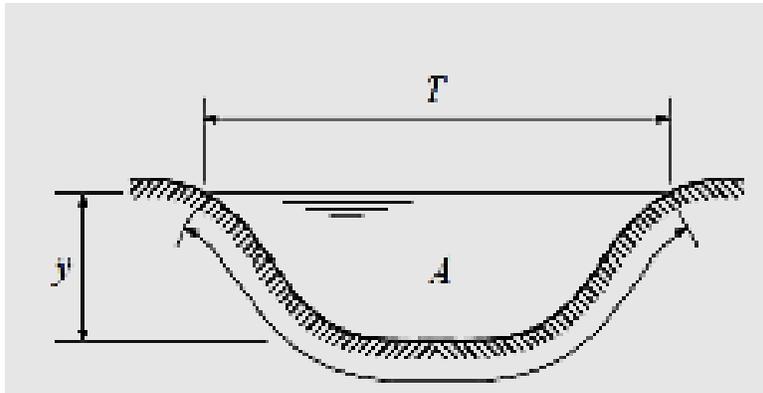
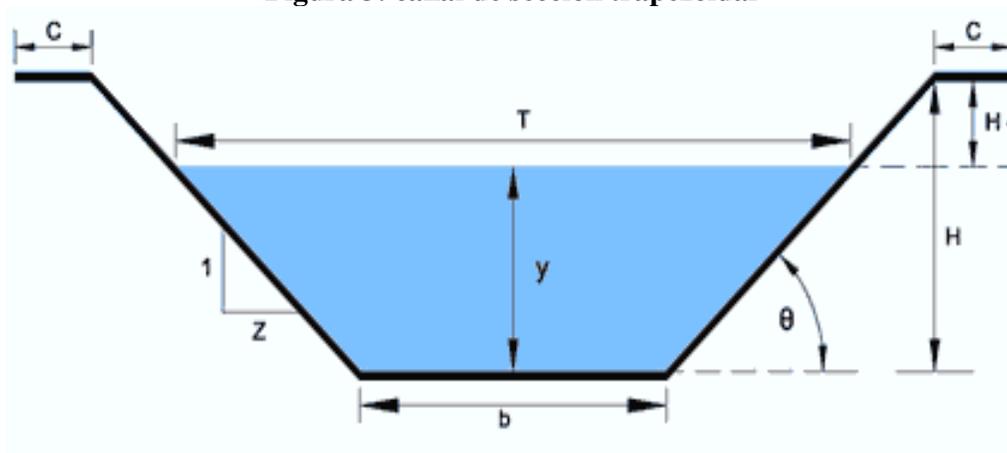


Figura. 2. Parámetros de la sección transversal (Arturo Rocha)

Figura 3: canal de sección trapezoidal



Donde:

$y$  = tirante de agua, altura que el agua adquiere en la sección transversal

$b$  = base del canal o ancho de solera

$T$  = espejo de agua o superficie libre de agua

$H$  = profundidad total del canal

$H-y$  = borde libre

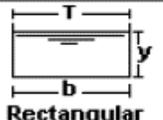
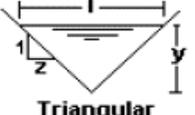
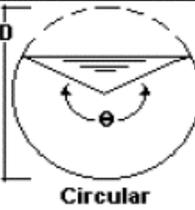
$C$  = ancho de corona

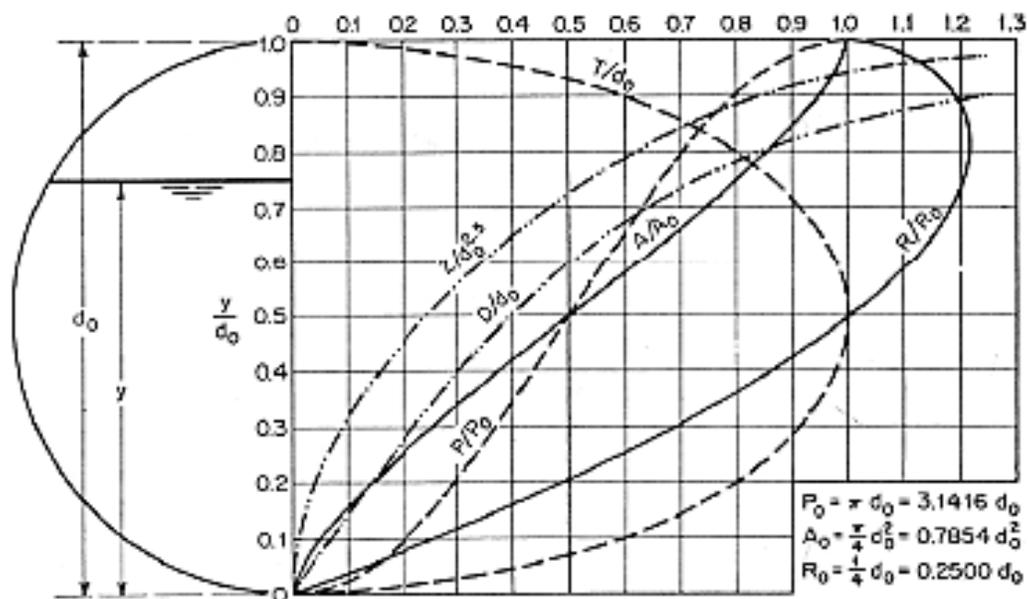
$\theta$  = ángulo de inclinación de las paredes laterales con la horizontal

$z$  = talud

En el **cuadro 1** se puede apreciar Relaciones geométricas de las secciones transversales más frecuentes

Cuadro 1 Relaciones geométricas de las secciones transversales más frecuentes

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



Figuran 4 Elementos geométricos de una sección circular (Ven Te Chow)

### 2.2.2 Canales de Máxima Eficiencia Hidráulica.

Se llama así a aquellos canales que para la misma Área permite pasar un máximo caudal para conseguir una mayor capacidad de circulación, el radio hidráulico debe ser mayor posible. Esta condición de máximo radio hidráulico, siendo el Área igual, se consigue siendo el perímetro mojado lo menor posible.

**NOTA:** Una canalización semicircular ser la que posee mayor eficiencia hidráulica.

#### 2.2.2.1 Máxima Eficiencia Hidráulica en Canales Hidráulicos

$$m = 2 (\sqrt{1+Z^2} - Z)$$

#### 2.2.3 Distribución de Presión en una Sección de Canal.

La presión en cualquier punto de la sección transversal del flujo de un canal con pendiente baja puede medirse por medio de la altura de la columna de agua en un tubo piezométrico instalado en un punto cualquiera. Al no considerar las pequeñas perturbaciones debidas a la turbulencia, es claro que el agua en esta columna debe subir desde el punto de medición hasta la línea de gradiente hidráulico o superficie libre. Entonces la presión en cualquier punto de la sección es directamente proporcional a la profundidad de flujo por debajo de la superficie libre e igual a la presión hidrostática correspondiente a esta profundidad, dicho de otra manera, la distribución de presiones a lo largo de la sección transversal de canal es igual a la distribución hidrostática de presiones, es decir la distribución es lineal y puede representarse mediante una recta, a continuación se muestran algunas figuras con distribución de presiones en canales.

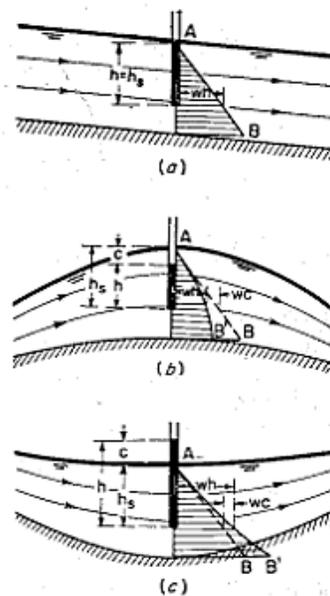


Figura 5. Distribución de presiones en canales rectos y curvos con pendientes bajas u horizontales en la sección bajo consideración,  $h$  = altura piezométrica,  $h_1$  = altura hidrostática; y  $c$  = corrección de altura de presión por curvatura. A) Flujo paralelo, B) flujo convexo, C) flujo cóncavo. (Ven Te Chow)

## 2.3 Tipos de Flujo, Energía y Momentum

### 2.3.1 Tipos de flujo

**2.3.1.1 Flujo uniforme.** El flujo uniforme (figura 6), al ser considerado tiene los siguientes aspectos principales: (1) la profundidad, área mojada, velocidad y descarga en cada sección del tramo del canal son contantes. (2) la línea de energía, superficie del agua y fondo del canal son todas paralelas: es decir, sus pendientes son todas iguales. (CHOW 1994)

$$Y_1 = Y_2 \quad V_1 = V_2 \quad S_o = S_w = S_f$$

Si en cualquier sección transversal a la corriente la velocidad en puntos homólogos es igual en magnitud y dirección, aunque dentro de una misma sección transversal varíe de un punto a otro.

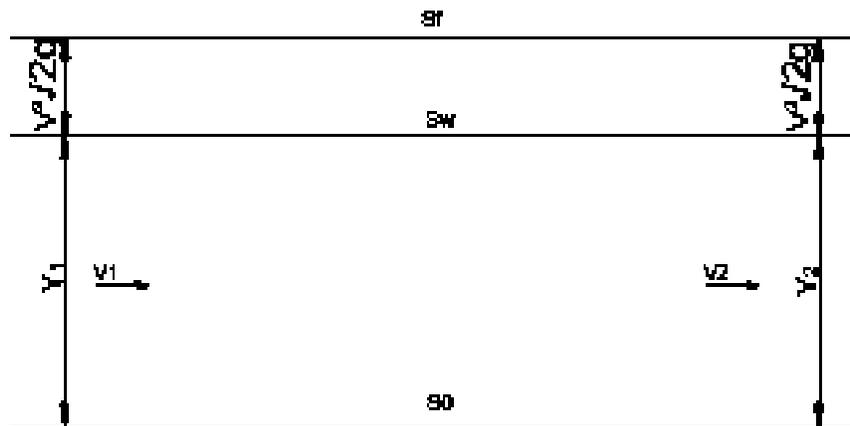


Figura 6 Perfil longitudinal de un canal, mostrando flujo uniforme

**2.3.1.2 Flujo no uniforme.** Requiere que la superficie de agua fluctúe de tiempo en tiempo mientras permanece paralela al fondo del canal (CHOW 1994), las características hidráulicas cambian entre dos secciones, es decir:  $(dv/dx) \neq 0$

$$Y_1 \neq Y_2 \quad V_1 \neq V_2 \quad S_o \neq S_w \neq S_f$$

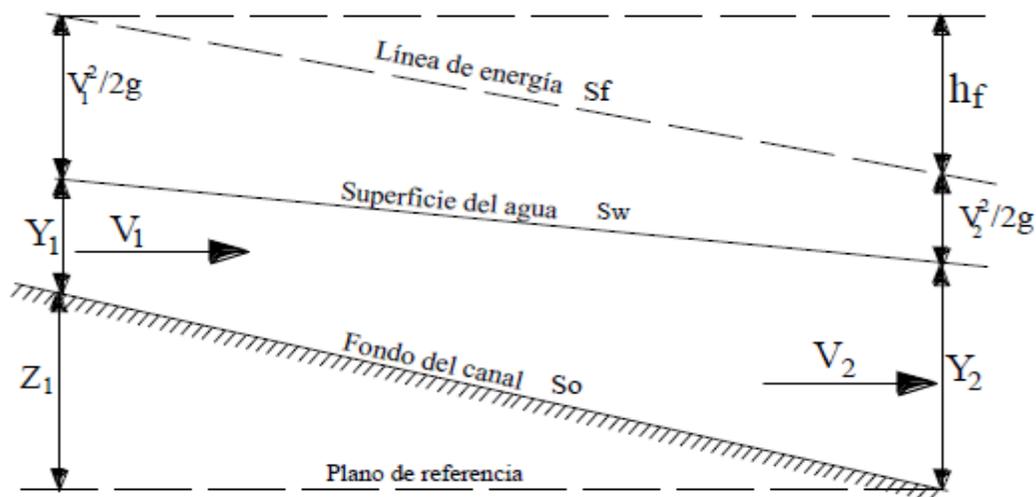


Figura 7 Perfil longitudinal de un canal con flujo no uniforme

**2.3.1.3 Flujo permanente.** Este tipo fundamental de flujo considerado en la hidráulica de canales abiertos la profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo considerado. Es aquel en el que tomando como criterio el tiempo, las características hidráulicas permanecen constantes (figura 8), es decir:  $(dv/dt) = 0$  (CHOW 1994)

$$Y_1 = Y_2 \quad V_1 = V_2$$

Si en cualquier punto del espacio por donde circula el fluido no disminuyen con el tiempo las características de éste (aunque varíen de un punto a otro), en particular su velocidad y su presión.

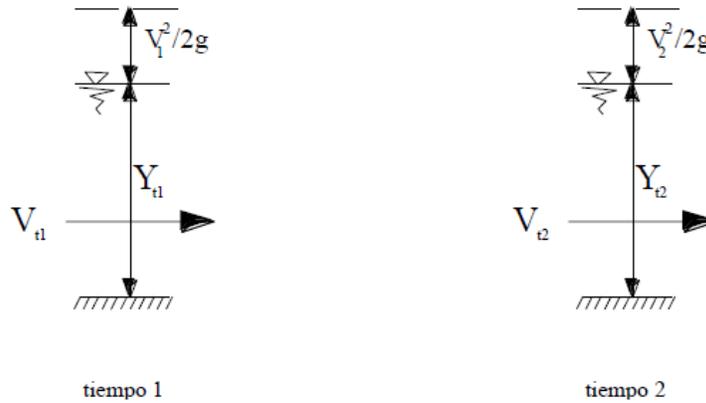


Figura 8 Esquematación del flujo permanente

**2.3.1.4 Flujo no permanente.** Requiere que la superficie del agua fluctúe de tiempo en tiempo mientras permanece párelo al fondo del canal Flujo en el cual las características hidráulicas cambian en el tiempo (figura 9), es decir:  $(dv/dt) \neq 0$  (CHOW 1994)

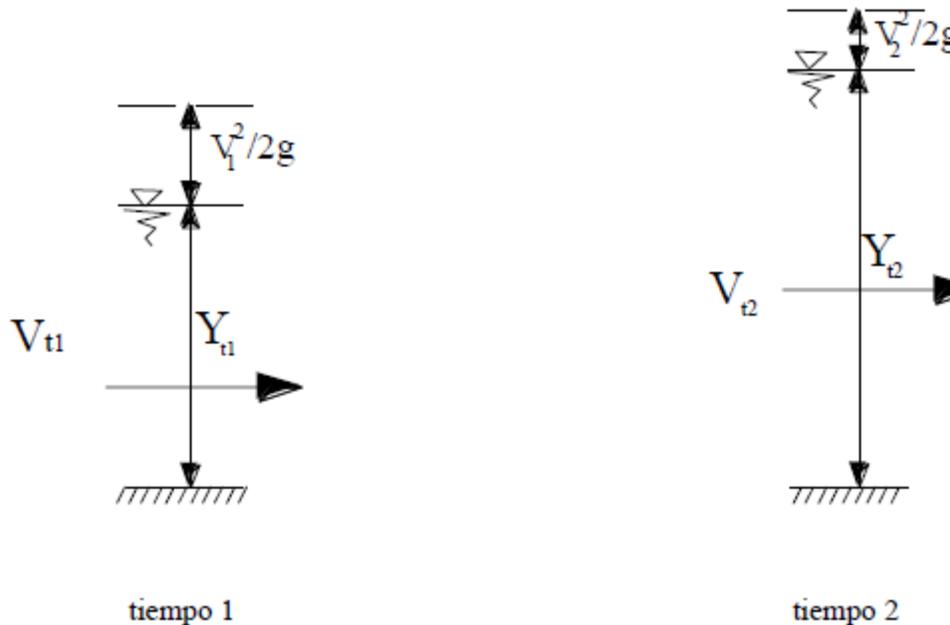


Figura 9 Esquematación del flujo no permanente

**2.3.1.5 Flujo rápidamente variado.** El flujo es rápidamente variado si la profundidad cambia abruptamente en una distancia comparativamente corta (CHOW 1994). Flujo en el cual las características hidráulicas cambian rápidamente, en un espacio relativamente corto (figura 10). (SOTELO 2002)

Si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas, sino de otro modo se comporta gradualmente variado.

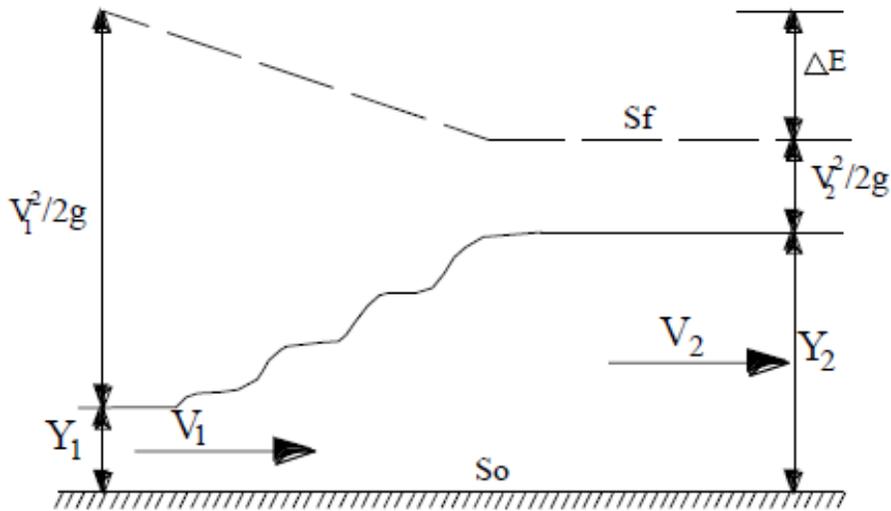


Figura 10 Flujo rápidamente variado

**2.3.1.6 Flujo gradualmente variado.** Flujo en el cual las características hidráulicas cambian de manera gradual con la longitud (figura 11). (SOTELO 2002)

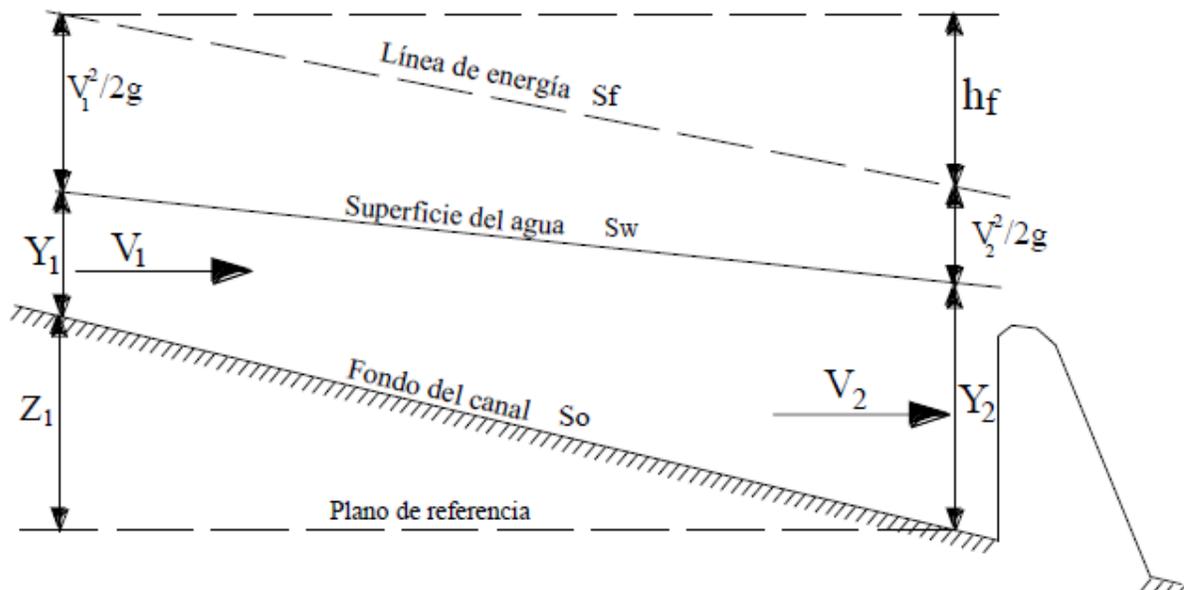


Figura 11 Flujo gradualmente variado.

## 2.3.2 Estados y Regímenes de Flujo

**2.3.2.1 Estado de Flujo.** El estado o comportamiento del flujo en canal abierto es gobernado básicamente por los efectos de viscosidad y gravedad relativa de las fuerzas de inercia del flujo. Dependiendo de la magnitud de la proporción de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas de viscosidad, número de Reynolds,  $Re$ , el estado del flujo para canales a superficie libre, se clasifica como: (CHOW 1994)

- Laminar  $Re \leq 500$
- Transitorio  $500 \leq Re \leq 12500$
- Turbulento  $12500 \leq Re$

Si las fuerzas viscosas predominan sobre las de inercia, se considera el estado del flujo como **laminar**, mientras que cuando las fuerzas de inercia predominan sobre las viscosas se considera el estado del flujo como **turbulento**.

### a. Flujo Laminar:

Cuando el gradiente de velocidad es bajo, la fuerza de inercia es mayor que la de fricción, las partículas se desplazan pero no rotan, o lo hacen pero con muy poca energía, el resultado final es un movimiento en el cual las partículas siguen trayectorias definidas, y todas las partículas que pasan por un punto en el campo del flujo siguen la misma trayectoria.

Si es perfectamente ordenada de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas (si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos) o en capas cilíndricas coaxiales.

### b. Flujo Turbulento:

Al aumentar el gradiente de velocidad se incrementa la fricción entre partículas vecinas al fluido y adquieren una energía de rotación apreciable; la viscosidad pierde su efecto y debido a la rotación las partículas cambian de trayectoria las partículas chocan entre sí y cambian de rumbo en forma errática.

Siendo:

$$R = \frac{VL}{\nu} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

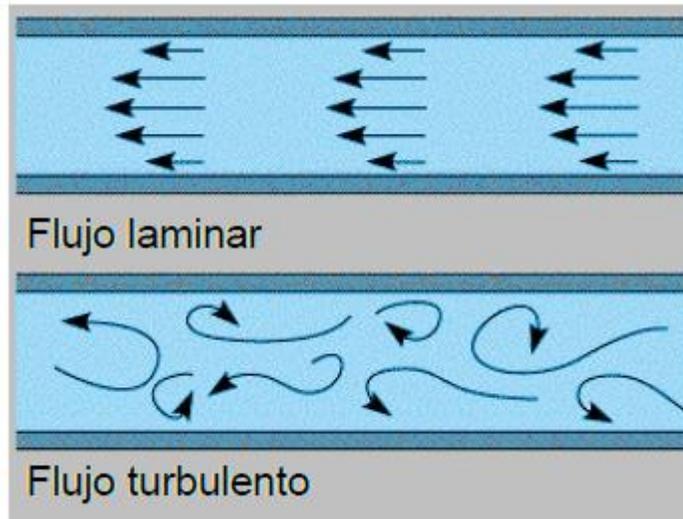
Donde.

$V$  = velocidad del flujo en m/s

L = longitud característica, en metros. La longitud característica en conductos a superficie libre es igual a cuatro veces el radio hidráulico R.

v = viscosidad cinemática del fluido en m<sup>2</sup>/s

Figura 12. Flujo laminar y flujo turbulento.



**NOTA:** como el flujo en la mayor parte de los canales es turbulento, un modelo empleado para simular un canal prototipo debe ser diseñado de tal manera que el número Reynolds del flujo en el canal modelo este en el rango turbulento.

**2.3.2.2 Regímenes de Flujo.** El efecto de la gravedad sobre el estado del flujo se representa por una relación de las fuerzas de inercia a las fuerzas de la gravedad se obtiene un parámetro adimensional conocido como **número de Froude (Fr)**, el cual permite clasificar al flujo como **Subcrítico, crítico y supercrítico**. El número de Froude se escribe. (CHOW 1994)

$$\mathbf{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde.

V = velocidad media del flujo, m/s

g = aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>

y = profundidad hidráulica, m

Dependiendo de la magnitud de la proporción de las fuerzas de gravedad e inercia, el régimen del flujo es clasificado como:

- Subcrítico  $Fr < 1$
- Crítico  $Fr = 1$
- Supercrítico  $Fr > 1$

Donde  $V$ , es la velocidad media del flujo,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $L$ , la longitud característica. En canales abiertos,  $L$  es igual a la profundidad hidráulica  $D$ , definida como el área de la sección transversal del agua perpendicular a la dirección de flujo en el canal, dividida entre el ancho de la superficie libre. Para canales rectangulares,  $L$  es igual a la profundidad de la sección de flujo.

Si $F = 1$ ; $V = \sqrt{gD}$	Estado crítico
Si $F < 1$ ; $V < \sqrt{gD}$	Flujo subcrítico
Si $F > 1$ ; $V > \sqrt{gD}$	Flujo supercrítico

**NOTA:** debido a que el flujo en la mayor parte de los canales está controlado por efectos gravitacionales, un modelo utilizado para simular un canal prototipo con propósitos de prueba debe ser diseñado teniendo en cuenta este efecto; es decir, el número Froude del flujo en el canal modelo debe ser igual al número de Froude del flujo en el canal prototipo, en el caso que se cuente uno disponible.

### 2.3.2.3 Fuerzas que Actúan Sobre un Fluido.

Las fuerzas que pueden intervenir en los problemas de mecánica de fluidos son:

- 1) La fuerza de gravedad.
- 2) La fuerza causada por la diferencia de presiones. (En fluido en reposo hay un gradiente de presione y la fuerza que este gradiente origina está en equilibrio con la fuerza de la gravedad).
- 3) La fuerza de viscosidad. (Nula en un fluido ideal).
- 4) La fuerza de la elasticidad.
- 5) La tensión superficial.

### 2.3.3 Energía del Flujo en canales abiertos

La energía total del agua en m·kg por kg de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección de canal puede expresarse como la altura total en metros de agua, que es igual a la

suma de la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad.

La energía total de cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección se define como la suma de las energías de posición, más la de presión y más la de velocidad, es decir: **ENERGIA TOTAL = Energía de posición + Energía de presión + Energía de velocidad**. En la figura 13 se muestra gráficamente la expresión antes mencionada.

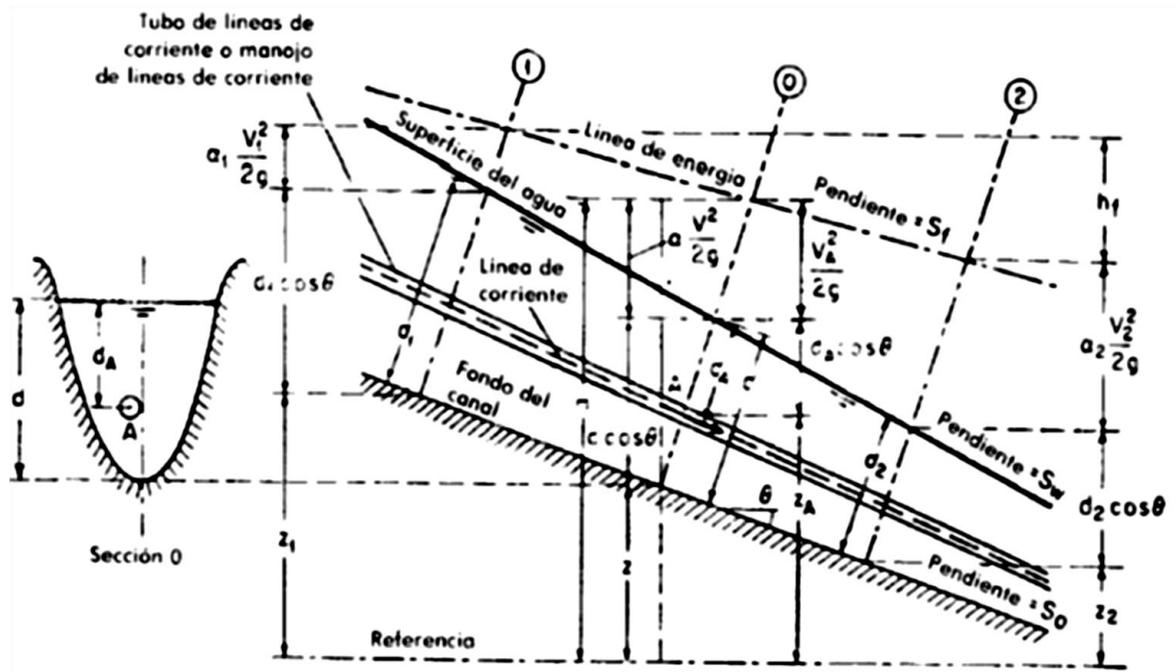


Figura 13 Energía Total en una sección de canal

### 2.3.3.1 Energía Específica.

La energía específica en una sección de canal se define como la **energía por unidad de masa de agua en cualquier sección de un canal medido con respecto al fondo de éste**. La energía específica se representa con la ecuación siguiente:

$$E = d * \cos\theta + \alpha \frac{v^2}{2 * g} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Ecuación válida para pendiente grande

$$E = y + \frac{v^2}{2 * g} = y + \frac{Q^2}{2 * g * A^2} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

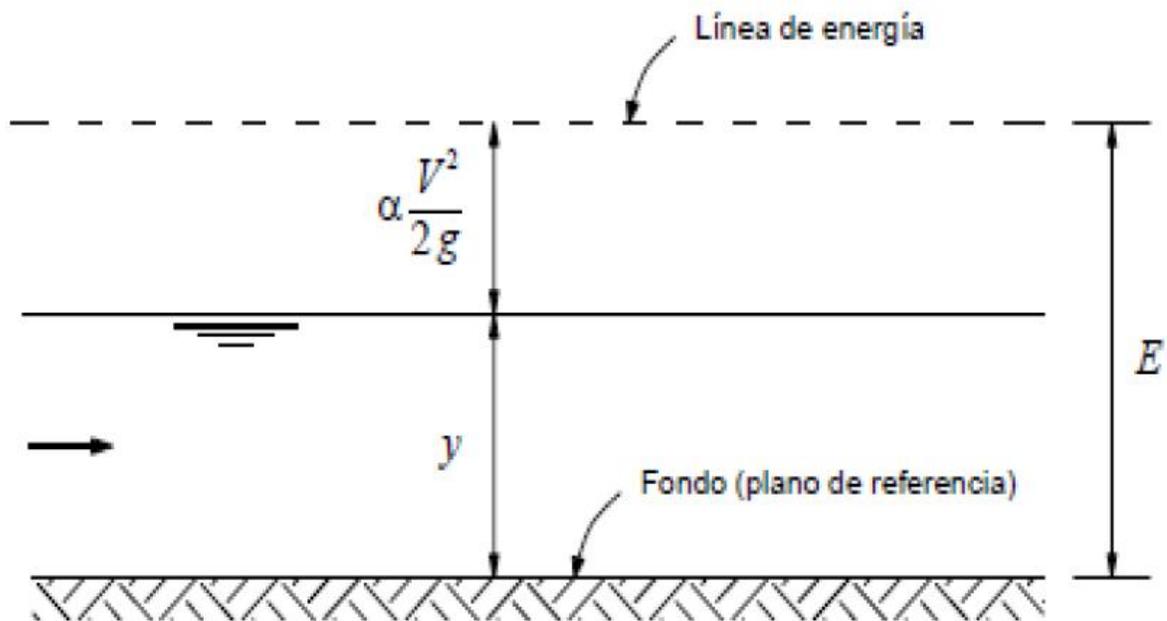
Ecuación válida para pendiente pequeña

$$(\alpha = 1)$$

Tomando:

La ecuación anterior como primer equivalencia representa a la energía específica que es igual a la suma de la profundidad del agua más la altura de velocidad y la segunda equivalencia puede notarse que para una sección de canal y un caudal  $Q$  determinados, la energía específica en una sección de canal solo es función de la profundidad de flujo, esta última se puede graficar contra la energía específica y se obtiene la **curva de energía específica**.

Para comprender de una mejor forma la ecuación de energía a continuación se presenta su interpretación, se aclara que es para un canal de pendiente baja.



**Figura 14 Interpretación de la energía específica**  
Fuente: Hidráulica de tuberías y canales; Arturo Rocha

A continuación se muestra un ejemplo de la curva de energía específica

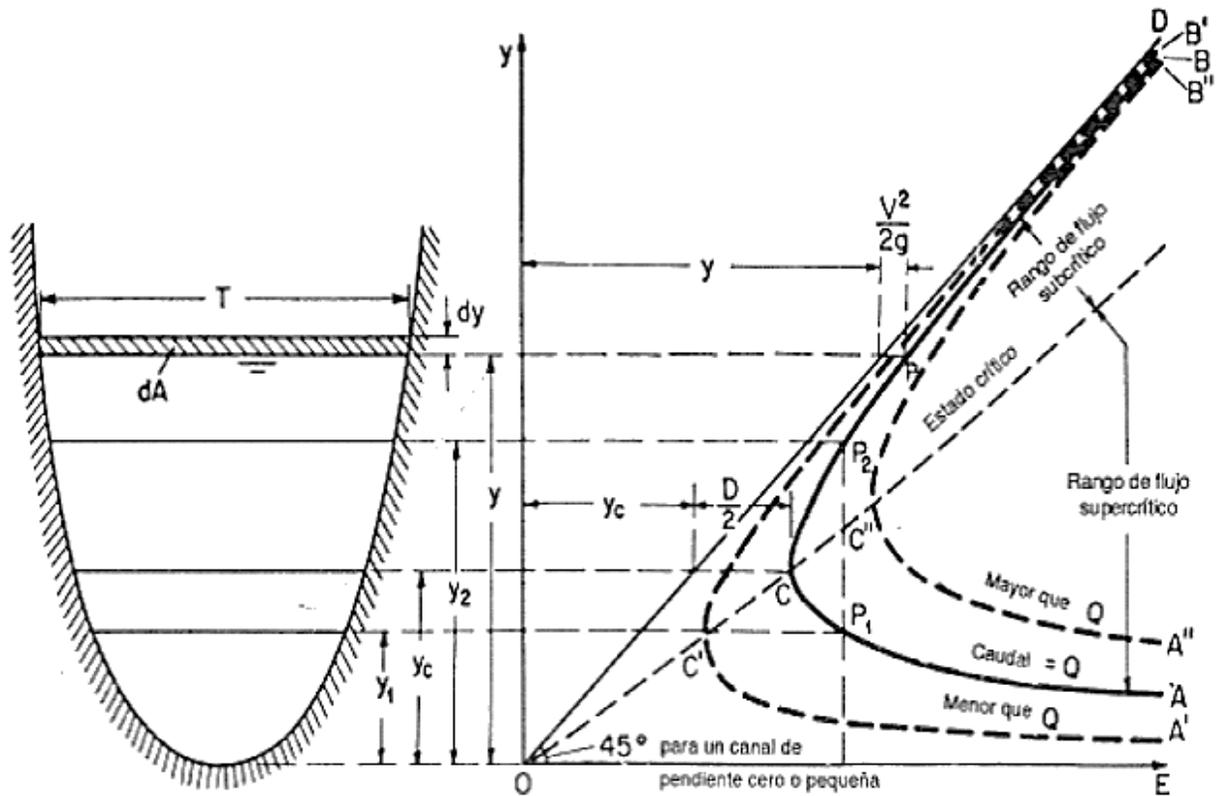


Figura15 Curva de energía específica  
 Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos; Ven Te Chow.

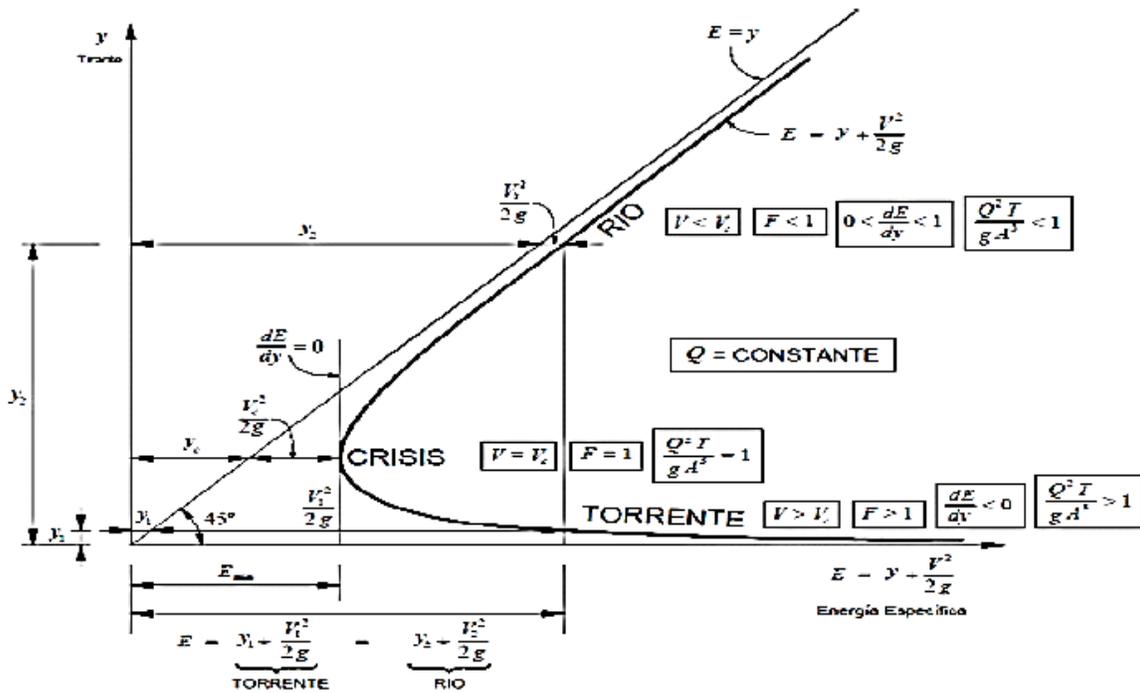


Figura. 16 Gráfico de la Energía Específica a gasto constante. (Curva E - y).

Dónde:

$y_1$  e  $y_2$  son las profundidades alternas ( $E_1 = E_2$ )

$$\frac{v_1^2}{2g} > \frac{v_2^2}{2g} \text{ ----- (flujo supercrítico) ----- } F > 1 (y_1 > y_c)$$

$$\frac{v_1^2}{2g} < \frac{v_2^2}{2g} \text{ ----- (flujo subcrítico) ----- } F < 1 (y_2 > y_c)$$

Si  $E < E_{min}$  no hay flujo posible del gasto  $Q$

### 2.3.3.2 Energía Específica, Condiciones Críticas Sección Rectangular.

La energía que corresponde a las condiciones críticas es:

$$E = y_c + \frac{v_c^2}{2g}$$

Recordando que, en un régimen crítico en sección rectangular la energía de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica o tirante crítico se tiene lo siguiente:

$$\frac{v_c^2}{2g} = \frac{y_c}{2}$$

De las dos anteriores ecuaciones, al combinarlas se obtiene lo siguiente:

$$y_c = \frac{2}{3} E$$

$$\frac{v_c^2}{2g} = \frac{1}{3} E$$

Esta es, pues, la proporción en la que se distribuye la energía, en condiciones críticas, en un canal rectangular (Arturo Rocha) (Ver la figura 17)

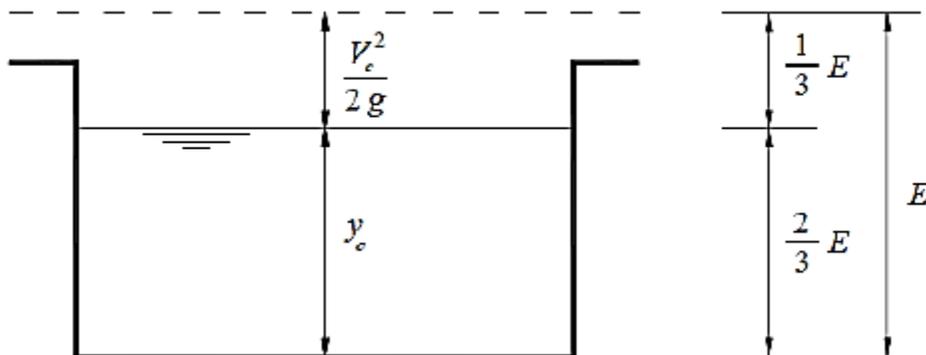


Figura. 17. Distribución de la Energía Específica en un canal rectangular

A continuación se presentan las expresiones para la profundidad hidráulica o tirante crítico en función del gasto específico:

$$V_c = \frac{Q}{A} = \frac{q}{y_c} = \sqrt{g y_c}$$

Entonces;

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = 0.467 q^{\frac{2}{3}}$$

### 2.3.4 Principio de Conservación de Momentum

El Principio de Conservación del Momentum proviene de la segunda Ley de Newton: La fuerza es igual a la masa por la aceleración:

$$\sum F_x = m * a \quad (\text{Cambio del Momentum}) \quad (\text{Ec. 2.5})$$

La variación del Momentum por unidad de tiempo es igual a la fuerza neta que actúa en el volumen de control. Aplicando la segunda Ley de Newton a un volumen de control, como el que se muestra en la Figura 2.10, se obtiene en la dirección x:

$$Q * \rho * \Delta V_x = P_2 - P_1 + W_x - F_f \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

$P_2$  y  $P_1$  = Fuerza de la presión hidrostática que actúa en el volumen de control en las secciones 1 y 2.

$W_x$  = Peso del agua en el volumen de control

$F_f$  = Fuerza externa de resistencia friccional a lo largo de la superficie mojada.

$Q$  = Caudal que pasa por el canal

$\rho$  = Densidad del agua

$\Delta V_x$  = Cambio de la velocidad del agua, en la dirección longitudinal x.

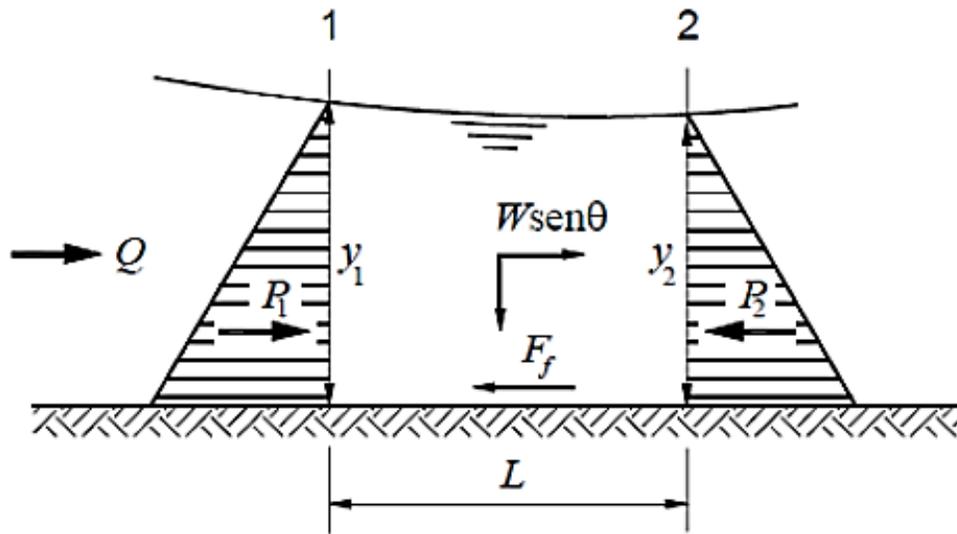


Figura 18 Aplicación del Principio de conservación del Momentum en un volumen de control

### 2.3.4.1 Fuerza de presión hidrostática

La fuerza en la dirección del canal, producto de la presión hidrostática es:

$$P = \gamma * A * \bar{Y} * \cos \alpha \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Se supone válida la distribución hidrostática de presiones para pendientes del lecho inferiores al 10% (aproximadamente 6 grados). El  $\cos \alpha$  para una pendiente de 6 grados es igual a 0,995. Dado que la pendiente de los canales, en la mayoría de los casos, es menor al 10%, el  $\cos \alpha$  se puede aproximar a la unidad.

Por lo tanto las expresiones para las fuerzas de presión hidrostática quedan como sigue:

$$P_1 = \gamma * A_1 * \bar{Y}_1 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$P_2 = \gamma * A_2 * \bar{Y}_2 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

donde:

$\gamma$  = Peso específico del agua

$A_1$  = Área transversal mojada de las secciones 1 y 2.

$\bar{Y}_1$  = Profundidad medida desde la superficie al centroide de las secciones transversales 1 y 2.

#### 2.3.4.2 Peso del agua

El peso del volumen de agua del volumen de control está dado por el producto entre el Volumen y el peso específico del agua:

$$W = \gamma * \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) * L \quad (\text{Ec. 2.10})$$

La fuerza del peso en la dirección del canal está dada por:

$$W_x = W * \text{sen } \alpha \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde L = Distancia entre las secciones 1 y 2 a lo largo del eje X.

#### 2.3.4.3 Fuerza de resistencia friccional

$$F_t = \tau * \bar{P} * L \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

$\tau$  = Tensión tangencial.

$\bar{P}$  = Perímetro mojado promedio entre las secciones 1 y 2.

$$\tau = \gamma * \bar{R} * \bar{S}_f \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:

$\bar{R}$  = Radio hidráulico promedio ( $R = A/P$ )

$\bar{S}_f$  = Pérdida friccional por unidad de longitud.

$$F_f = \gamma * \frac{A}{\bar{P}} * \bar{S}_f * \bar{P} * L \quad (\text{Ec. 2.14})$$

$$F_f = \gamma \cdot \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot \bar{S}_f \cdot L \quad (\text{Ec. 2.15})$$

#### 2.3.4.4 Variación del Momentum

$$m \cdot a = Q \cdot \rho \cdot \Delta V_x \quad (\text{Ec. 2.16})$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \text{y} \quad \Delta V_x = (\beta_1 \cdot V_1 - \beta_2 \cdot V_2) \quad (\text{Ec. 2.17})$$

$$m \cdot a = \frac{Q \cdot \gamma}{g} \cdot (\beta_1 \cdot V_1 - \beta_2 \cdot V_2) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Donde  $\beta$  es el Coeficiente de Momentum o de Boussinesq.

Al sustituir los resultados anteriores se obtiene lo siguiente:

$$\gamma \cdot A_2 \cdot \bar{Y}_2 - \gamma \cdot A_1 \cdot \bar{Y}_1 + \gamma \cdot \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \cdot \text{sen } \alpha - \gamma \cdot \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot \bar{S}_f \cdot L = \frac{Q \cdot \gamma}{g} \cdot (\beta_1 \cdot V_1 - \beta_2 \cdot V_2) \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Suponiendo que la velocidad es igual al caudal dividido por la sección:  $V = \frac{Q}{A}$  y que el caudal puede variar entre las secciones 1 y 2 se llega a lo siguiente:

$$\frac{Q_2^2 \cdot \beta_2}{g \cdot A_2} + A_2 \cdot \bar{Y}_2 + \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot L \cdot \text{sen } \alpha - \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) \cdot \bar{S}_f \cdot L = \frac{Q_1^2 \cdot \beta_1}{g \cdot A_1} + A_1 \cdot \bar{Y}_1 \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Sin embargo, como se menciona en el libro de Ven Te Chow (1959), se pueden ignorar el efecto de las fuerzas externas del peso del agua y de fricción para un tramo corto. Por lo que la ecuación (2.19) queda reducida a:

$$\frac{Q_2^2 \cdot \beta_2}{g \cdot A_2} + A_2 \cdot \bar{Y}_2 = \frac{Q_1^2 \cdot \beta_1}{g \cdot A_1} + A_1 \cdot \bar{Y}_1 \quad (\text{Ec. 2.21})$$

## 2.4 Transiciones en canales abiertos

### 2.4.1 Introducción

La transición (ver figura 19) es una estructura que se usa para ir modificando en forma gradual la sección transversal de un canal, cuando se tiene que unir dos tramos con diferente forma de sección transversal, pendiente o dirección. La finalidad de la transición es evitar que el paso de una sección a la siguiente, de dimensiones y características diferentes, se realice de un modo brusco, reduciendo así las pérdidas de carga en el canal. Las transiciones se diseñan tanto a la entrada como a la salida de diferentes estructuras tales como: Uniones de canales, tomas, rápidas, caídas, desarenadores, alcantarillas, sifones invertidos.

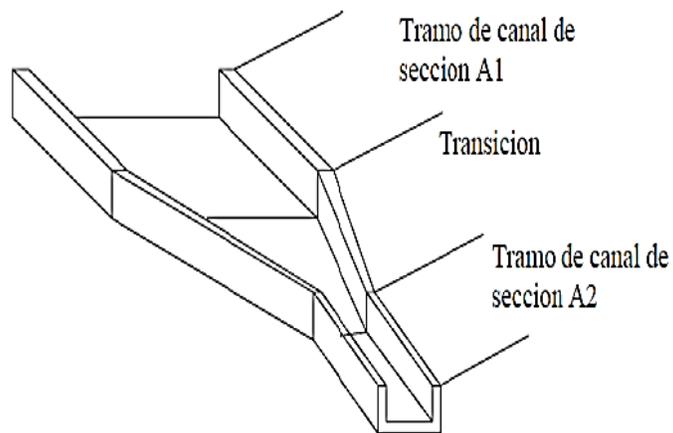


Figura 19 Transición de un canal

### 2.4.2 Transiciones en régimen Subcrítico

#### 2.4.2.1 Generalidades

La finalidad del diseño de estructuras de transición en flujo Subcrítico son las siguientes.

- Minimización de las pérdidas de energía por medio de estructuras económicamente justificables.
- Eliminación de las ondulaciones grandes y de los vórtices
- Eliminación de zonas con agua tranquila o flujo muy retardado.

Para los cálculos hidráulicos en las estructuras de transición con flujo Subcrítico se debe tomar en cuenta las siguientes hipótesis:

- Se supone que la pendiente de la línea de energía es constante en el tramo relativamente corto de la estructura de transición y, en ausencia de pérdidas locales, puede calcularse por tramos con la ayuda de la ecuación de Gauckler-Manning-Strickler:
- La velocidad varía principalmente en función de la distancia. Se supone que los factores  $\alpha$  y  $\beta$  son iguales a 1, o bien, pueden definirse para las secciones transversales extremas y efectuar una interpolación para las secciones intermedias.
- Los efectos de la curvatura del flujo pueden ignorarse, con lo que las distribuciones de presión resultan hidrostáticas. Se pueden dejar de considerar también las zonas de separación de flujo.

Para el cálculo hidráulico es de gran ayuda el diagrama de energía con las curvas  $H_0$ - $y$ .

Se recomienda trazar, con el caudal dado  $Q$ , una familia de curvas para varias secciones transversales de la estructura, como se indica en la figura 2.12, donde los cambios en la sección transversal de la estructura de transición están limitados únicamente a cambios en el ancho  $B$  del canal, de tal modo que las secciones transversales consecutivas están caracterizadas por valores definidos del caudal unitario  $q=Q/B$ .

Se supone que se conocen las secciones transversales de los canales aguas arriba y aguas abajo, los cuales deben ser unidos con la estructura de transición y también, el caudal, la profundidad de agua, la altura de energía en la sección transversal final y su forma.

Las dimensiones de las secciones transversales intermedias elegidas para la estructura pueden entonces determinarse de dos maneras:

1. Se selecciona un recorrido uniforme para la superficie libre del agua entre la sección transversal inicial y final, con lo que las cargas de velocidad intermedias quedan fijas, es decir, para cada sección transversal, se fija un determinado punto ( $y$ ,  $H_0$ ). Si se dibujan los valores así definidos para  $H_0$  a lo largo del eje central de la estructura de transición, se obtiene la ubicación del fondo del canal que correspondería al recorrido seleccionado de la superficie libre del agua.
2. Se selecciona un recorrido continuo y uniforme para el fondo del canal entre los puntos extremos de la estructura de transición. De este modo se fijan los valores de  $H_0$  para cada sección transversal intermedia y entonces, con ayuda de la figura 2.12, se puede definir la profundidad de agua " $y$ " correspondiente.

Es probable que luego del primer cálculo no se obtenga el perfil del fondo del canal, con el primer método, o el perfil de la superficie libre del agua, con el segundo método, tan uniforme y continuo

como sería deseable. Será necesario, entonces, repetir el procedimiento de cálculo según un ajuste iterativo apropiado hasta obtener una transición uniforme de la superficie libre del agua y del fondo del canal, o bien, modificar la separación entre las secciones transversales para las formas seleccionadas previamente o variar la forma misma de las secciones transversales.

### 2.4.2.2 Contracciones

Las diferentes posibilidades de diseño para estrechamientos en canales pueden explicarse, con ayuda de la figura 20, en el caso de un canal de sección rectangular.

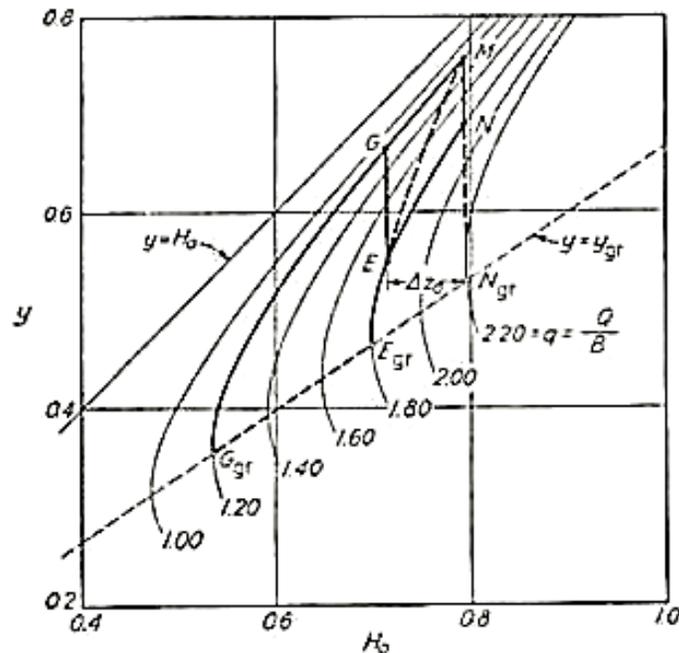


Figura 20 Curvas de la variación de la energía específica con la profundidad de agua para flujo Subcrítico  
Fuente: Hidráulica de Canales; Eduard Naudascher.

La reducción de la sección transversal puede efectuarse básicamente en dos formas: mediante una reducción de la profundidad y de agua, o por medio de una reducción del ancho B del canal. Se supone que el punto M en figura 19 representa las relaciones geométricas e hidráulicas existentes en el extremo aguas arriba del canal. El paso hacia las relaciones del extremo de aguas abajo, representadas por el punto E.

Por lo general, para un estrechamiento dado de la sección transversal a lo largo de MNE, resultan variaciones menores de la profundidad que a lo largo de la línea MGE.

Por esto, un diseño según la línea MNE, conducirá a una estructura de menor longitud, y con menores efectos de curvatura que un diseño según MGE. Siempre y cuando los puntos M y E permanezcan claramente en la zona de flujo Subcrítico (con  $Fr < 0.5$ ),

Con una contracción creciente del ancho del canal, el punto N se desplaza hacia abajo, hasta alcanzar finalmente el valor crítico  $N_c$ . El mínimo ancho del canal, para el cual el caudal  $Q$  todavía puede ser transportado con el valor constante de  $H_0$  y una profundidad  $y = y_c$

Cualquier contracción adicional de las paredes del canal producirá un remanso hacia aguas arriba. Igual resultado se obtiene, si la profundidad del canal es demasiado grande.

La consideración de pérdidas de energía a causa de la resistencia de las paredes o del rozamiento para estrechamientos en canales con flujo subcrítico, conduce por lo general a profundidades de agua algo menores, en comparación con los resultados sin consideración de pérdidas, como lo comprobaron las mediciones del U.S. Army Corps of Engineers y del U.S. Bureau of Reclamation. Para estrechamientos de canales, con ángulos en lo posible menores a  $12.5^\circ$  entre el eje de la estructura y la tangente a los lados en el punto de inflexión, recomienda Hinds (1928) la siguiente expresión para la pérdida de energía:

$$\Delta H = 0.10 \left( \frac{v_B^2}{2g} - \frac{v_A^2}{2g} \right) \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Es decir, una pérdida igual a la décima parte de la diferencia de cargas de velocidad en las secciones extremas de la estructura de transición. Esta pérdida debería repartirse proporcionalmente a los cambios locales de cargas de velocidad a lo largo de la estructura. Scobey comprobó esta recomendación. Su trabajo, junto con el de Hinds, proporciona, hasta el día de hoy, una presentación válida de los criterios de diseño para estructuras de transición.

Los resultados conducen a las siguientes expresiones:

$$\Delta h_f = 0.23V_B^2/2g \text{ para contracciones bruscas en canales rectangulares}$$

$$\Delta h_f = 0.11V_B^2/2g \text{ para contracciones redondeadas}$$

Estos valores son variables y dependientes de la relación profundidad/ancho en la sección de salida. Alcanzan los valores máximos indicados para la relación  $y_B/B_B = 1.3$ . Si se tienen relaciones profundidad/ancho,  $y_B/B_B < 1$ , los valores llegan a ser tales que:

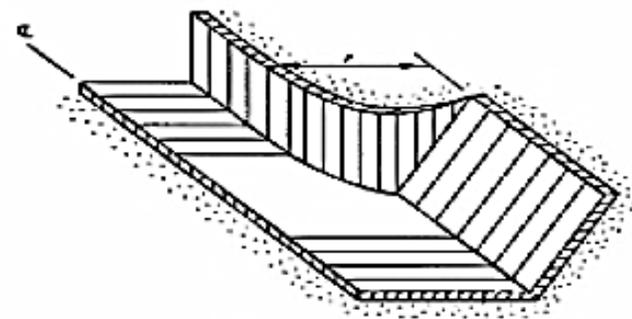
$$\Delta h_f = 0.10V_B^2/2g \text{ para las contracciones bruscas y } \Delta h_f = 0.04V_B^2/2g \text{ para las contracciones redondeadas.}$$

Yarnell propone finalmente valores más altos e iguales a  $\Delta h_f = 0.35V_B^2/2g$  y  $\Delta h_f = 0.18V_B^2/2g$  para las contracciones bruscas y redondeadas respectivamente.

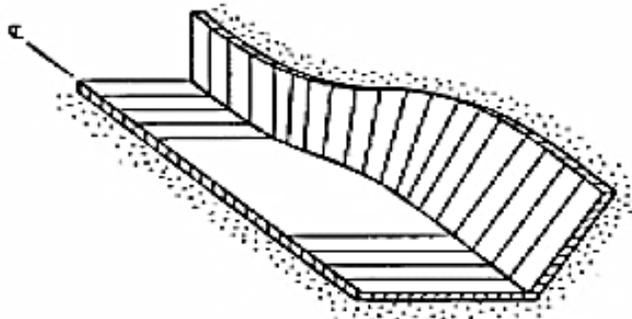
Este autor no reporta la influencia del parámetro  $y_B/B_B$ .

La formación de ondas en la transición modifica las características del flujo a lo largo de la estructura. Si la reducción de la sección transversal es siempre gradual y suave no se espera que se presenten ondas, a menos que el flujo en la sección de salida esté muy cerca de ser flujo crítico. Las estructuras de transición de un canal trapezoidal a uno rectangular pueden agruparse en tres tipos como se muestran en la figura 21:

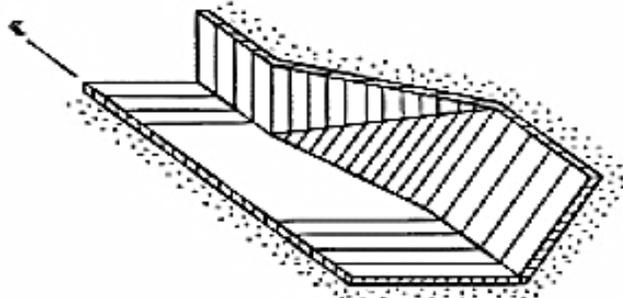
Las formas a) y b) no son recomendables para altas velocidades, mientras que la forma c) tiene uso restringido para canales pequeños en flujo subcrítico por su costo de construcción. El número de Froude para estos tipos de estructuras está limitado a valores de  $Fr < 0.50$ .



TRANSICION CON CURVATURA SIMPLE



TRANSICIÓN CON CURVATURA DOBLE



TRANSICIÓN DE FORMA CÓNICA

Figura 21 Transiciones típicas para flujo Subcrítico  
Fuente: Hidráulica de Canales; Eduard Naudascher.

### 2.4.2.3 Ensanchamientos

Los métodos de cálculo y las recomendaciones para diseño que han sido analizadas en el párrafo anterior, también pueden ser utilizados, en su mayoría, para ensanchamientos en un canal con régimen Subcrítico. Una diferencia básica radica en la limitada posibilidad práctica de recuperar la energía cinética en la corriente que se expande, debido a la tendencia del flujo retardado a separarse de la pared. Por esta razón, se debe prestar aquí mayor atención al diseño de las paredes y a la determinación de las pérdidas de energía que para el caso de un estrechamiento.

En los ensanchamientos de canales, aún curvaturas moderadas de las paredes conducen a un crecimiento brusco de las zonas con fluido retardado; las distribuciones de velocidad llegan a ser

fuertemente no uniformes, es decir, los coeficientes de corrección  $\alpha$  y  $\beta$  alcanzan valores numéricos grandes; y finalmente, pueden, presentarse zonas con separación del flujo junto a las paredes.

Esta tendencia a la separación se acentúa a través de cambios mínimos de dirección en el flujo de aproximación, que pueden ser generados, por ejemplo, por curvas en la zona de aguas arriba. Sobre todo, se deben evitar tales separaciones del flujo cuando existe la posibilidad de que se formen depósitos de material en la estructura de transición, si el agua transporta material en suspensión o de arrastre, o cuando la estructura de transición se conecta con canales de fondo y taludes erosionables.

Las transiciones circulares del tipo a) producen una recuperación de hasta el 67% de la energía cinética mientras las transiciones del tipo b) y c) de la figura 2.13 producen hasta el 80%-90% de la recuperación de la energía cinética. Estas expansiones deben tener una longitud tal, que la línea que unen las superficies libres de las secciones de entrada y de salida formen un ángulo siempre menor a  $12.5^\circ$  con el eje de la estructura. El uso de muros o pantallas directrices dentro de la transición es frecuente, dado que mejora la eficiencia para prevenir las zonas de separación.

### 2.4.3 Transiciones en régimen supercrítico

#### 2.4.3.1 Generalidades

Consideremos un canal rectangular con flujo supercrítico. Si una de las paredes del canal cambia su alineamiento cerrándose un ángulo  $\Theta$  como indica la figura 22, la profundidad del flujo  $y_1$  crecerá abruptamente a una profundidad  $y_2$  a lo largo del frente de la onda CD que forma un ángulo  $\beta$  con la dirección discontinuada de la pared.

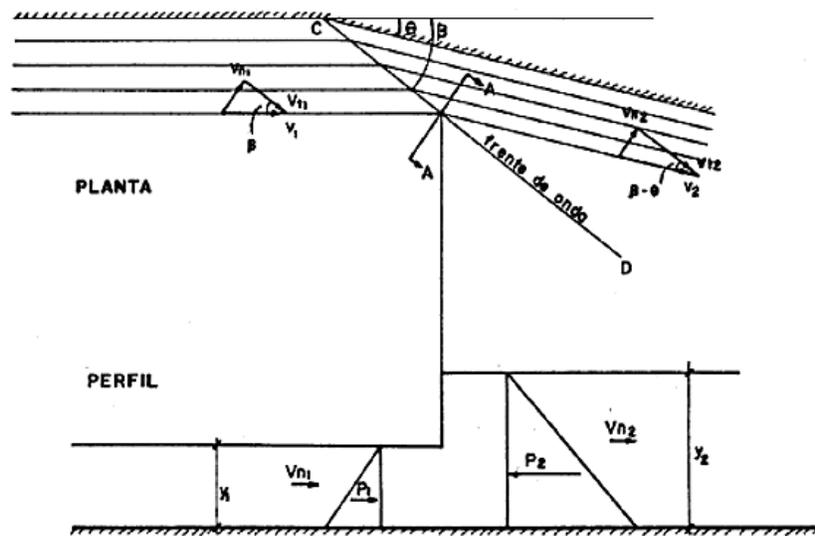


Figura 22 Diagrama de flujo para las líneas de corriente en un cambio de dirección en flujo supercrítico

Fuente: Mecánica de Fluidos 2; Wendor Chereque Moran.

Este fenómeno se parece a un resalto hidráulico ordinario pero con el cambio de profundidad ocurriendo a lo largo de un frente oblicuo, razón por la cual se le llama resalto hidráulico oblicuo o simplemente salto oblicuo.

Nótese cómo el salto ordinario es un caso particular del salto oblicuo con  $\Theta = 0^\circ$  y  $\beta = 90^\circ$ .

Del diagrama vectorial de velocidades antes del resalto:

$$V_{n1} = V_1 \sin \beta \quad (\text{Ec. 2.23})$$

de modo que:

$$F_{n1} = \frac{V_{n1}}{\sqrt{g y_1}} = \frac{V_1 \cdot \sin \beta}{\sqrt{g y_1}} = F_1 \cdot \sin \beta \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Considerando una sección A-A normal al frente de onda se observa, que en esta sección ocurre un salto ordinario; reemplazando 2.24 en

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

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_1^2 \cdot \sin^2 \beta} - 1 \right) \quad (\text{Ec. 2.25})$$

De los diagramas vectoriales de velocidades:

$$V_{t1} = \frac{V_{n1}}{\tan \beta} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$$V_{t2} = \frac{V_{n2}}{\tan(\beta - \theta)} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Estas dos velocidades son iguales porque no se produce cambio de Momentum paralelo al frente de onda; luego:

$$\frac{V_{n1}}{V_{n2}} = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \theta)} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

por continuidad

$$y_1 \cdot V_{n1} = y_2 \cdot V_{n2} \quad \rightarrow \quad \frac{V_{n1}}{V_{n2}} = \frac{y_2}{y_1} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

De modo que:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \theta)} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Igualando los segundos miembros de las ecuaciones 2.25 y 2.30 se obtiene una relación, entre  $F_1$ ,  $\theta$  y  $\beta$ ; por ejemplo:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{tg} \beta \cdot \left( \sqrt{1 + 8F_1^2 \cdot \operatorname{sen}^2 \beta} - 3 \right)}{2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + \sqrt{1 + 8F_1^2 \cdot \operatorname{sen}^2 \beta} - 1} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

La intención es que se pueda determinar  $\beta$  para un par de valores  $F_1$ ,  $\theta$ . Como esto es analíticamente engorroso. Ippen confeccionó un gráfico de cuatro cuadrantes mostrando las relaciones contenidas en 2.25, 2.30 y 2.31.

Con este gráfico es muy simple dar solución al problema del salto oblicuo.

En los problemas prácticos en que se presenta salto oblicuo el valor  $y_2/y_1$  es generalmente pequeño, de modo que la pérdida de energía resulta también muy pequeña.

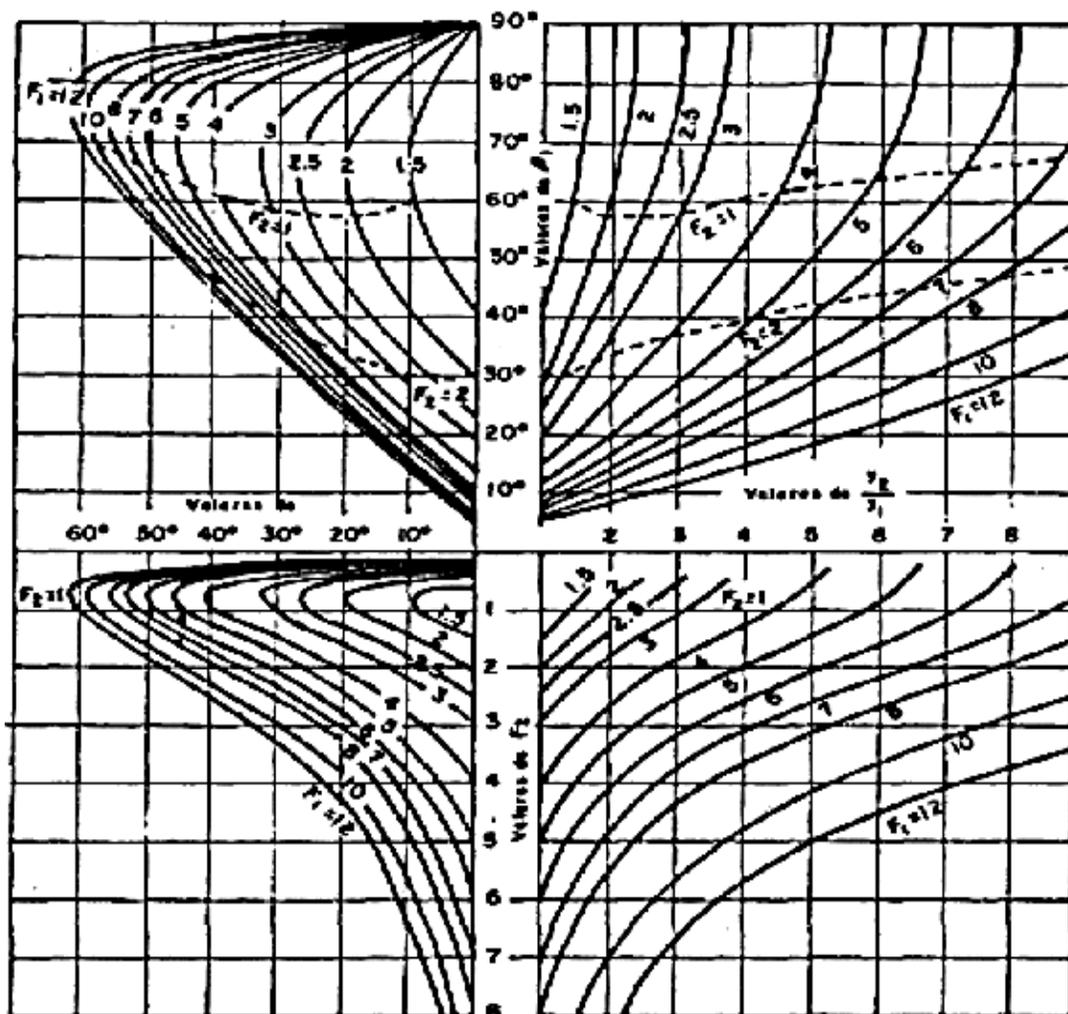


Figura 23 Relaciones generales entre  $Fr_1$ ,  $\theta$ ,  $\beta$ ,  $y_1/y_2$ ,  $Fr_2$ , para el análisis de contracciones en régimen supercrítico.

Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos; Ven Te Chow.

### 2.4.3.2 Contracciones

Las experiencias indican que de todas maneras se producen ondas cruzadas simétricas con respecto al eje del canal. También, que mejor comportamiento tienen las contracciones rectas que las contracciones curvas de igual longitud, en cuanto que la sobreelevación es menor,

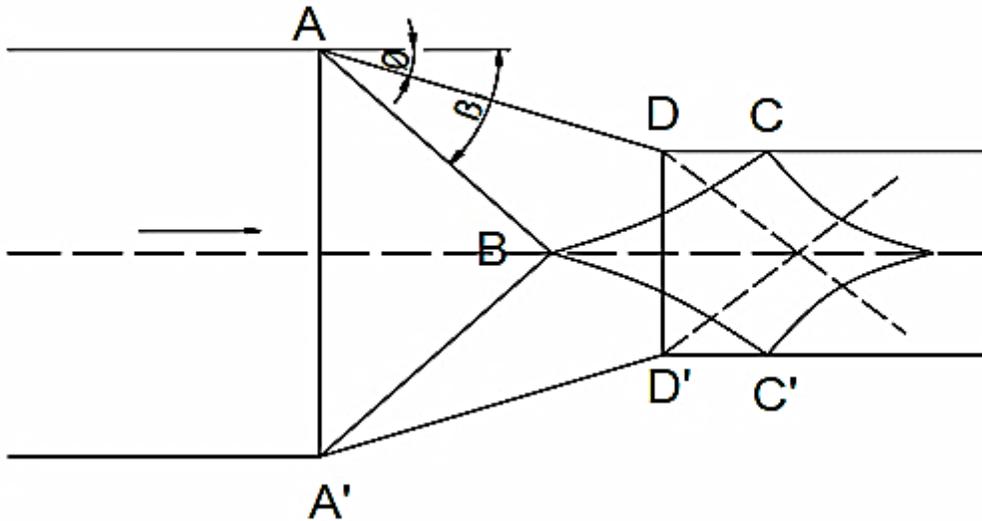


Figura 24 Diseño incorrecto de una contracción con flujo supercrítico.

En los puntos A, A' se desarrollan ondas de choque positivas simétrica de ángulo  $\beta_1$ ; estas ondas se interceptan en B y alcanzan las paredes en C, C'. A su vez, en los puntos D, D' aparecen ondas negativas que junto con las anteriores configuran un gran disturbio que se propaga aguas abajo. El disturbio descrito puede ser minimizado dimensionando la transición de modo que los puntos C, C' coincidan con los puntos D, D', respectivamente.

De la geometría de la transición se obtiene:

$$L = \frac{b_1 - b_3}{2 \cdot \tan \theta} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

De la ecuación de continuidad se obtiene:

$$Q = b_1 \cdot y_1 \cdot V_1 = b_3 \cdot y_3 \cdot V_3 \quad (\text{Ec. 2.33})$$

$$\frac{b_1}{b_3} = \frac{y_3 \cdot V_3}{y_1 \cdot V_1} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

como

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{V_2}{\sqrt{g \cdot y_3}} \cdot \frac{\sqrt{g \cdot y_1}}{V_1} = \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{y_1^{1/2}}{y_3^{1/2}} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{y_3^{1/2}}{y_1^{1/2}} \cdot \frac{F_2}{F_1} \quad (\text{Ec. 2.35})$$

queda

$$\frac{b_1}{b_3} = \left(\frac{y_3}{y_1}\right)^{3/2} \cdot \frac{F_2}{F_1} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

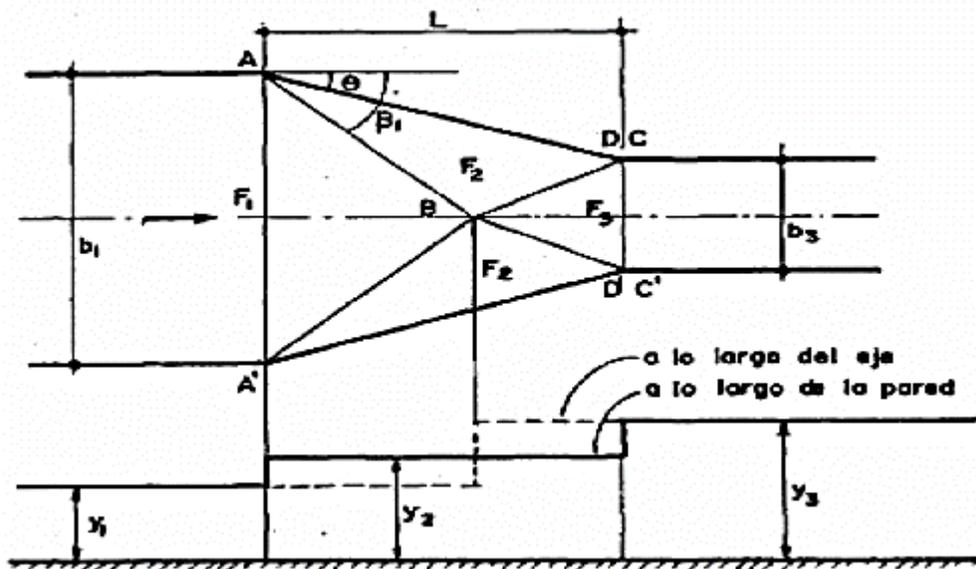


Figura 25 Diseño adecuado de una contracción con flujo supercrítico.  
Fuente: Mecánica de Fluidos 2; Wendor Chereque Moran.

Con las ecuaciones (2.32) y (2.36) y la gráfica del salto oblicuo (figura 25) se procede al diseño de transiciones.

### 2.4.3.3 Ensanchamientos

De todas las transiciones, las divergentes en régimen supercrítico son las de más difícil tratamiento debido a la tendencia del flujo a separarse de las paredes y a la formación del disturbio de ondas cruzadas. En los canales importantes se sugiere el estudio de la transición en modelo, pudiendo servir para un dimensionamiento preliminar las pautas siguientes, fruto del análisis y la experimentación.

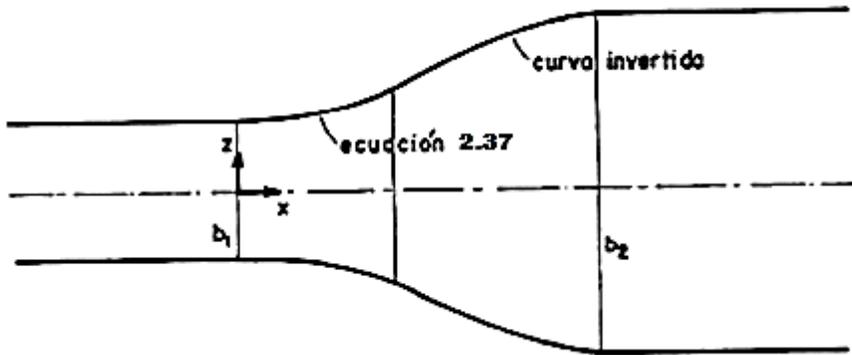


Figura 26 Ensanchamiento en un canal con flujo supercrítico.  
Fuente: Mecánica de Fluidos 2; Wendor Chereque Moran.

1) Iniciar la transición con paredes curvadas hacia afuera, según la ecuación 2.37:

$$\frac{z}{b_1} = \frac{1}{2} + \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{x}{b_1 \cdot F_1} \right)^{3/2} \quad (\text{Ec. 2.37})$$

2) Terminar la transición con las paredes curvadas hacia adentro, según las curvas generalizadas de la gráfica adjunta

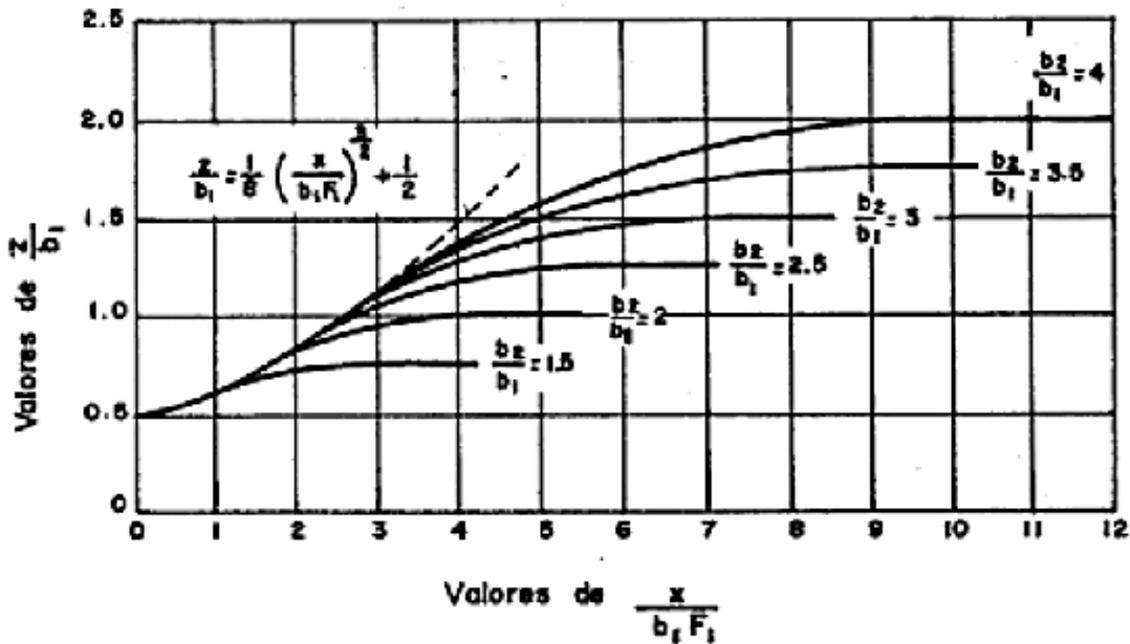


Figura 27 Curvas generalizadas de contorno, para divergencias en régimen supercrítico.  
Fuente: Hidráulica de Canales Abiertos; Ven Te Chow.

## CAPÍTULO III

### UNIÓN EN CANALES ABIERTOS (CONFLUENCIAS)

#### 3.1. Introducción

Para conocer el grado de avance en el estudio del comportamiento de la unión de dos canales se revisó la literatura concerniente al tema, teniendo presente la dificultad que han tenido los diversos autores para desarrollar una teoría general que sea capaz de predecir con exactitud lo que ocurre en una unión de dos canales abiertos.

En el libro Hidráulica de Canales Abiertos de Ven Te Chow, basado en las investigaciones desarrolladas por Taylor, se estudió el comportamiento de la confluencia de dos canales horizontales de igual ancho y régimen Subcrítico o también llamado régimen tranquilo, configuración que se esquematiza en la figura 30. Para este caso se hicieron los siguientes supuestos:

1. El flujo pasa de los canales 1 y 2 al canal 3.
2. Los ejes de los canales 1 y 3 son colineales.
3. El flujo es paralelo a las paredes del canal y la velocidad se distribuye en forma uniforme inmediatamente antes y después de la confluencia.
4. La fuerza tangencial debido a la fricción es despreciable respecto a las otras fuerzas que actúan.
5. Las alturas de escurrimiento son idénticas inmediatamente aguas arriba de la confluencia en ambos canales ya que ambos caudales están influenciados desde aguas abajo.

Mediante ensayos realizados, Taylor determinó que la ecuación (Ec. 3.10) es lo suficientemente precisa para un ángulo de  $45^\circ$ , mientras que para un ángulo de  $135^\circ$  hay diferencias importantes entre los valores teóricos y los experimentales. Él lo atribuye a que el flujo no permanecía paralelo a las paredes del canal. Por otro lado, se verificó que las profundidades inmediatamente aguas arriba de la confluencia eran aproximadamente iguales independientemente del ángulo de intersección.

Por otro lado, las experiencias desarrolladas por el U.S. Soil Conservation Service, también citadas en el libro de Chow, se refieren a confluencias entre canales con régimen supercrítico.

Señala que se puede formar un resalto hidráulico aguas arriba de la confluencia en uno de los canales o en ambos, de manera que hay que conocer la posición de éste o la profundidad de escurrimiento aguas arriba de la confluencia para determinar el momentum al que contribuyen

los flujos de entrada. Debido a la formación del resalto puede ser necesario el aumento de la altura de los muros en la vecindad de la confluencia. Además, si no se produce resalto las condiciones del flujo se vuelven aún más complicadas debido a la formación de ondas cruzadas las cuales se propagan hacia aguas abajo por una distancia considerable, por lo que se puede necesitar un aumento en la altura de las paredes en la confluencia y aguas abajo de ésta.

### **3.2 Unión de dos canales en régimen Subcrítico**

#### **3.2.1 Teoría y Suposiciones en Flujo Subcrítico**

a) Las siguientes teorías y suposiciones son hechas para combinar flujos tranquilos en la confluencia de dos canales:

1. La sección transversal del canal lateral es de la misma forma de la sección transversal del canal principal.
2. Las pendientes de fondo son iguales para el canal principal y el canal lateral.
3. Los flujos son paralelos a las paredes del canal inmediatamente por encima y abajo de la unión.
4. Las profundidades son iguales inmediatamente por encima de la unión tanto en canales laterales y principales.
5. La velocidad es uniforme en las secciones transversales inmediatamente por encima y debajo de la unión

La suposición (3) significa que se asume una distribuciones hidrostática de presiones, y la suposición (5) sugiere que los factores de corrección de Momentum sea igual para el uno y otro en lo referente a las secciones.

b) El uso de la ecuación de Momentum en el análisis de problemas de flujo se discute en detalle a continuación.

#### **3.2.2 Deducción de la Ecuación General para uniones de canales, basado en el Principio de Conservación del Momentum.**

Si aplicamos el Principio de Conservación del Momentum a un volumen de control como el que se muestra en la Figura 27 y 28, podremos obtener una relación entre las alturas de escurrimiento de los canales de entrada y el de salida.

Haciendo sumatoria de fuerzas en la dirección del canal principal (dirección x) se obtiene las siguientes relaciones:

La fuerza neta actuando en la dirección del canal principal es dada por:

$$F_{1-3} = P_1 + P_2 \cdot \cos \delta + W \cdot \text{sen } \theta - F_f - P_3 - U \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde:

$P_1, P_2$  y  $P_3$  = fuerza de la presión hidrostática que actúa en el volumen de control en las secciones 1, 2 y 3.

$\delta$  = ángulo de la intersección de la confluencia.

$W$  = peso del agua en el volumen de control.

$\theta$  = ángulo de la pendiente del canal ( $\tan \theta$  = pendiente del canal)

$F_f$  = fuerza externa de resistencia friccional a lo largo de la superficie mojada.

$U$  = fuerza normal ejercida por las paredes laterales en la dirección aguas arriba.

El cambio en el Momentum en la dirección al canal principal es:

$$F_{1-3} = \frac{\gamma}{g} \cdot Q_3 \cdot V_3 - \frac{\gamma}{g} \cdot Q_1 \cdot V_1 - \frac{\gamma}{g} \cdot Q_2 \cdot V_2 \cdot \cos \delta \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

$Q_1, Q_2, Q_3$  = caudal en el canal apropiado

$V_1, V_2, V_3$  = velocidad promedio del canal en la sección de referencia

$g$  = aceleración de la gravedad

$\gamma$  = peso específico del agua

El cambio en el Momentum por unidad de tiempo en el volumen de control es igual a la fuerza neta actuando sobre el volumen de control (Segunda Ley de Newton).

$$\frac{\gamma}{g} \cdot Q_3 \cdot V_3 - \frac{\gamma}{g} \cdot Q_1 \cdot V_1 - \frac{\gamma}{g} \cdot Q_2 \cdot V_2 \cdot \cos \delta = P_1 + P_2 \cdot \cos \delta + W \cdot \text{sen } \theta - F_f - P_3 - U$$

(Ec. 3.3)

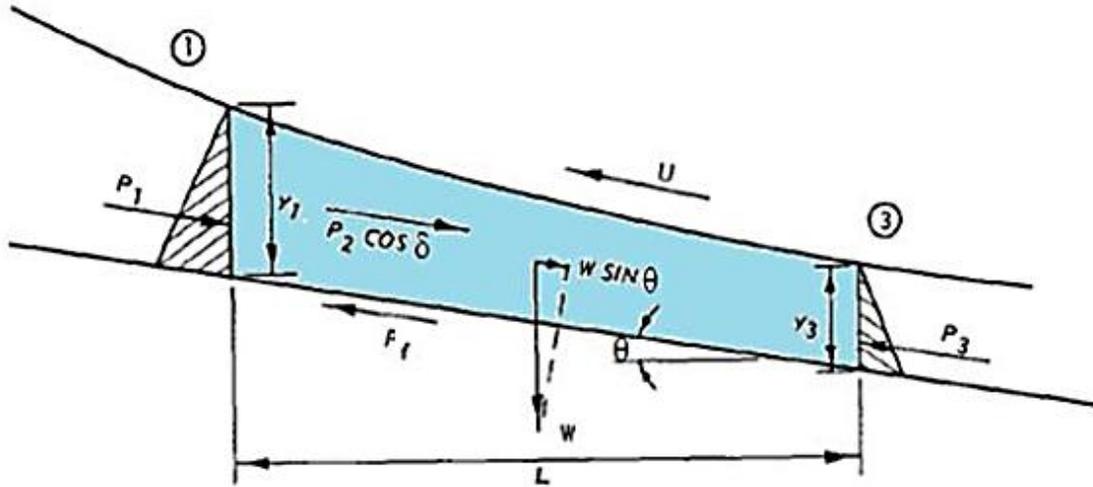


Figura 28 Perfil a lo largo del canal principal en una confluencia de canales  
Fuente: Hydraulic design of flood control channels.

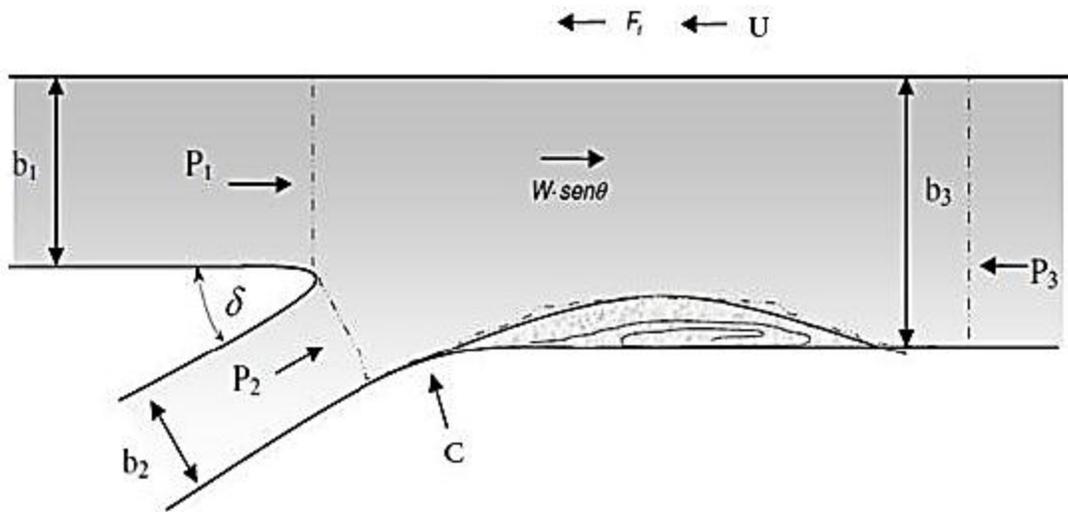


Figura 29 Aplicación del Principio de Conservación del Momentum en un volumen de control de una confluencia de canales

Para la simplificación de la ecuación se tomara en consideración los siguientes criterios:

La presión hidrostática ejercida por el flujo en el canal 2 es balanceada por la presión en la pared opuesta (C) y que la fuerza friccional es contrarrestada con la componente horizontal del peso en forma aproximada. (Ver figura 29)

$$U = P_2 \cdot \cos \delta \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$F_f = W \cdot \text{sen } \theta \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{Q_3^2 \cdot \beta_3}{g \cdot A_3} + A_3 \cdot \bar{Y}_3 = \frac{Q_1^2 \cdot \beta_1}{g \cdot A_1} + A_1 \cdot \bar{Y}_1 + \frac{Q_2^2 \cdot \beta_2}{g \cdot A_2} \cdot \cos \delta \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Suponiendo  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1$ , obtenemos la Ecuación General para confluencias en canales.

Suponiendo que la presión hidrostática ejercida por el flujo en el canal 2 es balanceada por la presión en la pared opuesta (U) y que la fuerza friccional es contrarrestada con la componente horizontal del peso en forma aproximada, se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{Q_3^2}{g \cdot A_3} + A_3 \cdot \bar{Y}_3 = \frac{Q_1^2}{g \cdot A_1} + A_1 \cdot \bar{Y}_1 + \frac{Q_2^2}{g \cdot A_2} \cdot \cos \delta \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Con respecto a lo representado en la figura 29, es decir, la separación del flujo después de la unión entre los dos canales, se puede decir que sobre esta zona las líneas de corriente dejan de ser paralelas, con lo que la Ley Hidrostática de Presiones deja de ser válida. Esta separación del flujo de las paredes del canal, se debe a que el caudal proveniente del canal lateral se une al canal principal con un ángulo  $\delta$ , cambiando la dirección del flujo principal. Por lo tanto para reducir este efecto, es conveniente escoger un ángulo de confluencia pequeño.

### 3.2.3 Ecuación para uniones de canales de sección rectangular

Al aplicar el Principio de Conservación del Momentum en la confluencia entre canales de sección rectangular del mismo ancho como la que se muestra en la Figura 30 con una pendiente menor al 10% del canal principal, se llega a la Ecuación 3.10

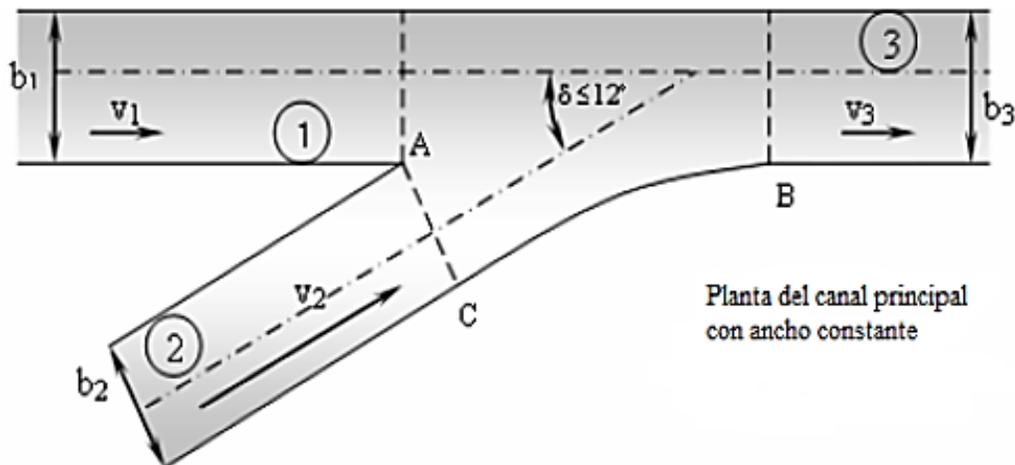


Figura 30 Aplicación del Principio de Conservación del Momentum en la confluencia entre dos canales, con ancho del canal principal constante

Como es de conocimiento en un canal de sección rectangular el área transversal mojada y la profundidad medida desde la superficie al centroide de la sección son las siguientes.

$$A_1 = by_1 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$\bar{Y}_1 = \frac{y_1}{2} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Reemplazando las ecuaciones 3.8 y 3.9 en 3.7 tenemos la ecuación para unión de dos canales rectangulares, sin variantes en la sección del canal principal,

$$\frac{Q_3^2}{g \cdot A_3} + \frac{by_3^2}{2} = \frac{Q_1^2}{g \cdot A_1} + \frac{Q_2^2}{g \cdot A_2} \cdot \cos \delta + \frac{by_1^2}{2} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

### 3.2.4 Simplificación de la Ecuación para uniones de canales trapezoidales

La distribución hidrostática de presiones en una sección trapezoidal, está dada por:

$$P = A \cdot \bar{Y} = y^2 \cdot \left( \frac{b}{2} + \frac{Z \cdot y}{3} \right) \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

$\bar{Y}$  = distancia del centroide de la superficie mojada medida desde la superficie.

$y$  = profundidad de flujo.

$b$  = ancho inferior de la sección trapezoidal.

$Z$  = pendiente lateral.

Al introducir este término con los subíndices apropiados en la ecuación general del momentum para confluencias, nos dará lo siguiente:

$$\frac{Q_3^2}{g \cdot A_3} + y_3^2 \cdot \left( \frac{b_3}{2} + \frac{Z \cdot y_3}{3} \right) = \frac{Q_1^2}{g \cdot A_1} + \frac{Q_2^2}{g \cdot A_2} \cdot \cos \delta + y_1^2 \cdot \left( \frac{b_1}{2} + \frac{Z \cdot y_1}{3} \right) \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Esta ecuación es útil para cuando se tiene una confluencia entre dos canales trapezoidales o sección rectangular en el canal lateral y una de sección trapezoidal en el canal principal.

*La deducción de las ecuaciones para confluencias de canales de diferente sección a las encontradas, es factible, pero este trabajo está enfocado en las dos secciones que comúnmente se utiliza en los diferentes proyectos en nuestro país, en mención a las secciones rectangulares y trapezoidales, para un mejor entendimiento del problema de unión de canales.*

### 3.2.5 Ecuación para uniones de canales con ancho del canal principal variable

#### 3.2.5.1 Canales rectangulares

La derivación de la ecuación del Momentum para el canal rectangular con ancho variable es muy similar a como se hizo anteriormente. La figura 31 es un bosquejo para este tipo de confluencia. La única fuerza adicional es esa fuerza de la presión no balanceada por la pared curvada DC. La presión  $\Delta P_1$  es la componente en la dirección del canal principal de la presión hidrostática que

actúa sobre el ancho EF en la sección 2. El ancho efectivo para calcular  $\Delta P1$  es  $(b_3 - b_1)$  y la presión es:

$$\Delta P1 = \gamma \left( \frac{b_3 - b_1}{2} \right) y^2 \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Agregando subíndices apropiados y omitiendo  $\gamma$  para la simplicidad, la ecuación del Momentum queda como sigue:

$$\frac{Q_3^2}{g \cdot A_3} + \frac{b_3 y_3^2}{2} = \frac{Q_1^2}{g \cdot A_1} + \frac{Q_2^2}{g \cdot A_2} \cdot \cos \delta + \frac{b_1 y_1^2}{2} + \left( \frac{b_3 - b_1}{2} \right) y_1^2 \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Esto se puede simplificar aún más, con lo que queda:

$$\frac{Q_3^2}{g \cdot A_3} + \frac{b_3 y_3^2}{2} = \frac{Q_1^2}{g \cdot A_1} + \frac{Q_2^2}{g \cdot A_2} \cdot \cos \delta + \frac{b_3 y_1^2}{2} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

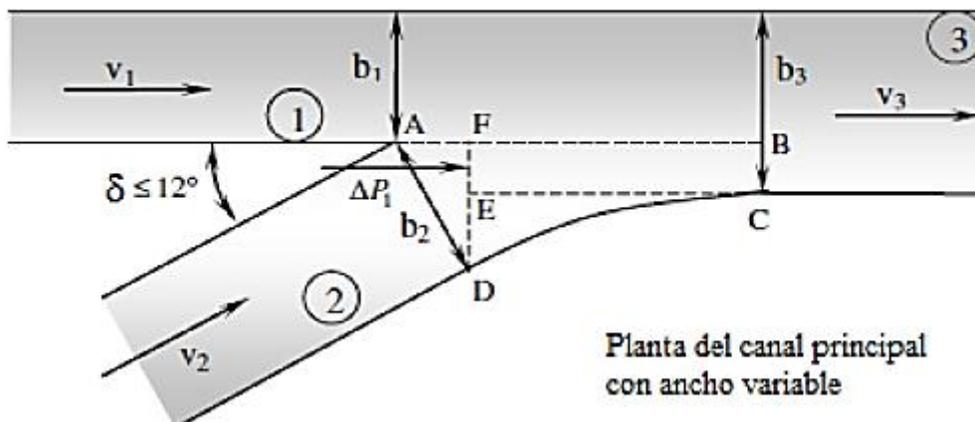


Figura 31 Aplicación del Momentum en la confluencia entre dos canales de distinto ancho y ensanche del canal principal

### 3.2.5.2 Canales trapezoidales

La ecuación para anchos desiguales de canales trapezoidal se deriva de la misma manera que para los canales rectangulares de ancho desigual explicado anteriormente. La inclusión de los términos de la distribución hidrostática de la presión para una sección trapezoidal nos lleva al siguiente resultado:

$$\frac{Q_3^2}{g \cdot A_3} + y_3^2 \cdot \left( \frac{b_3}{2} + \frac{Z \cdot y_3}{3} \right) = \frac{Q_1^2}{g \cdot A_1} + \frac{Q_2^2}{g \cdot A_2} \cdot \cos \delta + y_1^2 \cdot \left( \frac{b_3}{2} + \frac{Z \cdot y_1}{3} \right) \quad (\text{Ec. 3.16})$$

### **3.2.6 Criterios de diseño de confluencias en régimen Subcrítico**

Los resultados de los experimentos realizados por la oficina del Distrito de Los Ángeles (LAD), indican que hay reglas generales o criterios para el diseño de confluencias entre canales. Gildea y Wong han resumido algunos de estos criterios:

- a). La elevación de los niveles de agua en las secciones de aguas arriba del canal principal y del canal secundario o lateral, es aproximadamente la misma. Esta suposición es una buena aproximación para flujos Subcrítico, que dependen de lo que ocurre aguas abajo y no siempre se cumple para flujos supercríticos que dependen de aguas arriba, ya que la altura de escurrimiento depende del tipo de sección y de las pendientes de los canales.
- b). El ángulo de intersección de los ejes de los canales confluyentes debe ser en lo posible muy pequeño y no mayor a  $12^\circ$  para evitar la separación del flujo en la unión.
- c). Se puede llegar a un diseño favorable aumentando algo el ancho de la sección de aguas abajo del canal saliente, con respecto a la del canal principal aguas arriba de la confluencia.
- d). La profundidad en un flujo supercrítico no debe exceder del 90% de la altura crítica (el número de Froude no debe ser inferior a 1.13) para mantener un escurrimiento rápido, estable en la zona de la unión de los dos canales.

### **3.3 Unión de dos canales en régimen supercrítico**

#### **3.3.1 Escurrimiento Supercrítico**

A diferencia de lo que ocurre en las confluencias con régimen Subcrítico o tranquilo, los flujos rápidos con cambios en las condiciones de borde son generalmente complicados por la propagación de ondas estacionarias (Ippen 1951). En flujo Subcrítico, los efectos del remanso se propagan hacia aguas arriba, de manera que tiende a igualar las profundidades del flujo de los canales principal y lateral. Sin embargo, el remanso no puede ser propagado hacia aguas arriba en el caso de escurrimiento supercrítico, y generalmente no se puede esperar que las profundidades del flujo en los canales lateral y principal sean iguales. Se supone que en confluencias con flujos supercríticos y ángulos muy pequeños se presentan alturas iguales en la superficie del agua en los canales lateral y principal. Esto último fue comprobado en los modelos desarrollados por el USAED, Los Ángeles (1949).

Una discusión de la formación de ondas estacionarias en régimen supercrítico y criterios de diseño asociados se presenta a continuación.

### 3.3.2 Formación de ondas estacionarias

Las ondas estacionarias en flujo supercrítico en uniones de canales abiertos complican las condiciones del flujo. Puede ser necesario el incremento de altura de los muros en las vecindades de la confluencia. Los estudios de Bowers (1950) indican que puede formarse un resalto hidráulico en uno de los canales de entrada, dependiendo de las condiciones del flujo.

En el manual *Hydraulic design of flood control channels*, se muestran las ondas que se pueden formar aguas abajo de una confluencia típica (Figura 32). Una zona de máxima altura de la onda queda definida al frente de la confluencia en un punto ubicado sobre la pared del canal lateral (ribera izquierda) y otro ubicado sobre la pared derecha del canal principal aguas abajo de la confluencia. El diseño de las paredes para contener estas alturas de las ondas puede resultar no muy económico, de ahí la necesidad de reducir al mínimo el efecto de las ondas estacionarias.

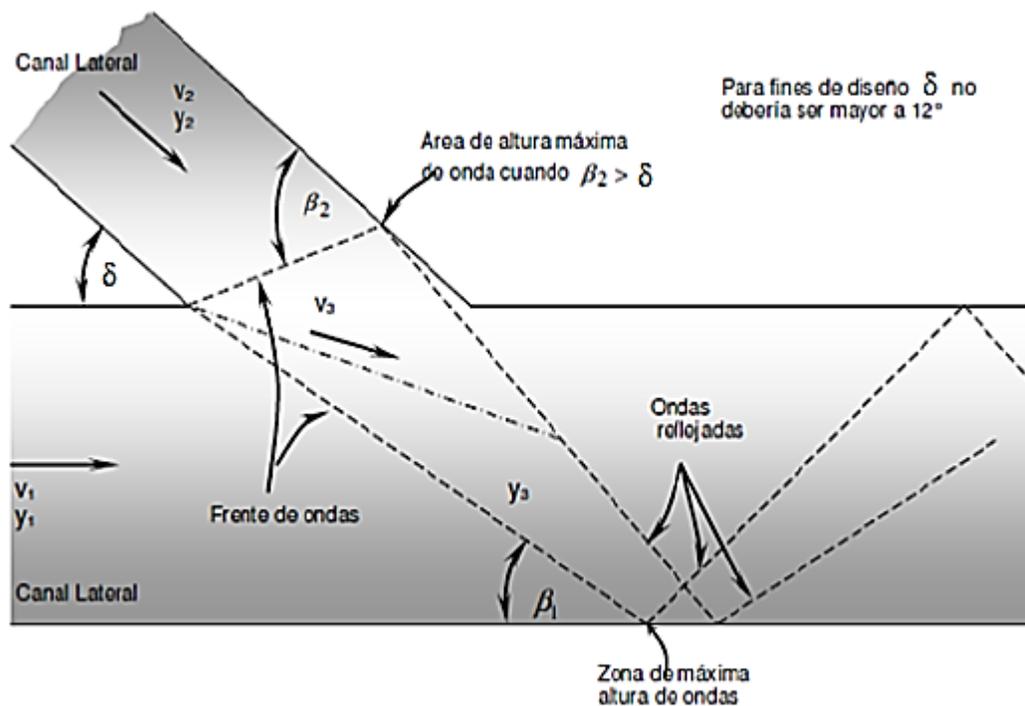


Figura 32 Ondas estacionarias en régimen supercrítico

No siempre ocurre que el canal lateral y el canal principal traen consigo los máximos caudales. Los ensayos de laboratorio efectuados por Behlke y Pritchett (1966) indican que la ocurrencia del flujo de diseño de uno de los canales con el flujo nulo en el otro, puede dar lugar a una cresta muy elevada de la onda en las paredes de la confluencia. Las figuras 32 y 33 muestran la altura máxima en función del número de Froude para las condiciones del flujo nulo en el canal lateral y en el canal principal, respectivamente. Estas figuras demuestran la necesidad de mantener el ángulo de la intersección de la confluencia relativamente pequeño.

Los datos también son útiles para diseñar alturas de pared, por ejemplo, la cresta de la onda en la pared del canal principal sería mayor que dos veces la profundidad del flujo del canal lateral para un  $Fr = 3.0$ , un ángulo de  $15^\circ$  y flujo nulo en el canal principal.

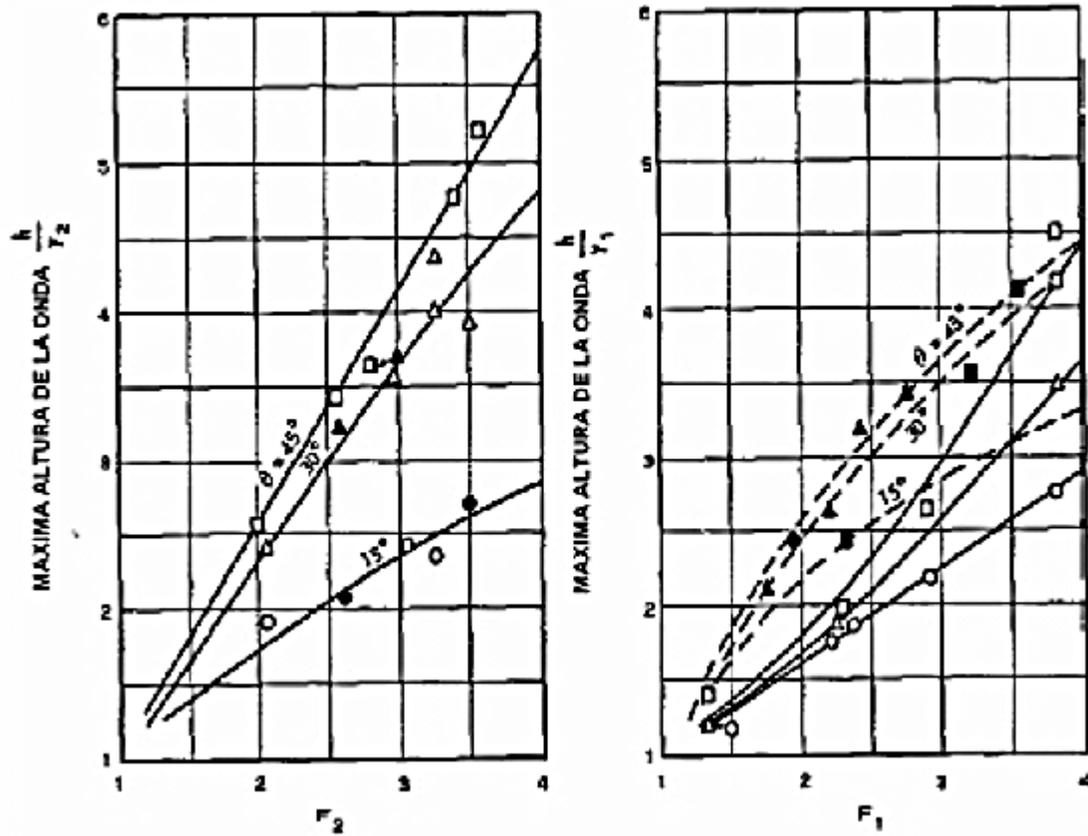


Figura 33 Altura máxima de la onda cuando sólo aporta un canal  
Fuente: Hydraulic design of flood control channels.

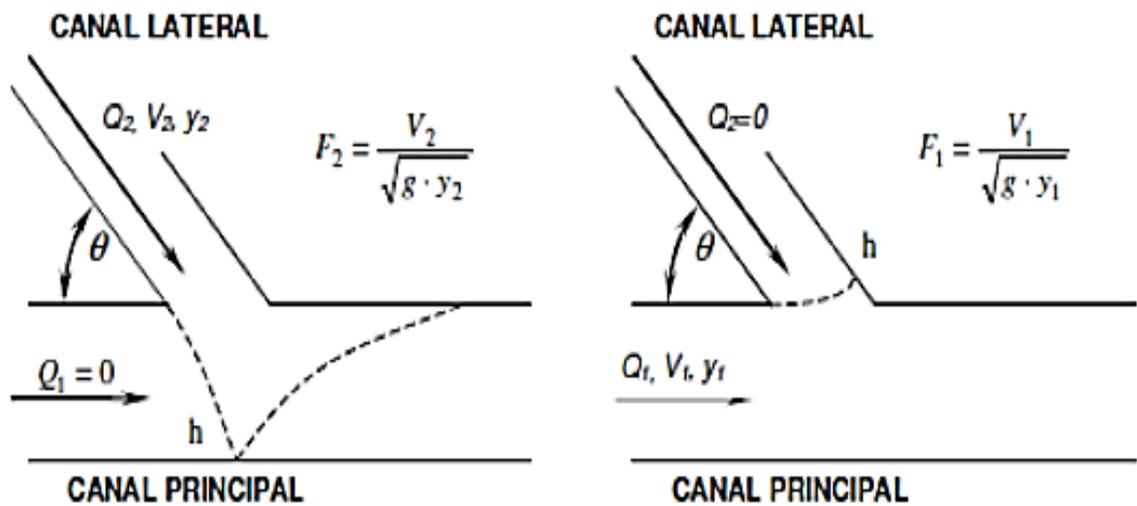


Figura 34 Altura máxima de la onda estacionaria cuando aporta sólo un canal  
Fuente: Hydraulic design of flood control channels

### 3.3.3 Altura de frente de ondas en una confluencia de canales

El procedimiento que lleva a cabo Hager (1989) en sus estudios para determinar la altura del frente de ondas que se forma en la confluencia entre dos canales en escurrimiento supercrítico. Hager por medio de un estudio analítico y experimental entrega expresiones con las cuales se puede determinar las alturas en distintas zonas de la confluencia.

A continuación se muestra un esquema en el cual se ven las variables en estudio:

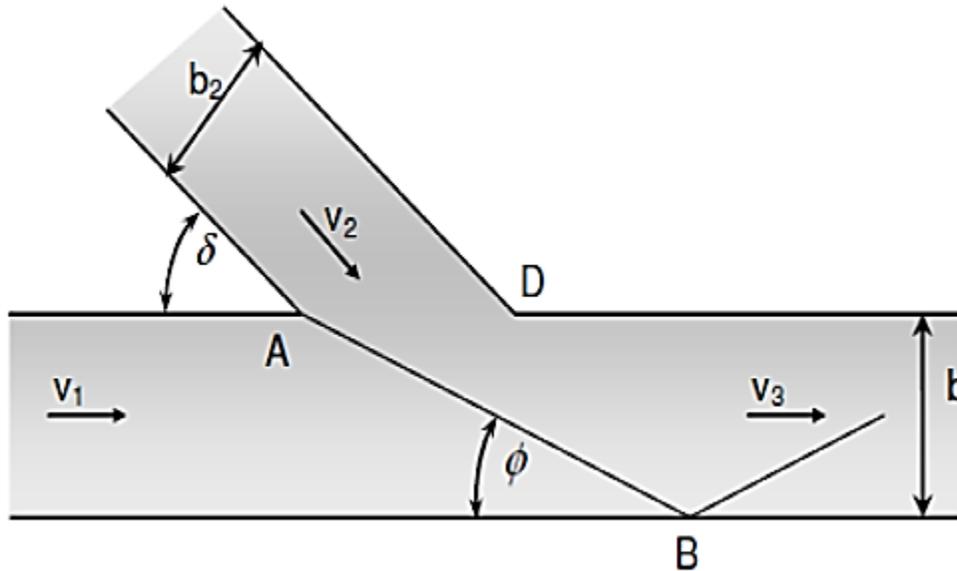


Figura 35 Geometría del flujo. Frente de onda principal.

La línea que parte desde el punto A y llega hasta B con un ángulo relativo a la dirección principal, es la representación de la onda estacionaria principal, que se genera debido al choque de ambos flujos. Al colisionar, ambos flujos confluyentes son desviados o reflejados en un ángulo  $\phi$  para el canal principal y con un ángulo  $\delta$  para el canal lateral, formando así dos nuevos frentes. La expresión que resulta, al asumir velocidad uniforme y distribución hidrostática de presiones para condiciones de baja altura, es decir,  $y_1/b \ll 1$  e  $y_2/b \ll 1$ , y que relaciona estos ángulos de reflexión es la siguiente:

$$\frac{\phi}{\delta} = \left[ 1 + \left( \frac{y_1 F_1}{y_2 F_2} \right) \right]^{-1} = \left[ 1 + \frac{v_1}{v_2} \cdot \left( \frac{y_1}{y_2} \right)^{1/2} \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Esta estimación es para  $\delta \leq 45^\circ$  y  $\bar{F}_2 > \delta^{-1}$ , donde  $\bar{F}$  es el número de Froude reducido que se define como:

$$\bar{F} = \frac{y_1/y_2}{\left(1 - (y_1/y_2)^2\right)^{1/2}} F \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Y la altura del frente de choque se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\frac{y_f}{y_2} = \frac{y_1}{y_2} \cdot \left[ 1 + 2 \cdot \left( \frac{\delta \cdot y_2 \cdot \bar{F}_1 \cdot \bar{F}_2}{y_1 \cdot \bar{F}_1 - y_2 \cdot \bar{F}_2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Además, el patrón de las líneas de flujo en la confluencia misma, puede modelarse de manera similar a como se hace en una contracción con flujo supercrítico, donde la línea de la onda principal equivale a una pared que se quiebra hacia el interior del flujo.

Este patrón de ondas sólo describe lo ocurrido en el fondo del canal, ya que hacia la superficie la curvatura de las líneas de corriente origina la formación de un patrón de ondas cruzadas.

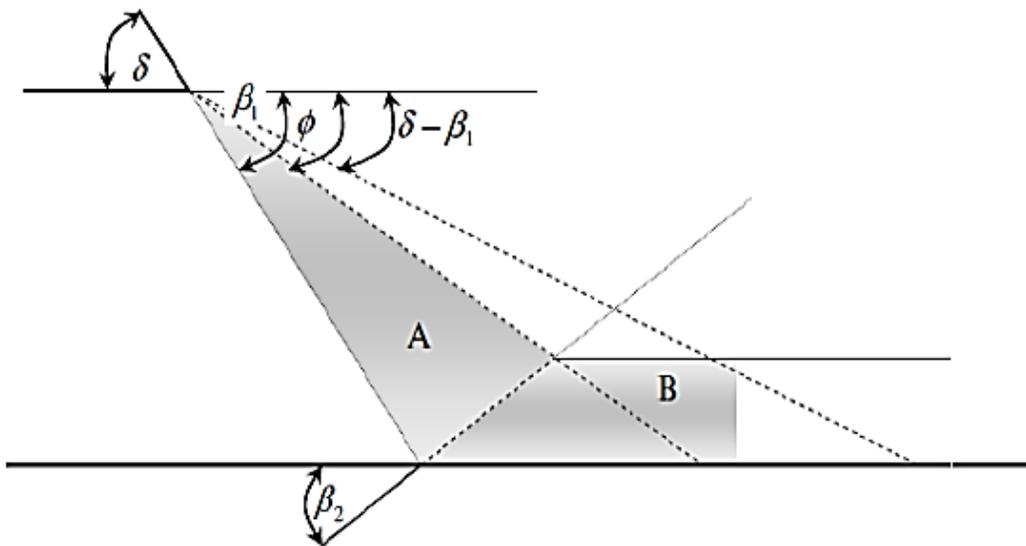


Figura 36 Patrón plano de líneas de flujo para la confluencia (Hager, 1989)

Para determinar la altura relativa del flujo  $h/h_1$  y el número de Froude ( $F$ ) para las regiones A y B que se ilustran en la Figura 36 están las siguientes aproximaciones teóricas:

$$\beta_1 = \phi \cdot \left( 1 + \frac{3}{2 \cdot f_0} \right) \quad (\text{Ec. 3.20})$$

con  $f_o = \sqrt{2} \delta \cdot F_1$

$$\frac{h_2}{h_1} = f_o \cdot \left(1 + \frac{3}{2f_o}\right) - \frac{1}{2} \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$F_2 = F_1 \cdot (1 + f_o)^{-1/2} \quad (\text{Ec. 3.22})$$

$\beta_2 =$  Ángulo con que es reflejado el frente de onda procedente desde A

$$\beta_2 = \delta \cdot \left(1 + \frac{3}{2} \left(f_o^{-1/2} + f_o^{-1}\right)\right) \quad (\text{Ec. 3.23})$$

$$\frac{h_B}{h_2} = \frac{f_o}{(1+f_o)^{1/2}} \cdot \left(1 + \frac{3}{2} \left(f_o^{-1/2} + f_o^{-1}\right)\right) - \frac{1}{2} \quad (\text{Ec. 3.24})$$

$$F_B = F_1 \cdot \left(f_o \cdot (1 + f_o)^{1/2} \cdot \left(1 + f_o^{1/2} + \frac{3}{2f_o}\right)\right)^{1/2} \quad (\text{Ec. 3.25})$$

La altura máxima de la onda corresponde a la altura alcanzada en la zona B y queda representada por:

$$\frac{h_{m\acute{a}x}}{h_1} = \frac{h_B}{h_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right) \cdot \left(\frac{h_B}{h_2}\right) \quad (\text{Ec. 3.26})$$

El autor señala que esta ecuación, al no considerar el efecto de la curvatura de las líneas de corriente, es recomendable utilizarla para un diseño preliminar y sujeto a las siguientes restricciones:  $\delta < 30^\circ$  y  $h_1$  del mismo orden que  $h_2$ .

### 3.3.4 Criterios de diseño en presencia de ondas estacionarias

Behlke y Pritchett (1966) realizaron una serie de recomendaciones para reducir al mínimo el efecto de la onda estacionaria, las cuales se mencionan a continuación:

- a. Ensanchar el canal principal aguas abajo de la unión para mantener la profundidad del flujo aproximadamente constante a través de la confluencia.
- b. Proporcionar alturas iguales de la superficie del agua en los canales lateral y principal en la vecindad de la confluencia.

- c. Asegurarse de que la onda del canal lateral que se origina en el ápice de la confluencia afecte a la pared lateral opuesta del canal en su intersección con la pared ampliada del canal principal.
- d. Levantar un muro de transición entre el flujo proveniente del canal lateral y el principal, o bien, cubrir el canal luego de la unión formando una tubería en una longitud de por lo menos  $L'$ ; donde  $L'$  caracteriza a la denominada “longitud de la onda de choque”.
- e. Asegurarse de que las alturas máximas de la onda ocurran con los flujos máximos. Las figuras 37 y 38 ilustran ejemplos de diseño típicos para canales rectangulares y trapezoidales usando estos criterios. Las uniones importantes con flujo supercrítico diseñadas para reducir los efectos de la onda deben ser probados con todas las combinaciones probables así como para el caudal del diseño.

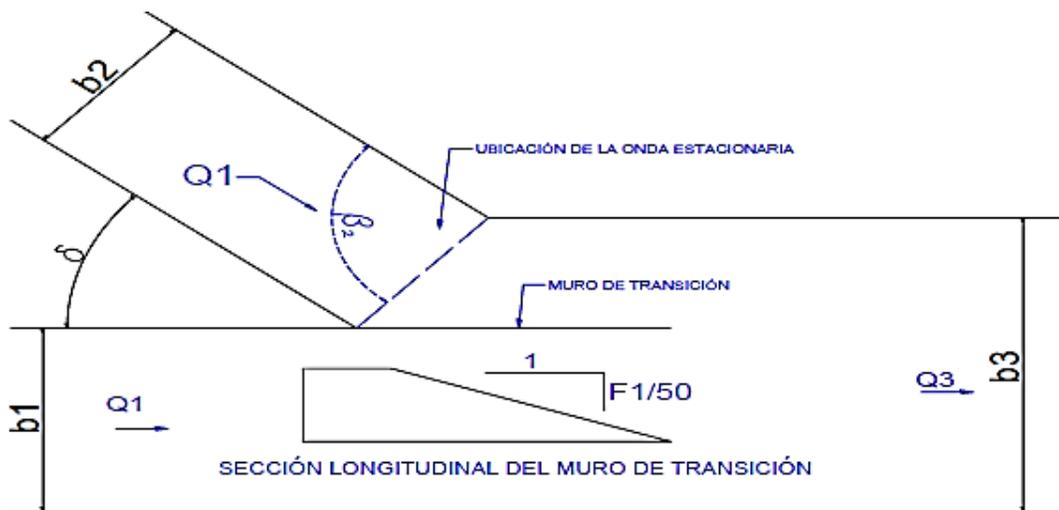


Figura 37 Ejemplo de diseño de una confluencia en canal rectangular

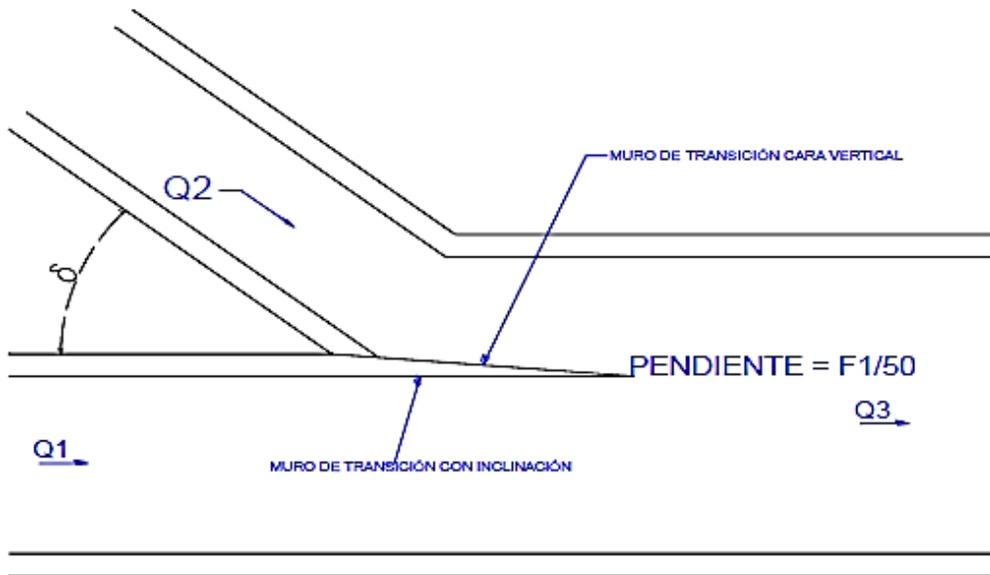


Figura 38 Ejemplo de diseño de una confluencia en canal trapezoidal

## CAPÍTULO IV

### PARÁMETROS DE DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE UNIÓN DE DOS CANALES.

#### 4.1 Estudios importantes para el diseño

##### 4.1.1 Estudios para su ubicación

**Topografía.** El estudio de esta información mostrará si se cuenta con: a) zonas planas que proporcionen espacio adecuado para ubicar las dimensiones de una estructura de unión de dos canales, o zonas con relieve variados que obliguen a tener una estructura diferente a la de estudio, b) cierta altura que permita la evacuación por medio de pendientes suaves y a gravedad hacia una corriente de agua, y c) facilidades de acceso a la zona de ubicación de la estructura.

**Geología y geotecnia.** Estos nos revela la formación de disposiciones geológicas resistentes a la erosión que obliguen a diseñar estructuras de unión de dos canales poco profundos, que sería también el caso para obras de irrigación; si se tienen estratos erosionables se pueden proyectar estructuras más profundas y considerar obras de protección contra la erosión.

##### 4.1.2 Estudio de las características del sistema

Para elaborar un diseño de una estructura de unión de dos canales se deberá realizar un estudio de la obra hidráulica y su magnitud, para lo cual se reconocerá los tipos de flujo, las causas y efectos, y los fines de la unión de flujos, de esta manera se escogerá una alternativa de diseño adecuada, tomando en cuenta la importancia del proyecto.

A continuación se describen proyectos hidráulicos en donde se hace necesario la creación de una estructura de confluencia de canales.

#### **Desvíos temporales - Control de Inundaciones**

El proyecto de estas obras obedece a la existencia de zonas bajas, lagunas o depósitos artificiales que puedan ser inundados momentáneamente, mientras se presenta un evento.

Los desvíos temporales sólo están en posibilidad de desviar un volumen prefijado (que corresponde al de la zona o depósito artificial seleccionado para tal fin). Para que luego de descender los niveles del río, el agua desviada retorna a él mediante un canal que al unirse con el flujo principal se tendrá que diseñar una estructura de unión de dos canales.

Esta estructura deberá diseñarse tomando en cuenta dos criterios: el aporte de un solo canal, y de dos canales.

### **Estructuras de descarga de aguas pluviales**

Como parte del mejoramiento urbano de algunos países, se ha desarrollado algunos proyectos destinados a la solución del problema de evacuación de aguas lluvias a través de colectores de mayor capacidad, eliminando de esta manera los grandes problemas de inundaciones que se producen durante períodos de precipitaciones de gran intensidad.

Estos proyectos han contribuido para el estudio y diseño de estructuras de unión entre colectores y cursos de agua que en la actualidad han cogido mayor interés debido a la importancia de dichos proyectos.

La necesidad de elaborar un diseño favorable entre la convergencia de colectores con cursos de agua, es la de causar el menor daño posible en la zona de unión, ya que si no se toman medidas técnicas de tipo ingenieril se puede degradar el medio ambiente con la presencia de fenómenos tales como socavación y desbordamiento del agua.

### **Obras de conducción de agua para riego**

Las aguas de riego se conducen principalmente a través de canales, los cuales pueden tener un origen natural, pero comúnmente constituyen obras hidráulicas artificiales, que por su construcción diferencial en forma, tamaño y pendiente, determinan la cantidad de agua que pueden llevar al campo (el caudal).

La capacidad del canal debe estar de acuerdo al caudal máximo que conducirá, que puede ser la cantidad de agua necesaria para regar una determinada superficie de terreno, o la cantidad que realmente tiene el agricultor.

Cuando la cantidad de agua necesaria no es la suficiente, existe la necesidad de proveer de un caudal adicional a las personas beneficiadas, que en la mayoría de los casos tendrá que ser unida al canal principal, con lo que el diseño de una estructura de confluencia será necesaria con los respectivos aspectos técnicos con la finalidad de que en la unión de flujos el agua continúe su curso en forma normal sin causar efectos negativos al entorno y a la estructura en particular.

#### **4.1.3 Consideraciones económicas**

El principal criterio para determinar las características de una estructura de unión de dos canales es de orden económico. Entre estas consideraciones se pueden mencionar:

**La importancia o magnitud de las obras.** Se refiere principalmente a que una obra de cierta envergadura puede pagar una estructura de mayores dimensiones o en general más eficaz.

**Costo de las obras civiles.** En función de su eficacia para un dimensionamiento y ubicación determinados, como en el caso de una estructura de unión de dos canales en secciones en donde la topografía es cerrada, cuyo precio será siempre más elevado que otro en terreno llano.

**Costos mecánicos y de mantenimiento.** Por las instalaciones mecánicas, tales como compuertas que obliga a que en una estructura de confluencia de dos canales sean de gran importancia este rubro.

## 4.2 Parámetros de diseño de una estructura de unión de dos canales

### 4.2.1 Dimensionamiento en planta de la estructura de unión

#### 4.2.2.1 Requisitos del canal principal y lateral

Para proceder a un dimensionamiento de una estructura de confluencia de dos canales se deberá determinar los requisitos del canal lateral y principal en lo referente a la descarga, alineación, y tamaño del canal.

#### 4.2.2.2 Selección del punto de unión

El punto de unión de dos canales deberá ser escogido tomando en cuenta la topografía de la zona en donde se asentará la estructura, con el objetivo de obtener un ángulo de entrada menor de 12°. Este requisito del ángulo puede necesitar una larga curva espiral para el canal lateral aguas arriba de la unión.

#### 4.2.2.3 Incremento del ancho aguas abajo de la unión

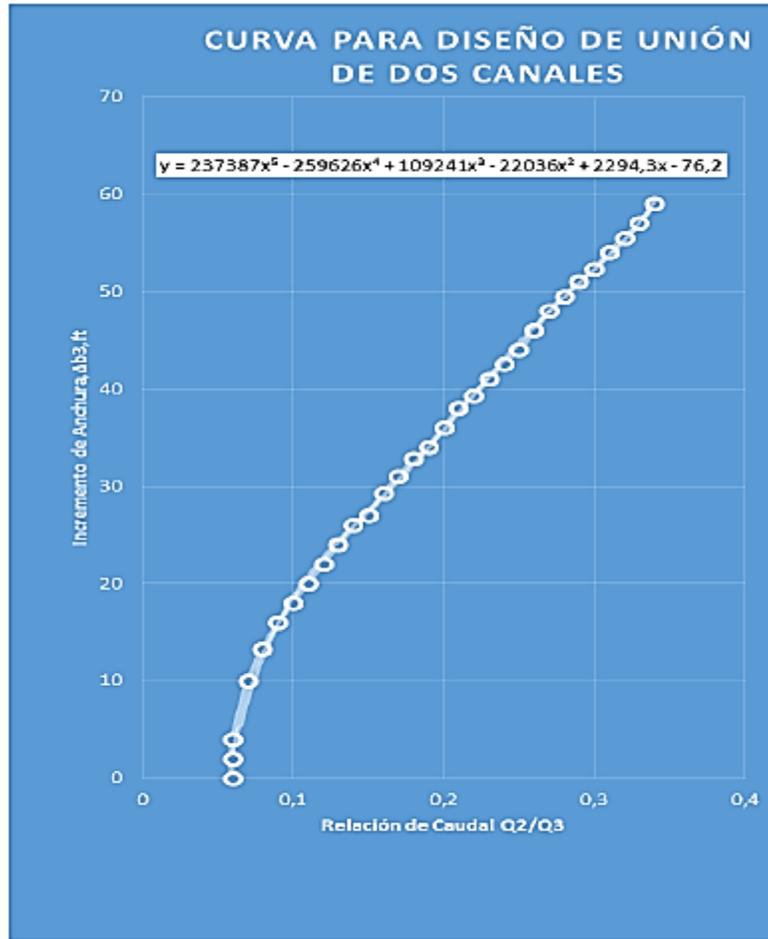
El incremento en el ancho del canal aguas abajo de la confluencia  $\Delta b_3$  se determinará a partir de la curva de relación  $Q_2/Q_3$  mostrado en la figura 4.2. Se calculará el ancho del canal requerido aguas abajo con la ecuación 4.1 y el ancho de la confluencia  $b_c$  con la ecuación 4.2

O, bien partiendo de un ancho conocido, a la salida de la estructura de transición, se puede determinar  $\Delta b_3$  por medio de la ecuación 4.1.

$$b_3 = b_1 + \Delta b_3 \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$b_c = b_1 + 2\Delta b_3 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Se efectuará el diseño de la confluencia de dos canales en base a una línea recta, colocada paralelamente a la pared del canal principal y a una distancia de  $(1/2)b_3$  y  $b_c - (1/2)b_3$  de la línea central como se muestra en la figura 39.



**Figura 39** Curva para la determinación del incremento de ancho, en el diseño de unión de canales  
 Fuente: Manual Hydraulic design of flood control channels.

#### 4.2.2.4 Radios de curvatura de las paredes del canal lateral

Conectar las paredes del lado izquierdo y los canales principales por una curva determinada por el ángulo de unión  $\delta$  y el radio  $r_L$  dado por. La ecuación 6.3 resulta de un estudio de numerosas confluencias construidos por USAED, Los Ángeles.

$$r_L = \frac{4V^2 b_2}{g \cdot y_2} + 400 \quad , \quad (\text{Ec. 4.3})$$

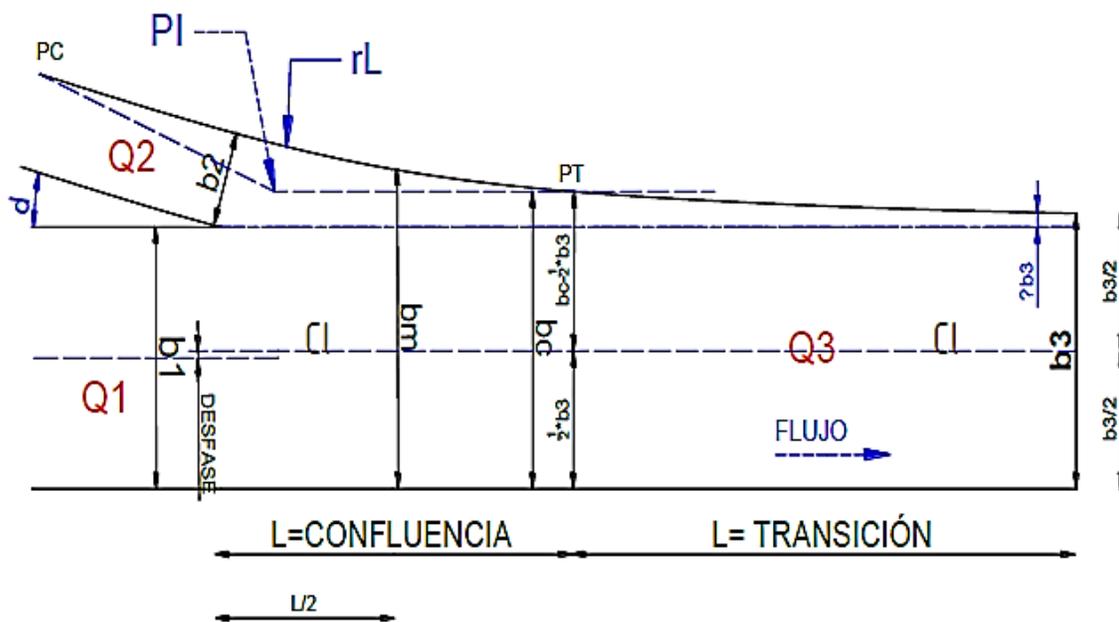


Figura 40 Esquemática del dimensionamiento de una confluencia  
Fuente: Manual Hydraulic design of flood control channels.

Crear la pared derecha del canal lateral concéntrica con la pared izquierda y localice el punto de la intersección de la unión. El radio de la pared  $r_R$  derecha está dado por:

$$r_R = r_L + b_2 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

#### 4.2.2 Profundidad del flujo en el centro de la confluencia

Se determinará la profundidad promedio de flujo en el centro (punto medio) de la confluencia por medio de las ecuaciones derivadas del principio de conservación del Momentum, asumiendo un ancho de canal aproximado de la siguiente forma.

$$b_m = \left(\frac{1}{2}\right)(b_1 + b_2 + b_c) \quad (\text{Ec. 4.5})$$

#### 4.2.3 Cálculo de la altura de los muros

Desde el punto de vista hidráulico, la altura de los muros se determina con la siguiente ecuación:

$$M = y + BL \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde:

M = altura de los muros laterales de la estructura de confluencia.

BL = borde libre. Generalmente se asume un valor que se encuentra entre 0.20-0.50m.

y = profundidad de circulación del flujo en la estructura de confluencia, que se obtiene inicialmente a partir de la cota de la superficie libre del agua en la unión, calculado por las

ecuaciones derivadas del principio de conservación del Momentum, pero puede variar según los siguientes criterios que se aplican en el diseño de una estructura de unión de dos canales.

- a) Velocidad máxima permisible
- b) Aireación del flujo

Si los muros laterales de la estructura de unión de dos canales desempeñaran la función de muros de contención, su altura puede ser superior a la que se obtenga según el criterio hidráulico.

#### 4.3 Parámetros de diseño de la estructura de salida

##### 4.3.1. Dimensionamiento en planta de la transición.

**4.3.1.1 Transición recta.**- para el diseño de una transición recta (figura 41), se debe definir la longitud de la transición de modo que las pérdidas en el paso entre dos tramos de características diferentes sean las mínimas posibles. En la hidráulica y en el diseño de estructuras hidráulicas, las fórmulas que representan los diseños se obtienen de forma experimental, es por eso que se tendrá confianza en las fórmulas que se presentan en el capítulo II en lo referente a transiciones en canales.

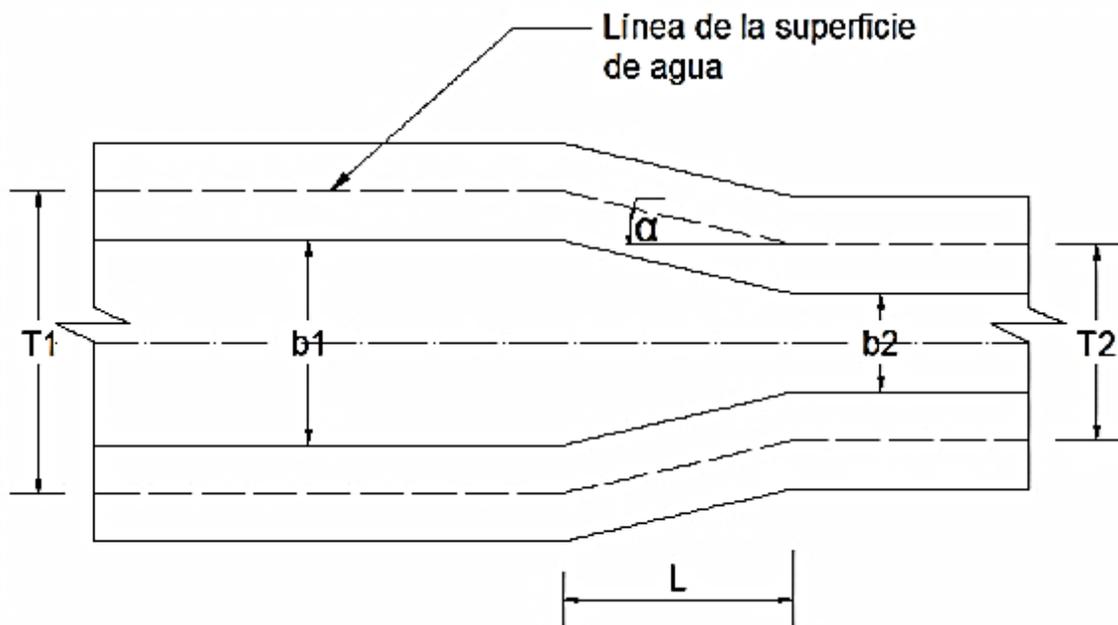


Figura 41 Vista en planta de una transición  
Fuente: El Autor

**4.3.1.2 Longitud de la transición.** La figura 41 muestra un esquema en planta de una transición que une dos tramos de diferente forma de un canal, donde T1, T2 representan los espejos de agua, b1, b2 los anchos de solera y  $\alpha$  el ángulo que forman los espejos de agua. La longitud de la transición se calcula por medio de la ecuación (Ec. 2.32)

## CAPÍTULO V

### METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA ESTRUCTURA DE UNIÓN DE DOS CANALES EN LA HOJA ELECTRÓNICA EXCEL.

#### 5.1 Limitaciones

Para el dimensionamiento hidráulico de la estructura de unión de canales se tomará en cuenta las restricciones realizadas por diversos autores, recopiladas en los criterios de diseño antes descritos, que describen que la generalización del problema no es factible ni conveniente debido a lo complejidad que se genera el analizar el problema, cabe recordar que la mejor vía para un diseño definitivo de confluencias de canales es probarlo en modelos reducidos en laboratorios, con esta reseña se procede al dimensionado que estará apegado a los siguientes parámetros, ya sea para unión de canales en flujo Subcrítico o Supercrítico.

- El ángulo de unión entre ejes de los canales que se unen no será mayor a  $12^\circ$ , con la finalidad de que cuando se tenga flujo supercrítico, evitar la separación del flujo en la unión y poder evaluarlo por el método del principio de conservación de Momentum.
- Ensanchar el canal principal aguas abajo de la unión para mantener la profundidad del flujo aproximadamente constante a través de la estructura de confluencia.
- La elevación de los niveles de agua en las secciones de aguas arriba del canal principal y del canal secundario o lateral, se considerará aproximadamente la misma. Esta suposición es una buena aproximación para flujos Subcrítico, que dependen de lo que ocurre aguas abajo y no siempre se cumple para flujos supercríticos que dependen de aguas arriba, ya que la altura de escurrimiento depende del tipo de sección y de las pendientes de los canales
- El procedimiento en el dimensionado se basará a lo indicado en el numeral 4.2 y 4.3 referente a los parámetros de diseño.

#### 5.2 Cálculos Tipo

Dimensionamiento del canal principal y lateral.

Cuadro 2 datos para el diseño del canal principal

CANAL PRINCIPAL			
DESCRIPCION	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
CAUDAL 1	Q1 =	20.00	m <sup>3</sup> /s
PLANTILLA DE CANAL PRINCIPAL	b1 =	10.00	m
RUGOSIADA	n=	0.015	
PENDIENTE	S =	0.003	m/m

a. Calculo del área mojada

$$Q = A \times V$$

$$A = Q/V$$

$$A = 7.36 \text{ m}^2$$

b. Calculo del tirante ( y )

$$A = by$$

$$y = 0.736 \text{ m}$$

c . Calculo del perímetro mojado (P)

$$P = b + 2y$$

$$P = 11.47 \text{ m}$$

d . Calculo del radio hidraulico ( R )

$$R = A / P$$

$$R = 0.642 \text{ m}$$

e. Calculo de la Velocidad ( v )

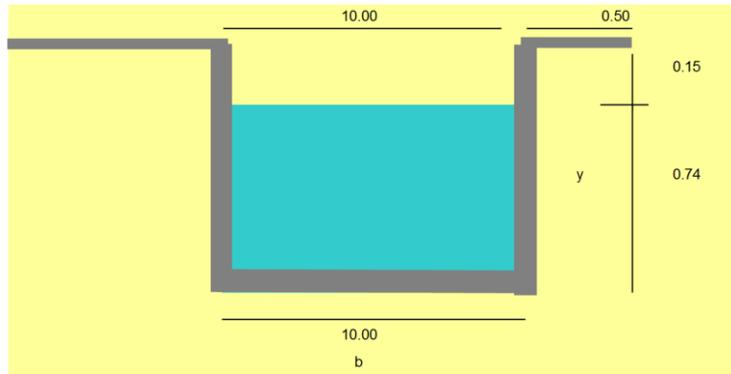
$$V = 1/n (R^{4/3} S^{1/2})$$

$$V = 2.177 \text{ m/s}$$

f. Numero de Froude (Fr)

$$F = v/\sqrt{g/y}$$

$$F = 0.744$$



**Figura 42 dimensiones del canal principal**

**Cuadro 3 datos para el diseño del canal lateral**

CANAL LATERAL			
DESCRIPCION	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
CAUDAL 1	Q2 =	5.00	m <sup>3</sup> /s
PLANTILLA DE CANAL PRINCIPAL	b2 =	5.00	m
RUGOSIADA	n=	0.015	
PENDIENTE	S =	0.003	m/m

a. Calculo del área mojada

$$Q = A \times V$$

$$A = Q/V$$

$$A = 2.47 \text{ m}^2$$

b. Calculo del tirante ( y )

$$A = by$$

$$y = 0.494 \text{ m}$$

c . Calculo del perímetro mojado (P)

$$P = b + 2y$$

$$P = 5.988 \text{ m}$$

d . Calculo del radio hidraulico ( R )

$$R = A / P$$

$$R = 0.413 \text{ m}$$

e. Calculo de la Velocidad ( v )

$$V = 1/n (R^{4/3} S^{1/2})$$

$$V = 2.024 \text{ m/s}$$

f. Numero de Froude (Fr)

$$F = v/\sqrt{g/y}$$

$$F = 0.454$$

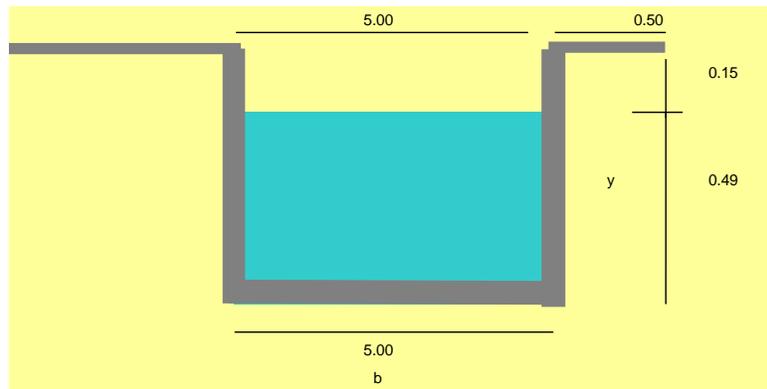


Figura 43 dimensiones del canal lateral

Dimensionar hidráulicamente la estructura de unión de dos canales, los cuales tienen la siguiente característica.

**Longitud de la estructura de confluencia = 30m**

**Ángulo de unión entre ejes  $\delta=10^\circ$**

Nótese que el diseño es para flujo Subcrítico.

**Cálculo del caudal total, aguas abajo de la unión**

$$Q_3 = Q_2 + Q_1$$

$$Q_3 = 20 \text{ m}^3/\text{s} + 5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_3 = 25 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Relación de caudales**

$$\frac{Q_2}{Q_3}$$

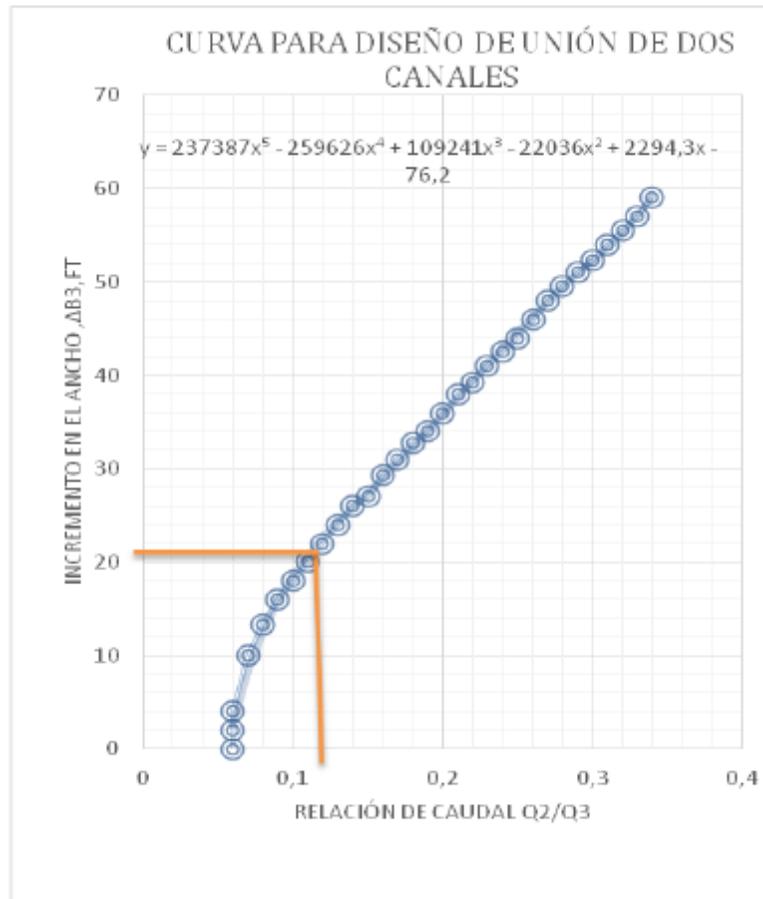
$$20.00 \text{ m}^3/\text{s} / 25.00 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$0.20$$

Con el valor calculado en la relación de caudales, nos dirigimos a la curva para diseño de unión de dos canales y obtenemos el valor del incremento en el ancho del canal principal aguas abajo.

$$\Delta b_3 = 10.88 \text{ft} = 10.8 * 0.3048$$

$$\Delta b_3 = 3.32 \text{ m}$$



Ancho del canal requerido, aguas abajo

$$b_3 = b_1 + 2 \Delta b_3 =$$

$$b_3 = 25 + 4 =$$

$$b_3 = 13.31622 \text{ m}$$

Ancho del canal en el centro de la estructura de confluencia de los dos canales

$$b_c = b_1 + 2 \Delta b_3 =$$

$$b_c = 10 + 2( 3.32) =$$



$$\frac{Q_3^2}{g \cdot A_3} + \frac{b_3 y_3^2}{2} = \frac{Q_1^2}{g \cdot A_1} + \frac{Q_2^2}{g \cdot A_2} \cdot \cos \delta + \frac{b_3 y_1^2}{2}$$

Simplificando la ecuación tenemos

$$y_3^3 - \left( \frac{2 \cdot Q_1^2}{g \cdot b_1 \cdot b_3 \cdot y_1} + \frac{2 \cdot Q_2^2}{g \cdot b_2 \cdot b_3 \cdot y_2} \cdot \cos \delta + y_1^2 \right) y_3 + \frac{2 \cdot Q_3^2}{g \cdot b_3^2} = 0$$

Resolviendo la ecuación de grado 3 obtenemos los siguientes resultados.

$$y_3 = 2.073 \text{ m}$$

$$y_3 = 0,015 \text{ m}$$

$$y_3 = -3,480 \text{ m}$$

**Cálculo de la altura de los muros**

$$M = y + BL$$

$$BL = 0.5 \text{ m}$$

$$M = 2.573 \text{ m}$$

**Cálculo de la longitud de transición para reducir el ancho del canal de  $b_1$  para  $b_2$ , sin exceder el criterio  $y/y_c \leq 0.90$  en la transición.**

$$L = \frac{b_1 - b_2}{2 \tan 12,5}$$

$$L = 9.40 \text{ m}$$

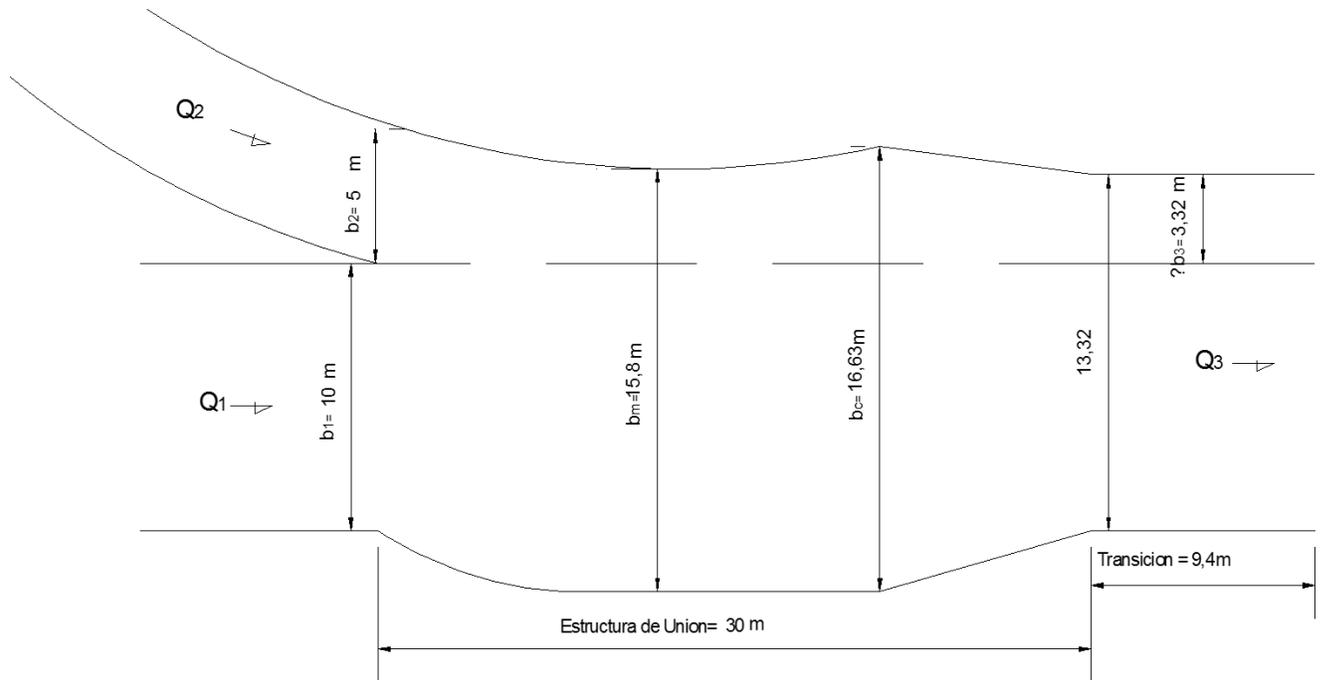


Figura 44 Estructura de confluencia, con datos calculados en el diseño tipo  
Fuente: El Autor

### 5.3 Hoja de cálculo en Excel para el dimensionamiento hidráulico de una estructura de unión de dos canales.

Para el Diseño Hidraulico de Unión de Canales Abiertos, se escogió el software Microsoft Excel que es un programa de fácil uso y manejo del mismo modo está a disposición de cualquier usuario, en este programa podemos realizar y programar hojas de cálculo que facilita y acorta el tiempo para el dimensionamiento de la estructura del presente trabajo.

Las celdas “VALOR” correspondientes a los datos, en las celdas de color amarillo se presentarán los resultados de todos para el caso de dimensionamiento de los canales Principal y Lateral.

En el caso del cálculo para el Diseño Hidraulico de Unión de Canales Abiertos se presenta la celda descripción donde están los parámetros a calcular, en la siguiente celda están los símbolos de los parámetros a calcular, y final mente en la celda resultados se presentan los valores a tomar en cuenta en el diseño de la estructura hidráulica.

#### 5.3.1 Hoja de cálculo en Excel para el dimensionamiento hidráulico de una estructura de unión de dos canales en régimen Subcrítico.

##### 5.3.1.1 Canales Rectangulares

1. Ingresamos los datos de entrada en las celdas “VALOR”, caudales (Q), ancho de canales que se unen (b), pendiente de la solera (S) y rugosidad (n) de cada uno de los canales.

2. Los datos adicionales para el cálculo de la estructura de unión son: longitud de la estructura, ángulo de unión, ancho del canal a la salida de la transición.

3. Con los datos propuestos, la hoja electrónica calcula los parámetros hidráulicos de los dos canales de entrada, así como también dimensiona a la estructura de unión.

1.- DATOS Y RESULTADOS DE LOS CANALES A UNIRSE

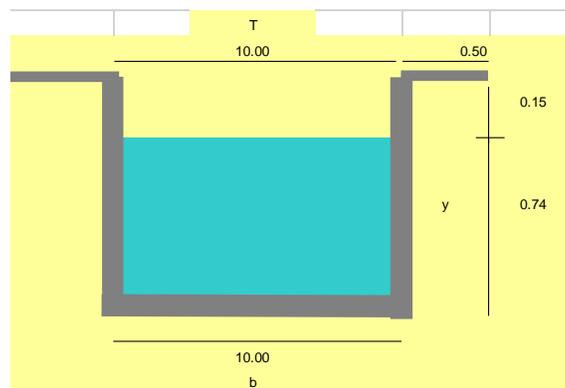
Cuadro 4 descripciones, símbolo, valores para el dimensionamiento del canal principal

CANAL PRINCIPAL			
DESCRIPCION	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
CAUDAL 1	Q1 =	20.00	m <sup>3</sup> /s
PLANTILLA DE CANAL PRINCIPAL	b1 =	10.00	m
RUGOSIADA	n=	0.015	
PENDIENTE	S =	0.003	m/m

Cuadro 5 resultados del dimensionamiento del canal principal

C ( m )	y (m)	r (m)	b (m)	T (m)	H (m)	R (m)
0.500	0.736	0.150	10.000	10.000	0.886	0.642
Q (m3/s)	A (m2)	V (m/s)	P (m)	n	S m/m	Nº Froude (F)
20.000	7.362	2.717	11.472	0.015	0.003	0.744

Figura 45 dimensiones del canal principal



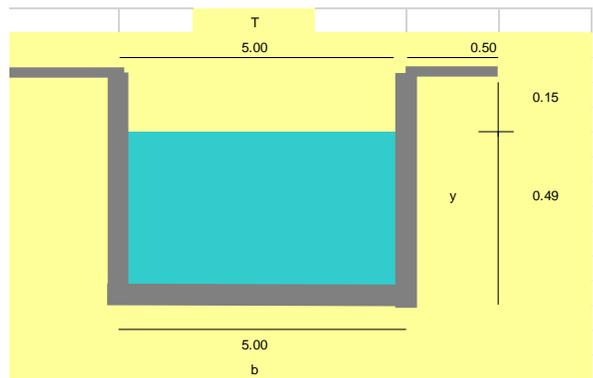
Cuadro 6 descripciones, símbolo, valores para el dimensionamiento del canal principal

CANAL LATERAL			
DESCRIPCION	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
CAUDAL 1	Q2 =	5.00	m <sup>3</sup> /s
PLANTILLA DE CANAL PRINCIPAL	b2 =	5.00	m
RUGOSIDAD	n=	0.015	
PENDIENTE	S =	0.003	m/m

Cuadro 7 resultados del dimensionamiento del canal lateral

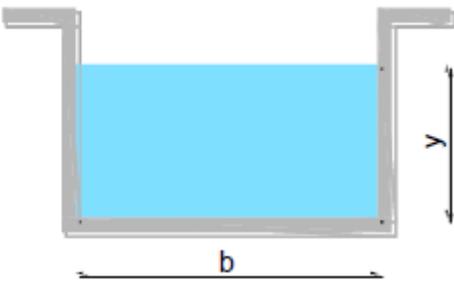
C ( m )	y ( m )	r ( m )	b ( m )	T ( m )	H ( m )	R ( m )
0.500	0.494	0.150	5.000	5.000	0.644	0.413
Q (m3/s)	A (m2)	V (m/s)	P (m)	n	S m/m	N° Froude (F)
5.000	2.471	2.024	5.988	0.015	0.003	0.454

Figura 46 dimensiones del canal lateral



1.1 DATOS ADICIONALES PARA EL CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN

Longitud de la estructura	L=	10 m
Angulo unión	$\delta$ =	10 grados
Ancho aguas abajo, transición	b3=	4 m



2. Para el cómputo de las dimensiones de la estructura de unión, se calcula el incremento en el ancho aguas abajo de una forma ágil por medio de las ecuaciones mostrada en la hoja de cálculo, y siguiendo la secuencia expuesta.

Cuadro 8 resultados del dimensionamiento de la unión de dos canales

Descripción	Símbolo	Resultados
Incremento en el Ancho	$\Delta b_3$	3.32
Ancho del Centro de la Unión	bm	15.82
Ancho Final de la Unión	bc	16.64
Altura de la Unión	y3	2.07
radio de curvatura	rL	123.14
Distancia al Eje	$1/2 b_3$	6.66
	$bc - (1/2)b_3$	9.98
Altura del Muro	M	2.57
longitud de Transición	L	9.41
Régimen de Flujo	Fr	SUBCRITICO

3. Con el valor del incremento en el ancho aguas debajo de la unión de los canales, se determina los parámetros hidráulicos en planta, como:

- Ancho de la estructura de unión. (Ec. 4.2)
- Ancho del canal requerido aguas abajo de la unión. (Ec. 4.1)
- Distancias al eje del canal, tomando como referencia el ancho aguas abajo de la estructura de unión. Ecuaciones  $(1/2) b_3$  y  $b_c - (1/2) b_3$  .

- Ancho del canal en el centro de la estructura de confluencia. (Ec. 4.5)
- Los radios de curvatura necesarios para direccionar al punto de unión al canal lateral. (Ec. 4.3) y (Ec. 4.).

4. La hoja calculará automáticamente las alturas en los canales de aproximación (Ec. 3.15), para fines de cálculo se realiza la suposición de que estas alturas son iguales,  $y_1=y_2$ .

$$y_{1-2}^3 - \left( \frac{2 \cdot Q_3^2}{g \cdot b_2^2 \cdot y_3} + y_3^2 \right) \cdot y_{1-2} + \left( \frac{2 \cdot Q_1^2}{g \cdot b_1 \cdot b_2} + \frac{2 \cdot Q_2^2}{g \cdot b_2 \cdot b_3} \cdot \cos \delta \right) = 0$$

$$y^3 - 1.2397 y + 0.3826 = 0$$

$$\begin{aligned} y_1 &= 1.21 \text{ m} \\ y_2 &= -0.23 \text{ m} \\ y_3 &= -0.98 \text{ m} \end{aligned}$$

ECUACIÓN DE GRADO 3, PARA DETERMINAR LA ALTURA DEL FLUJO

5. Con los valores de  $y_3$  encontrados de la ecuación cúbica, y escogiendo el resultado coherente al caso, se calculará la altura de los muros en la vecindad de la estructura de unión.
6. Con los valores del ancho a la salida de la estructura de confluencia  $b_2$  y el ancho aguas abajo (salida de la transición)  $b_3$ , la hoja electrónica calcula la longitud necesaria de la transición mediante la ecuación (Ec. 2.32).

#### 5.4 Análisis de resultados

- ✓ El valor calculado en la relación de caudales  $Q_2/Q_3$  es función directa del incremento del ancho de la estructura de confluencia, o sea, mientras este valor crece, el incremento en el ancho aumenta y viceversa.
- ✓ Para fines de cálculo, en donde no se tenga un equipo de computación a la mano, el valor del incremento en el ancho del canal aguas abajo de la unión, se encontrará con la ayuda de la figura 4.2, caso contrario la ecuación representativa de la curva de unión de dos canales, es una buena aproximación para un cálculo rápido.
- ✓ Con un valor propuesto para  $b_3$ , es factible calcular con la ecuación 4.1 el incremento en el ancho  $\Delta b_3$ , y por consiguiente la altura de agua, sin necesidad de usar la curva para diseño de estructuras de unión de dos canales.
- ✓ Nótese que en la curva para diseño de unión de dos canales el incremento  $\Delta b_3$  esta dado en Ft = pies el cual debe multiplicarse por un factor de conversión para que los resultados se tenga en metros.
- ✓ El diseño del eje del canal de la estructura de unión de dos canales puede realizarse tomando en cuenta dos consideraciones:

a) Seguir la dirección del eje del canal 1 y conforme a esta línea de acción desfasar las paredes de la estructura de confluencia conforme a los valores obtenidos mediante las ecuaciones  $(1/2) b_3$  y  $bc - (1/2) b_3$

b) Puede ser implantado tomando como referencia la pared lateral del canal principal y desde esta, tomar la distancia  $(1/2) b_3$ , y por consiguiente la otra pared se encontrara a una distancia  $bc - (1/2) b_3$  del eje.

✓ Los radios de curvatura calculados son para el trazo del canal lateral o tributario, que para fines de diseño se transformará sus unidades de Ft a metros, o se usara las ecuaciones propuestas en el cálculo, ya convertidas.

✓ El valor calculado del ancho en el centro de la estructura de unión de dos canales ( $b_m$ ) es un valor aproximado, con el fin de calcular la altura del agua  $y_3$  en dicho punto.

✓ Al calcular la altura promedio del flujo en el centro de la estructura de confluencia mediante la ecuación derivada del principio de conservación del Momentum, podemos obtener valores positivos y negativos, de los cuales serán válidos los resultados positivos con un criterio de selección técnico.

✓ Puede ocurrir que la ecuación de cantidad de movimiento (Momentum) carezca de raíces positivas para  $y_3$ , un resultado así indicará que la pérdida de energía es tal, que la energía disponible en la sección 3 es menor que la mínima correspondiente a esa sección para el caudal  $Q_3$  y el ancho  $b_3$ .

✓ Un resultado tal que  $y_{c3} > y_{03}$  significará el desarrollo de un régimen gradualmente variado hacia aguas abajo, con lo cual deberán tomarse previsiones de altura de muros para evitar el desbordamiento del agua.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- Con la creación de la hoja electrónica en Excel es factible dimensionar una estructura de unión de dos canales en régimen Subcrítico y del ser el caso Supercrítico, con sus respectivos parámetros hidráulicos que nos ayudará para un diseño preliminar, orientado a un funcionamiento correcto de la estructura de confluencia.
- Los parámetros hidráulicos calculados con la ayuda de la hoja electrónica en Excel de una estructura de unión de dos canales, son valores encontrados mediante ecuaciones formuladas a base de experiencias de distintos investigadores que tuvieron como objetivo; el agua en la confluencia siga su curso en forma normal, que no exista desbordamiento del agua en las cercanías de la unión, y que la estructura no presente un deterioro acelerado por efecto del flujo.
- Para relaciones de caudal, entre el flujo de canal lateral y el canal aguas abajo de la unión, con valores  $Q_2/Q_3 < 0,06$  se puede notar en la curva elaborada para cálculo de ensanchamientos aguas abajo de una confluencia, que el flujo proveniente del canal lateral no causa efecto negativo al unirse con el flujo principal, esto quiere decir que en la estructura de confluencia no se necesitara incremento en el ancho, ya que ésta será igual a la suma de los anchos de los canales de aproximación más el ancho de los muros entre estos.

## **6.2. Recomendaciones**

- Obtenido el dimensionamiento hidráulico de una estructura de unión de dos canales con la hoja electrónica en Excel, es conveniente recurrir a la elaboración de modelos físicos para un diseño hidráulico definitivo de confluencias, salvo que el caso específico que estemos analizando haya sido objeto de una investigación previa experimental.
  
- Se recomienda utilizar este documento para consultas, a estudiantes de la materia de diseño hidráulico, debido a que la información existente sobre diseños de estructuras hidráulicas de unión de dos canales, se encuentra en resumen y a detalle en el presente trabajo.
  
- Los valores computados con la hoja de cálculo en Excel, no pretenden ser valores definitivos, sino que se recomienda usarlos para un diseño preliminar y sujeto a las restricciones ya descritas, como un ángulo pequeño de unión entre los ejes del canal lateral y principal, calados de agua similares, canal lateral de menor caudal y ancho que el principal.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. CHOW, Ven Te. Hidráulica de Canales Abiertos, Ed. Mc Graw – Hill Interamericana S.A. Título original “Open Channel Hydraulics” (Traducción J. G: Saldarriaga, 1994).
2. BRUNNER, Gary W. hec-ras, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Us army corps of engineers hydrologic engineering center (hec), versión 3.1, 2002.
3. DEPARTMENT OF THE ARMY U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Engineering and Design Hydraulic Design of Flood Control Channels, Washington, D.C., 1994.
4. HENDERSON, F.M., Open Channel Flow, Macmillan, New York, 1966
5. NAUDASCHER Eduard. Hidráulica de Canales. Título en Alemán. Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke.(Traducción. Dr. Ing Marco Castro Delgado)
6. FRENCH, Richard H.. Hidráulica de Canales Abiertos. Ed. Mc Graw – Hill Interamericana S.A. Título original “Open - Channel Hydraulics” (Traducción M. I: Ariel Friedman).
7. ROCHA Felices, Arturo. Hidráulica de Tuberías y Canales. 2007
8. SOTELO Ávila, Gilberto. Hidráulica de Canales. 2009. México, Unam, Facultad de Ingeniería, 2002. No de páginas 836.
9. VALDEBENITO. V. Gerardo. Tesis de grado, Descarga de un colector de aguas lluvias a un cauce natural. Análisis comparativo entre métodos analíticos y experimentales. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2007.
10. GOUDARZIZADEH. R. S.H.MOUSAVI Jahromi and N.HEDAYAT. Manual: Simulation of 3d flow using numerical model at open-channel confluences.
11. MANUAL: SUPERCRITICAL FLOW AT OPEN-CHANNEL JUNCTIONS. Hydraulic Model Investigation. U. S. Army Engineer District, Corps of Engineers. Los Angeles, California

## ANEXOS

Anexo 1.- Hoja de cálculo en Excel para diseño de unión de dos canales de sección rectangular en régimen subcrítico y supercrítico

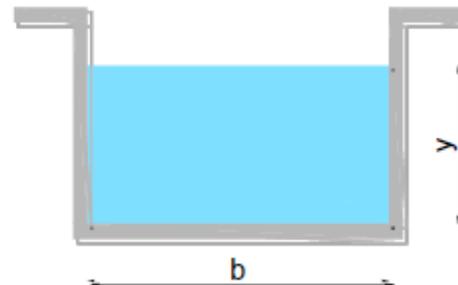
### 1.- DATOS DE LOS CANALES A UNIRSE

CANAL PRINCIPAL		
Caudal 1	Q1=	3,000 m <sup>3</sup> /s
Ancho canal 1	b1=	2,000 m
Pendiente solera	So1=	0,003 m/m
Rugosidad	n=	0,013

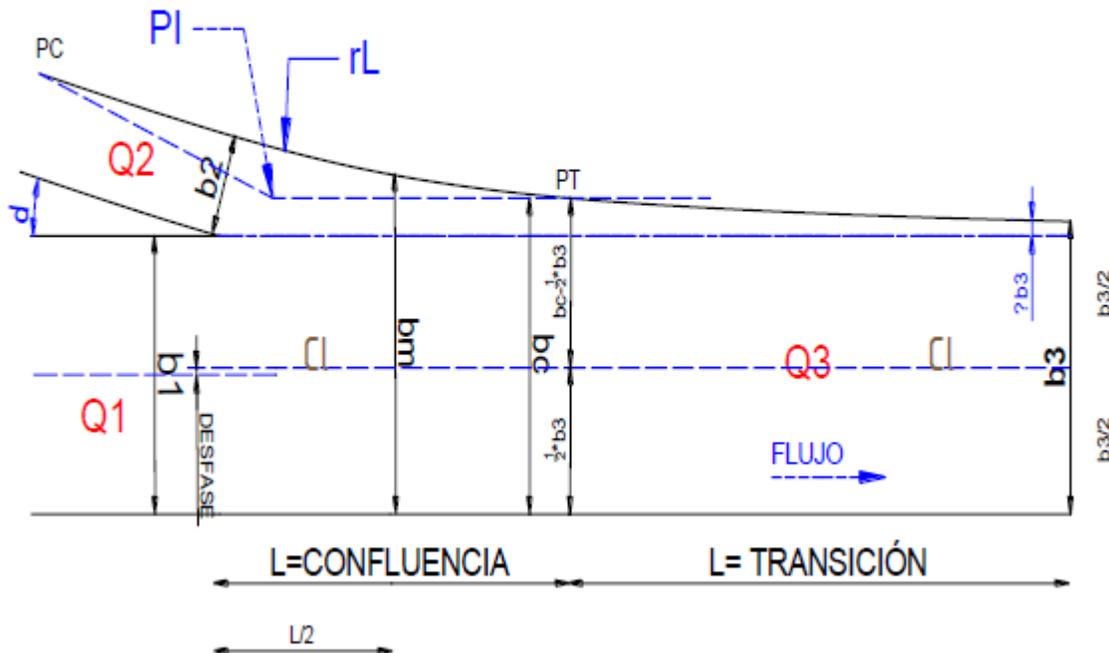
CANAL LATERAL		
Caudal 2	Q2=	2,000 m <sup>3</sup> /s
Ancho canal 2	b2=	1,000 m
Pendiente solera	So2=	0,003 m/m
Rugosidad	n=	0,013

### 1.1 DATOS ADICIONALES PARA EL CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN

Longitud de la estructura	L=	10 m
Angulo unión	$\delta$ =	10 grados
Ancho aguas abajo, transición	b3=	4 m



### ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES



## 2.-RESULTADOS OBTENIDOS

CANAL PRINCIPAL		
BUSCAR OBJETIVO	y1=	0,662 m
Área de flujo	A=	1,323 m <sup>2</sup>
Perimetro	P=	3,323 m
Radio Hidráulico	R	0,398 m
Velocidad	V=	2,280 m/s
# de Froude	Fr=	0,895
CANAL LATERAL		
BUSCAR OBJETIVO	y2=	1,001 m
Área de flujo	A=	1,001 m <sup>2</sup>
Perimetro	P=	3,002 m
Radio Hidráulico	R	0,333 m
Velocidad	V=	2,026 m/s
# de Froude	Fr=	0,647

2.1 DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN		
Régimen del flujo	SUBCRÍTICO	
Incremento en el ancho	$\Delta b_3 =$	2,00 m
Ancho final de la unión	bc =	4,66 m
Distancias al eje	$(1/2) b_3 =$	1,33 m
	bc - $(1/2) b_3 =$	3,33 m
Radio de curvatura	rL=	122,43 m
Ancho centro de la unión	bm=	3,16 m
Altura crítica	y3	1,34 m
Altura muro	M=	1,84 m
Longitud de la transición	L=	4,37 m

DESARROLLO DEL CÁLCULO EN LA HOJA ELECTRÓNICA

3.- INCREMENTO EN EL ANCHO :  $\Delta b_3 =$            

4.- ANCHO DE LA CONFLUENCIA:

$$b_c = b_1 + 2\Delta b_3$$

$b_c =$             4,66 metros

5.- ANCHO DEL CANAL REQUERIDO AGUAS ABAJO

$$b_3 = b_1 + \Delta b_3$$

$b_3 =$             2,66 metros

6.- DISTANCIAS AL EJE

$$(1/2) b_3 \quad \text{span style="background-color: yellow;">           1,33 m$$

$$b_c - (1/2) b_3 \quad \text{span style="background-color: yellow;">           3,33 m$$

7.- RADIO DE LA CURVA DE UNION DE LAS PAREDES IZQUIERDAS DEL CANAL LATERAL Y PRINCIPAL

$$r_L = \frac{4V^2 b_2}{g * y_2} + 400$$

$r_L$             122,43 metros

8.-RADIO DE CURVATURA DE LA PARED DERECHA DEL CANAL LATERAL

$$r_R = r_L + b_2$$

$r_R$             123,43 m

9.- DETERMINACION DE LA PROFUNDIDAD DE FLUJO EN EL CENTRO DE LA CONFLUENCIA POR EL METODO DEL MOMENTUM

9.1.- ANCHO DEL CANAL EN EL CENTRO DE LA CONFLUENCIA

$$b_m = \left(\frac{1}{2}\right)(b_1 + b_2 + b_c)$$

$b_m$             3,16 metros

9.2.- PROFUNDIDAD DEL FLUJO y3

$$y_{1-2}^3 - \left( \frac{2 \cdot Q_3^2}{g \cdot b_3^2 \cdot y_3} + y_3^2 \right) \cdot y_{1-2} + \left( \frac{2 \cdot Q_1^2}{g \cdot b_1 \cdot b_3} + \frac{2 \cdot Q_2^2}{g \cdot b_2 \cdot b_3} \cdot \cos \delta \right) = 0$$

$$y^3 - 1,5111 y + 0,5441 = 0$$

$y_1 = 1,34 \text{ m}$   
 $Y_2 = -0,26 \text{ m}$   
 $Y_3 = -1,08 \text{ m}$

ECUACIÓN DE GRADO 3, PARA DETERMINAR LA ALTURA DEL FLUJO

10.- CÁLCULO DE LA ALTURA DE LOS MUROS

$$M = y + BL$$

M = 1,84 m

11.- CÁLCULO DE LA LONGITUD DE TRANSICIÓN

$$L = \frac{b_1 - b_3}{2 \cdot \text{tg} \theta}$$

L = 4,4 m

**Anexo 2.- Hoja de cálculo en Excel para diseño de unión de dos canales de sección trapezoidal en régimen subcrítico y supercrítico.**

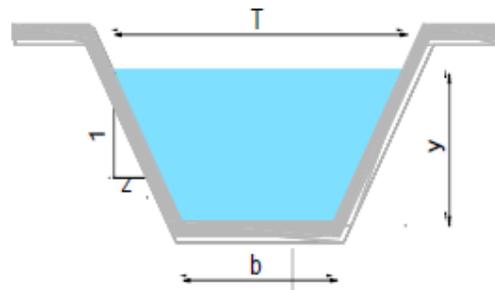
## 1.- DATOS DE LOS CANALES A UNIRSE

CANAL PRINCIPAL		
Caudal 1	$Q1=$	10,000 m <sup>3</sup> /s
Ancho 1	$b1=$	8,000 m
Pendiente talud	$z1=$	1,500
Pendiente solera	$S_0=$	0,003 m
Rugosidad	$n=$	0,015 m/s

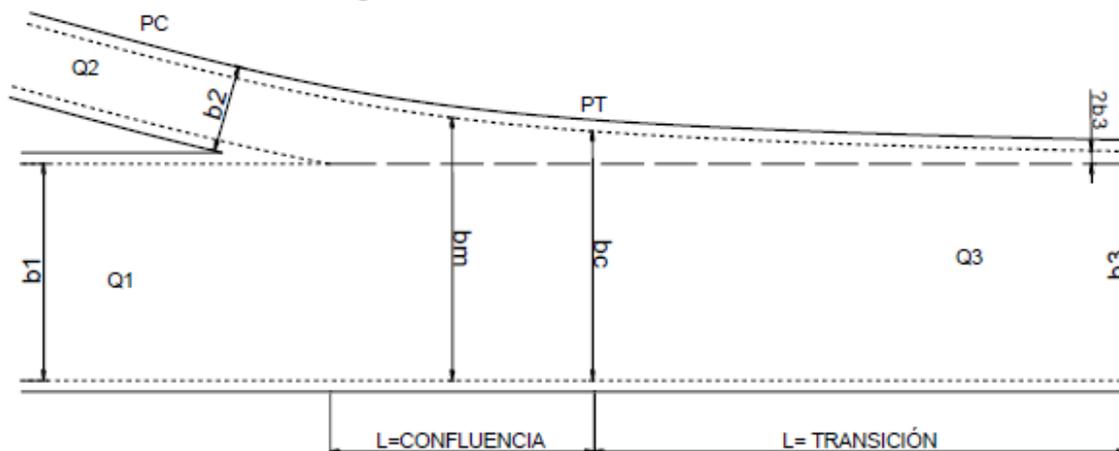
CANAL LATERAL		
Caudal 2	$Q2=$	5,000 m <sup>3</sup> /s
Ancho 2	$b2=$	3,000 m
Pendiente talud	$z2=$	1,500
Pendiente solera	$S_0=$	0,003 m
Rugosidad	$n=$	0,015 m/s

### 1.1 DATOS ADICIONALES PARA EL CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN

Longitud	$L=$	20,00 m
Ángulo de unión	$\delta=$	10,00 grados
Ancho aguas abajo	$b3$	12,00 m
Pendiente Talud	$z3=$	1,50



### ESQUEMA DE LAS DIMENSIONES



## 2.-RESULTADOS

CANAL PRINCIPAL		
Tirante normal	$y_1 =$	0,521 m/m
Área de flujo	$A =$	4,575 m <sup>2</sup>
Perímetro	$P =$	9,878 m
Radio Hidráulico	$R$	0,463 m
Velocidad	$V =$	2,186 m/s
# de Froude	$Fr =$	0,967
CANAL LATERAL		
Tirante normal	$y_2 =$	0,597 m/m
Área de flujo	$A =$	2,327 m <sup>2</sup>
Perímetro mojado	$P =$	5,153 m
Radio Hidráulico	$R$	0,451 m
Velocidad	$V =$	2,149 m/s
# de Froude	$Fr =$	0,888

2.1 DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN		
Régimen	SUBCRÍTICO	
Incremento en el ancho	$\Delta b_3 =$	4,00 m
Ancho final de la unión	$b_c =$	16,00 m
Distancias al eje	$(1/2) b_3 =$	6,00 m
	$b_c - (1/2) b_3 =$	10,00 m
Radio de curvatura	$r_L =$	121,9 m
Ancho centro de la unión	$b_m =$	13,50 m
Altura crítica	$y_3 =$	0,94 m
Altura muro	$M =$	1,44 m
Longitud de transición	$L =$	14,67 m
Velocidad en la unión	$V_3 =$	1,74 m/s

## DESARROLLO DEL CÁLCULO EN LA HOJA ELECTRÓNICA

3.- INCREMENTO DE ANCHURA :  $\Delta b_3 =$  4,00 metros

4.- ANCHO DE LA CONFLUENCIA:

$$b_c = b_1 + 2\Delta b_3$$

$b_c =$  16,00 metros

5.- ANCHO DEL CANAL REQUERIDO AGUAS ABAJO

$$b_3 = b_1 + \Delta b_3$$

$b_3 =$  12,00 metros

6.- DISTANCIAS AL EJE

$$(1/2) b_3 = 6,00 \text{ m}$$

$$b_c - (1/2) b_3 = 10,00 \text{ m}$$

7.- RADIO DE LA CURVA DE UNION DE LAS PAREDES IZQUIERDAS DEL CANAL LATERAL Y PRINCIPAL

$$r_L = \frac{4V^2 b_2}{g * y_2} + 400$$

$r_L$       121,93 metros

8.- RADIO DE CURVATURA DE LA PARED DERECHA DEL CANAL LATERAL

$$r_R = r_L + b_2$$

$r_R$       124,93 m

9.- DETERMINACION DE LA PROFUNDIDAD DE FLUJO EN EL CENTRO DE LA CONFLUENCIA POR EL METODO DEL MOMENTUM

9.1.- ANCHO DEL CANAL EN EL CENTRO DE LA CONFLUENCIA

$$b_m = \left(\frac{1}{2}\right)(b_1 + b_2 + b_c)$$

$b_m$       13,50 metros

9.2.- PROFUNDIDAD DEL FLUJO y

$$\frac{Q_3^2}{g \cdot A_3} + y_3^2 \cdot \left(\frac{b_3}{2} + \frac{Z \cdot y_3}{3}\right) = \frac{Q_1^2}{g \cdot A_1} + \frac{Q_2^2}{g \cdot A_2} \cdot \cos \delta + y_1^2 \cdot \left(\frac{b_3}{2} + \frac{Z \cdot y_1}{3}\right)$$

$$y^3 + 30,38 y^2 + -10,32 = 0$$

y1=      0,94 m  
 Y2=      -19,66 m  
 Y3=      -20,83 m

ECUACIÓN DE GRADO 3, PARA DETERMINAR LA ALTURA DEL FLUJO

10.- CÁLCULO DE LA ALTURA DE LOS MUROS

$$M = y + BL$$

$$M = 1,44 \text{ m}$$

11.- CÁLCULO DE LA LONGITUD DE TRANSICIÓN

$$L = \frac{b_1 - b_3}{2 \cdot \text{tg} \theta}$$

$$L = 14,7 \text{ m}$$