



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD ZACATENCO**

**HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS
“COMPENDIO”**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL**



PRESENTA:

ERICK AUGUSTO CARMONA GONZÁLEZ

MÉXICO, DISTRITO FEDERAL 2009



SECRETARÍA
DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



UNIDAD ZACATENCO
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES Y TITULACIÓN

"2009, Año de la Reforma Liberal"
"2009 Año Internacional de la Astronomía"
"75 Aniversario de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas"
"50 Aniversario de XEIPN Televisión Canal Once"
"50 Aniversario de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos"

Of. No. EP. 233 -X - 2009.

ASUNTO: SE COMUNICA FECHA DE
EXAMEN PROFESIONAL

México D.F., a 15 de octubre de 2009.

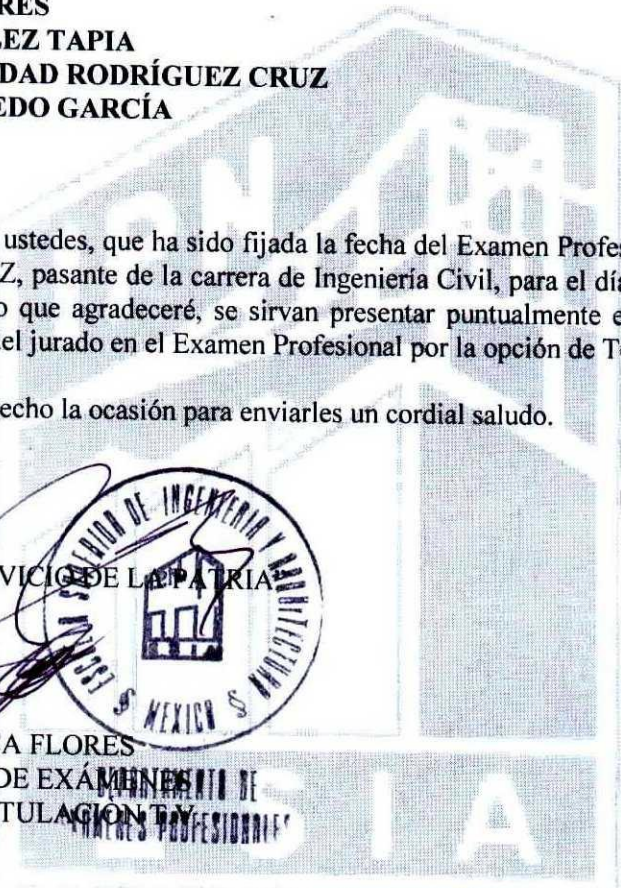
A LOS CC. PROFESORES
ING. JAIME GONZÁLEZ TAPIA
ING. ADRIANA SOLEDAD RODRÍGUEZ CRUZ
ING. ENRIQUE OLMEDO GARCÍA
P R E S E N T E

Me permito comunicar a ustedes, que ha sido fijada la fecha del Examen Profesional del C. ERICK AUGUSTO CARMONA GONZÁLEZ, pasante de la carrera de Ingeniería Civil, para el día 30 de octubre del año en curso, a las 17:00 horas, por lo que agradeceré, se sirvan presentar puntualmente en la fecha y hora indicada para figurar como miembros del jurado en el Examen Profesional por la opción de Tesis.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarles un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

ING. CARLOS MALPICA FLORES
JEFE DE LA OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES Y TITULACIÓN



NOTA: FAVOR DE PRESENTARSE CON SACO Y CORBATA.
CELULAR APAGADO.

CMF/irm



SECRETARÍA
DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

UNIDAD ZACATENCO

DEPENDENCIA: OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES Y TITULACIÓN



"2008 Año de la Educación Física y el Deporte"

"75 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil"

"60 aniversario de la Escuela superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas"

"30 Aniversario del CECyT 15 Diódoro Antunez Echegaray"

Of. No.: SAC. EP.- 223 -X- 2008.

ASUNTO: SE COMUNICA TEMA DE TESIS

México D.F., a 16 de octubre de 2008.

C. ERICK AUGUSTO CARMONA GONZALEZ
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERO CIVIL
P R E S E N T E.

Informo a usted, que el ING. JAIME GONZÁLEZ TAPIA, ha sido designado director y asesor en la realización de su Tesis Profesional, misma que deberá desarrollar en un término no mayor de un año a partir de la fecha del presente oficio conforme al siguiente tema:

"HIDRÁULICA DE LOS CANALES - COMPENDIO"

CAPÍTULO I.-	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II.-	GENERALIDADES
CAPÍTULO III.-	ECUACIONES BÁSICAS
CAPÍTULO IV.-	FLUJO UNIFORME
CAPÍTULO V.-	FLUJO CRÍTICO
CAPÍTULO VI.-	FLUJO RETARDADO
	FLUJO BRUSCAMENTE VARIADO
	EJERCICIOS
	BIBLIOGRAFÍA

Se hace de su conocimiento que al finalizar su trabajo de Tesis, el asesor deberá firmar de conformidad antes de mandarlo a imprimir, esto con el propósito de que no existan errores en su impresión.

Sin otro particular, le saludo cordialmente.

ATENTAMENTE
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

M. en C. JUAN JOSÉ VILLALPANDO GAZACA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
UNIDAD ZACATENCO



JJVC/CJF/im

ÍNDICE

ÍNDICE

I.- INTRODUCCIÓN

II.- GENERALIDADES

- 2.1.- DESCRIPCIÓN
- 2.2.- TIPOS DE FLUJOS
- 2.3.- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS CANALES
- 2.4.- ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS
CANALES
- 2.5.- GEOMETRÍA TÍPICA DE LOS CANALES
- 2.6.- CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL FLUJO EN LOS CANALES
ABIERTOS

III.- ECUACIONES BÁSICAS

- 3.1.- ECUACIÓN DE CONTINUIDAD
- 3.2.- ECUACIÓN DE LA ENERGÍA
- 3.3.- ECUACIÓN DE IMPULSO Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO

IV.- FLUJO UNIFORME

- 4.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL FLUJO UNIFORME
- 4.2 ECUACIÓN DE CHÉZY
- 4.3 ECUACIÓN DE MANNING
- 4.4 SELECCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD "n"
- 4.5 MÉTODOS PARA DETERMINAR EL TIRANTE NORMAL (UNIFORME)
 - 4.5.1 MÉTODO DEL NOMOGRAMA
 - 4.5.2 MÉTODO ALGEBRAICO
 - 4.5.3 MÉTODO GRÁFICO

V.- FLUJO CRÍTICO

- 5.1 ENERGÍA ESPECÍFICA
- 5.2 CONDICIÓN DEL RÉGIMEN CRÍTICO

5.3 MÉTODOS PARA CALCULAR EL TIRANTE CRÍTICO

5.3.1 MÉTODO DEL NOMOGRAMA O DE LA CARTA (APROXIMADO)

5.3.2 MÉTODO ALGEBRAICO (EXACTO)

5.3.3 MÉTODO GRÁFICO (APROXIMADO)

VI.- FLUJO RETARDADO

6.1 REMANSO

VII.- FLUJO BRUSCAMENTE VARIADO

7.1 SALTO HIDRÁULICO

7.2 LONGITUD DEL SALTO HIDRÁULICO

7.3 PÉRDIDA DE ENERGÍA EN EL SALTO HIDRÁULICO

VIII.- EJERCICIOS

IX.- BIBLIOGRAFÍA

INTRODUCCIÓN

I.- INTRODUCCIÓN

Si el agua es vida, todos los seres vivos, y en particular los seres humanos, tienen que tener acceso a este líquido, que hasta hace pocas décadas, se consideraba un "bien natural", es decir, libremente ofrecido por la naturaleza.

Los Derechos Humanos son indivisibles, pero el Derecho a la vida es el derecho supremo, porque sin ella no puede ejercerse ningún otro derecho. Y está directamente relacionado con el derecho a la alimentación, al agua, a la salud, a un medio ambiente limpio, a la paz, a la educación...

Posiblemente, el incremento de la población y el tránsito del hábitat rural al urbano han hecho necesario acumular, conducir, depurar, reciclar, producir... agua potable, convirtiendo la adecuada distribución de los recursos hídricos en auténtica clave de la salud, de la calidad de vida y de la justicia social.

Centrándonos en el agua, su gestión a escala local, nacional e internacional constituye un gran desafío que debe enfrentarse con conocimientos, tecnología e imaginación en los albores de un siglo y milenio en el que, para estar a la altura de las circunstancias, los gobernadores deberán contar con el pueblo, que ya no se debe resignar a aceptar calladamente los designios del poder.

En efecto, la sociedad civil, ha sido en general invisible y anónima, utilizada eventualmente para las manifestaciones de fuerza pero su talento y experiencia - gran tesoro tradicionalmente mal gastado - han permanecido ocultos, inexplorados, desconocidos. A finales del siglo XX y particularmente en la última década tuvo lugar un fenómeno social que ha producido y producirá transformaciones de hondo calado en el comportamiento ciudadano a escala "global": la adquisición de una conciencia planetaria, darse cuenta de que el tiempo de la resignación y del silencio ha concluido y que corresponde a los ciudadanos, en un genuino sistema democrático, tomar en sus manos las riendas del destino. Destino común, como por primera vez puede contemplarse y, por tanto,

comparar, uno de los pilares fundamentales de la ética. Esta cosmovisión forja actitudes propias de ciudadanos capaces de influir decididamente a través de su participación activa, en la gobernación de los pueblos. Poder ciudadano que se ejercerá progresivamente para conferir a la sociedad civil el protagonismo que le corresponde y hacer una realidad de otro mundo posible que la humanidad anhela.

Este otro posible mundo en el que la educación permitirá a todos los seres humanos, únicos e irrepetibles, "dirigir con sentido su propia vida". Una cultura de paz y desarrollo global que erradique la pobreza, que favorezca las energías renovables, el acceso al agua y a la alimentación,...

Para hacer posible este despegue que permita que se cumplan puntualmente los Objetivos del Milenio, la tarea más urgente es la de favorecer la implicación ciudadana, desde los consejos municipales hasta los parlamentos regionales y nacionales así como en las instituciones internacionales, para que todos los seres humanos y no sólo unos cuantos puedan vivir plenamente, sin restricciones, el misterio de su existencia.

Y, para ello, además de la visión global y de la conciencia deliberada de la propia responsabilidad, es necesaria una "reapropiación del tiempo", en palabras de Maria Novo, para que actuemos en virtud de nuestras reflexiones, para que "aprendamos a ser", como objetivo principal de todo el proceso educativo.

Como se indica en el preámbulo de la Declaración Universal de los Derechos Humanos, se trata de liberar del "miedo y de la miseria". Para ello, es tiempo de acción, es tiempo de valores, es tiempo de solidaridad. Tiempo de ciudadanía plena y participativa. Tiempo de democracia plena. Agua para todos, responsabilidad compartida. Éste es, precisamente, el título del Segundo Informe Mundial de las Naciones Unidas relativa a la disponibilidad de los recursos hídricos, del que entresacamos algunos párrafos de particular interés.

Los recursos hídricos del planeta responden a múltiples demandas: la bebida, la higiene, la producción de bienes alimenticios, energéticos e industriales, y la conservación de los ecosistemas naturales. Sin embargo, los recursos en agua son limitados y desigualmente repartidos, lo que representa su gestión y desarrollo de manera sostenible, el aumento de la población, la transformación de sus asentamientos y el cambio climático. Por otra parte, dado que las interacciones de los distintos integrantes del ciclo hidrológico no se hallan con frecuencia bien establecidos, resulta difícil diseñar estrategias de protección y de prevención adecuadas. El clima, en especial las precipitaciones y las temperaturas, es el principal responsable de los recursos hídricos, ya que se hallan en permanente interacción con la tierra, los océanos y la topografía.

Todos los componentes de este ciclo – precipitaciones, infiltraciones, evaporación, transpiración...- deben tenerse en cuenta cuando se elaboran planes de gestión. Además de la contribución de la lluvia y la nieve y su influencia directa en el desarrollo agrícola y los ecosistemas terrestres, es cada día más relevante disponer de datos relativos a las aguas subterráneas y los acuíferos, en particular los países en los que la ausencia de recursos hídricos en la superficie es crítica.

En numerosas regiones del mundo, la influencia humana llega a ser más importante que la de los factores naturales. Con la construcción de obras hidráulicas, se modifican los cursos fluviales y todo el sistema hídrico "capilar". Por otra parte, la deforestación, la urbanización y el aumento de cultivos tienen una influencia significativa en la cantidad y calidad del agua superficial. ¿Cómo se puede compensar la variabilidad natural del ciclo hidrológico de tal manera que el recurso hídrico permanezca disponible de forma continuada? ¿Cómo superar la reducción de la calidad y cantidad de los recursos naturales disponibles afectada por el impacto de las actividades humanas y del desarrollo industrial y agrícola? Las nuevas tecnologías capaces de aumentar los recursos naturales disponibles y de reducir el consumo de agua al tiempo que se obtiene un rendimiento incluso mejor, forman parte de las respuestas a estas preguntas. En efecto, todos los enfoques y métodos que propician la reducción del consumo de agua, en sus diversas facetas, forman parte de una gestión moderna de los recursos hídricos. La disminución del consumo y la optimización del mismo requieren un cambio considerable de comportamientos tanto de las instituciones y servicios públicos como de los ciudadanos, de tal manera que se deje a un lado, la voluntad política y, de otro, la responsabilidad asumida por la sociedad.

En un gran número de estudios que abarca la ingeniería civil es muy común encontrarse con problemas relacionados al flujo en canales, debido a esto los ingenieros civiles tenemos la obligación de aplicar los conocimientos adquiridos en los cursos de ingeniería hidráulica, resolviendo este tipo de problemas.

OBJETIVO GENERAL

Presentar un compendio en la disciplina de canales con el propósito de brindarles a los estudiantes de Ingeniería, especialmente a los de las carreras de Ingeniería Civil e Ingeniería Agrícola un texto sencillo, y de fácil comprensión en lo relacionado a los fenómenos que ocurren en flujo a superficie libre.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.- Motivar el estudio de flujo en canales en alumnos de licenciatura, ya que sólo se presentan las ecuaciones básicas, sin engorrosas deducciones matemáticas.

2.- Elaborar una guía para el estudiante en la asignatura de Tuberías y Canales que se imparte actualmente en el quinto semestre de la licenciatura de Ingeniería Civil, en el Instituto Politécnico Nacional.

3.- Elaborar una guía para el profesionista que actualmente desempeñan obras hidráulicas relacionadas con el flujo en canales.

4.- Presentar un material de apoyo para el profesor que imparte la asignatura de tuberías y canales.

GENERALIDADES

II.- GENERALIDADES

2.1.- DESCRIPCIÓN

El escurrimiento o flujo de agua en un conducto puede ser un escurrimiento en canal abierto o en tubería. Las dos clases de escurrimiento son similares en muchos aspectos, pero difieren en un punto importante: El escurrimiento en canal abierto debe tener una superficie libre y fluir estrictamente por acción de la gravedad, mientras que el escurrimiento en tubería no presenta superficie libre de agua, debe llenar el conducto totalmente en su sección transversal.

No obstante hay similitud entre los dos tipos de escurrimientos, resolver problemas de escurrimiento en canales abiertos es mucho más difícil que en tuberías. Las condiciones del escurrimiento en canales abiertos son complicadas por el hecho de que la posición de la superficie libre cambie en función del tiempo y del espacio. Datos experimentales confiables sobre el escurrimiento en canales abiertos son normalmente difíciles de obtener. Más aún, las condiciones físicas de los canales abiertos varían mucho más que las de las tuberías. La sección transversal de una tubería es generalmente redonda, pero la de un canal abierto puede ser de cualquier forma, desde la circular hasta las formas irregulares de las corrientes o cursos naturales, como ya se ha mencionado. En tuberías, la superficie interior normalmente varía en rugosidad desde la de tuberías nuevas y pulida de bronce, o cobre a las de hierro viejo y oxidado. En canales abiertos la superficie varía desde la correspondiente a un metal pulido usado en canales de prueba a la de canales de tierra con vegetación en la superficie. De este modo, la selección de los coeficientes de fricción está sujeta a una mayor incertidumbre para canales abiertos que para tuberías. En general, el tratamiento de escurrimientos en canales abiertos es algo más empírico que aquel de escurrimiento en tuberías.

Los canales (conductos a superficie libre), se pueden utilizar en los siguientes casos:

Drenaje Urbano: Este tipo de sistema está constituido por una serie de conductos cerrados parcialmente llenos que puede ser el alcantarillado sanitario, pluvial o combinado.



Canalización de corrientes naturales: Este tipo de estructuras se construyen en las cercanías de obras que deben ser protegidas de los efectos de los caudales ordinarios o extraordinarios de un arroyo o de un río resultado de las precipitaciones pluviales.



Alcantarillas: También llamadas obras de drenaje transversal, son estructuras de formas diversas, cuya función es desalojar lo más rápidamente posible el agua de los arroyos, cañadas, vaguada (talweg), hondonada, etc., que por no poder desviarse en otra forma, tengan que cruzar de un lado a otro un camino.



Riego y drenaje agrícola: Las zonas de riego cuentan con kilómetros de canales de secciones transversales variadas, que constituyen el "Sistema de Distribución" que lleva el agua a los cultivos, y el "Sistema de drenaje", el cual extrae el agua excedente de la zona de riego.





Centrales Termoeléctricas: Los canales se utilizan para conducir el agua que propiciará el enfriamiento en sus intercambiadores de calor, estas plantas requieren un suministro importante de agua fría, lo cual hace necesario un sistema muy grande de conductos a superficie libre para aportar el agua a la planta y luego devolver el agua caliente a la fuente, en un sitio tal que no se presente una recirculación inmediata.



Obras hidráulicas en general: Los canales son una parte importante en grandes obras hidráulicas como son las presas de almacenamiento, derivación, bocatomas simples o directas, etc.



2.2- TIPOS DE FLUJOS

El flujo en canales puede clasificarse de la siguiente manera.

➤ *CLASIFICACIÓN MÁS USADA*

- Con respecto al tiempo

Flujo o escurrimiento permanente. El escurrimiento en un canal abierto se dice que es permanente si la profundidad del escurrimiento no cambia o si se supone constante durante el intervalo de tiempo. En la mayor parte de los problemas de canales abiertos, es necesario estudiar el procedimiento solamente bajo condiciones permanentes. Sin embargo, el cambio de las condiciones del escurrimiento con respecto al tiempo es grande, el escurrimiento deberá ser tratado como no permanente. Esto es:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} = 0$$

Flujo o escurrimiento no permanente. Por ejemplo en avenidas y mareas, las cuales son ejemplos típicos de escurrimientos no permanentes, la forma del escurrimiento cambia instantáneamente a medida que las olas pasan, y el elemento tiempo se hace vitalmente importante en el diseño de estructuras de control. Esto es:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0$$

- Con respecto a la distancia entre dos puntos del flujo.

Permanente y uniforme. La variación del tirante con respecto a la distancia "x" es constante.

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \text{Constante}$$

Permanente y no uniforme o variado. La variación del tirante con respecto a la distancia "x" no es constante.

$$\frac{\partial h}{\partial x} \neq \text{Constante}$$

- Con respecto a la velocidad (Flujo no uniforme).

Gradualmente variado o acelerado (Remanso)

Bruscamente variado (Salto hidráulico)

- Con respecto a la gravedad (Froude)

Régimen Supercrítico $F_R > 1$

Régimen Crítico $F_R = 1$

Régimen Subcrítico $F_R < 1$

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g \cdot d_m}}$$

F_R = Número de Froude.

v = Velocidad del flujo.

g = Aceleración de la gravedad.

d_m = Tirante medio = área hidráulica de la sección entre el ancho de la superficie libre del agua.

➤ OTRA CLASIFICACIÓN

Tomando en cuenta la viscosidad cinemática (δ)

Laminar $Re < 500$

Transición $500 < Re < 2000$

Turbulento $Re > 2000$

$$Re = \frac{v \cdot Rh}{\delta}$$

Re = Número de Reynolds

v = Velocidad media

Rh = Radio hidráulico de la sección transversal

δ = Viscosidad cinemática del fluido

Tomando en cuenta la viscosidad dinámica (μ)

$\mu = 0$; Flujo Real

$\mu \neq 0$; Flujo Ideal

De acuerdo a la densidad del flujo (ρ)

$\delta = \text{cte.}$ Incompresible

$\delta \neq \text{cte.}$ Compresible

Dimensionalmente

Unidimensional

Bidimensional

Tridimensional

2.3.- CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS CANALES

Los canales naturales incluyen todos los cursos de agua que existen naturalmente sobre la tierra, variando en tamaño y forma.

Las propiedades hidráulicas de los canales naturales son generalmente muy irregulares. En algunos casos se pueden hacer hipótesis empíricas razonablemente consistentes con las observaciones actuales y la experiencia se puede hacer de tal forma que las condiciones de flujo en estos canales sean adecuadas al tratamiento analítico de la hidráulica teórica. Un estudio comprensivo del procedimiento del flujo en canales naturales requiere un conocimiento de otros campos, tal como hidrología, geomorfología, transporte de sedimentos, etc.

Los canales artificiales son aquellos construidos o desarrollados por el esfuerzo humano: Canales de navegación, de irrigación y canaletas, zanjas de drenaje, cubetas de vertederos, alcantarillas, etc. La aplicación de las teorías hidráulicas a canales artificiales producirá, así, resultados aproximados a las condiciones naturales y por lo tanto, razonablemente seguros para propósitos de diseño práctico.

Un canal es un conducto normalmente de trazo largo y de pendiente suave construido generalmente en la tierra y que puede ser revestido o no con mampostería, cemento o madera.

El acueducto es un canal de madera, metal, hormigón o mampostería, normalmente soportado sobre o arriba de la superficie del terreno, para llevar agua a través de una depresión.

La alcantarilla, es un canal cubierto de corta longitud comparativamente, instalada para drenar agua a través de terraplenes de carreteras o ferrocarriles. *El túnel* es un canal cubierto, comparativamente largo, usado para llevar agua a través de una colina o cualquier obstrucción en el terreno.

Un canal construido con sección transversal constante y pendiente del fondo también constante, se denomina un canal prismático.

El término *sección del canal* se refiere a la sección transversal de un canal tomada normalmente a la dirección del flujo.

Los canales artificiales se proyectan usualmente con sección de formas geométricas regulares. La forma trapezoidal es la más común para canales con terraplenes de tierra sin revestir, pues suministra pendientes laterales para la estabilidad. El rectángulo y el triángulo son casos especiales del trapecio, ya que el rectángulo tiene paredes verticales y se usan comúnmente para canales construidos de materiales estables tales como mampostería revestida, roca, metal o madera. La sección triangular es utilizada solamente para pequeñas zanjas, cunetas y trabajos de laboratorio. El círculo es la sección para colectores y alcantarillas de tamaño pequeño y mediano. La parábola es usada como una aproximación de secciones de canales naturales de tamaño pequeño y mediano.

2.4 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS CANALES

Los *elementos geométricos* son propiedades de una sección del canal que pueden ser definidas enteramente por la geometría de la sección y la profundidad del canal. Estos elementos son muy importantes y son usados ampliamente en cálculos de escurrimiento. Para secciones complicadas y en secciones de corrientes naturales, ninguna fórmula simple se puede escribir para expresar estos elementos.

✓ TIRANTE "Y" o "d"

Es la distancia vertical del punto más bajo de una sección de un canal a la superficie libre. Este término se usa a menudo indistintamente con la *profundidad de la sección del flujo d*. Estrictamente hablando, la profundidad de la sección del canal conteniendo el agua. Para un canal con una pendiente longitudinal de ángulo θ , se puede ver en la profundidad del flujo es igual a la profundidad de la sección dividida entre el coseno θ . En el caso de canales con grandes pendientes, entonces; los dos términos deberían usarse de forma diferente.

Si $\theta = 6^\circ$ la nomenclatura para el tirante es "Y"

Si $\theta > 6^\circ$ la nomenclatura para el tirante es "d"

✓ COTA

Es la elevación o distancia vertical de la superficie libre sobre una referencia dada. Si el punto más bajo de la sección del canal se ha elegido como la referencia, la cota es idéntica con la profundidad del escurrimiento.

✓ ÁREA HIDRÁULICA (Ah)

Área de la sección transversal que ocupa el líquido.

✓ **PERÍMETRO MOJADO (Pm)**

Longitud en donde el fluido está en contacto con las paredes del conducto, no se debe incluir la superficie libre del agua.

✓ **RADIO HIDRÁULICO (Rh)**

Es el resultado de dividir el área hidráulica "Ah" y el perímetro mojado (Pm).

$$Rh = \frac{Ah}{Pm}$$

✓ **ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA (S. L. A.) (B) o (T)**

Es la distancia la sección del canal en la superficie libre del agua.

✓ **TALUD (K), (t), (m) o (z)**

Inclinación de las paredes de un canal. Relación de unidades de longitud horizontal por cada unidad de longitud vertical. Si $K=t=0.5$, la relación es 0.5:1, si $K=t=1$ la relación es 1:1

✓ **TIRANTE MEDIO, TIRANTE HIDRÁULICO o PROFUNDIDAD HIDRÁULICA (dm)**

Cociente o razón del área hidráulica entre el ancho de la superficie libre del agua.

$$dm = \frac{Ah}{B} = \frac{Ah}{T}$$

✓ **FACTOR DE SECCIÓN PARA FLUJO CRÍTICO (Z)**

$$Z = Ah\sqrt{dm} = Ah\sqrt{\frac{Ah}{B}} = \frac{Q}{\sqrt{g}}$$

✓ **FACTOR DE SECCIÓN PARA FLUJO UNIFORME (Z)**

$$Z = AR^{2/3}$$

✓ **PENDIENTE DE LA PLANTILLA DEL CANAL (Z₀)**

$$Z_0 = \frac{hf}{L}$$

Hf = Pérdidas de energía debidas a la fricción.

L = Longitud del canal que se está analizando.

✓ **PLANTILLA**

Es el fondo plano de los canales cuya sección es rectangular o trapecial.

✓ **ANCHO DE LA PLANTILLA (b)**

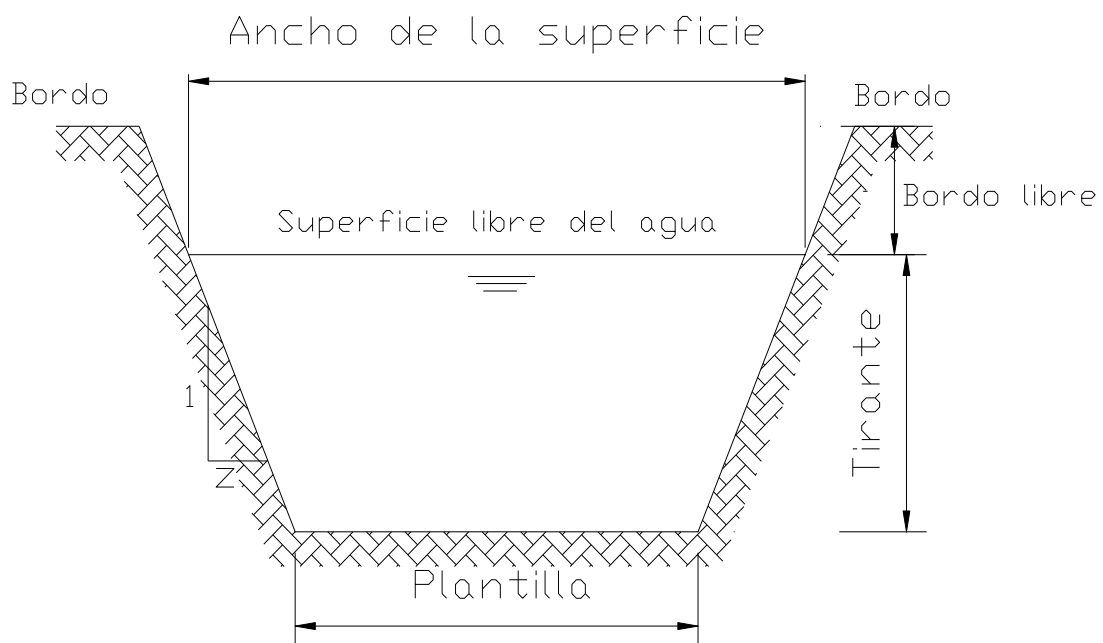
Es la longitud del fondo plano de un canal de la sección transversal.

✓ **BORDO**

Terracerías que limitan lateralmente al canal, por ambas partes.

✓ **BORDO LIBRE (B. L.)**

Es el desnivel que como margen de seguridad se debe establecer entre el nivel de la superficie libre del agua (S. L. A.) y la cota de la corona de los bordos del canal o del revestimiento, en su caso. El objetivo es evitar que el agua derrame sobre los bordos.

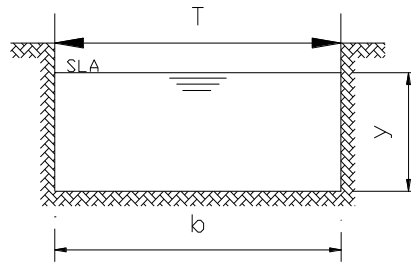


2.5 GEOMETRÍA TÍPICA DE LOS CANALES

Las formas que se utilizan con frecuencia en canales abiertos incluyen las circulares, rectangulares, trapezoidales y triangulares. Las tablas siguientes proporcionan las formulas para calcular las características geométricas que son pertinentes a los cálculos de flujo en canales abiertos.

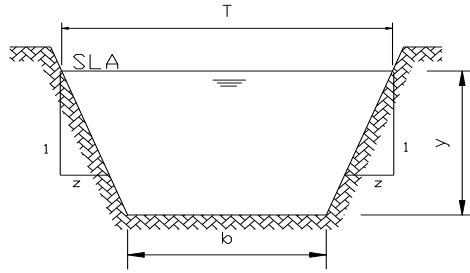
La forma trapezoidal es popular por varias razones. Es una forma eficiente debido a que proporciona un área de flujo grande en relación con el perímetro mojado. Los lados con pendiente son adecuados para canales fabricados en la tierra debido a que las pendientes pueden fijarse a un ángulo al cual los materiales de construcción son estables.

➤ SECCIÓN RECTANGULAR



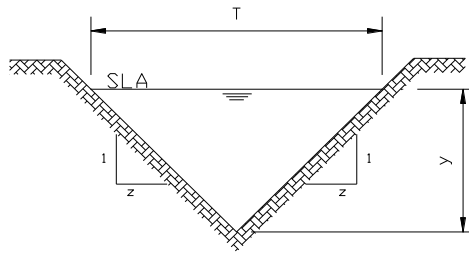
ÁREA HIDRÁULICA	PERÍMETRO MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA	FACTOR DE SECCIÓN
by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y	$by^{1.5}$

➤ SECCIÓN TRAPEZIAL



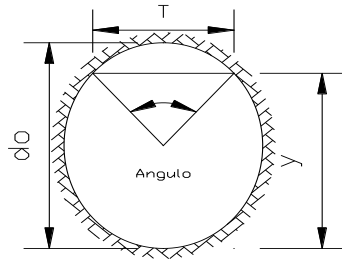
ÁREA HIDRÁULICA	PERÍMETRO MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA	FACTOR DE SECCIÓN
$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$	$\frac{[(b + zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2zy}}$

➤ SECCIÓN TRIANGULAR



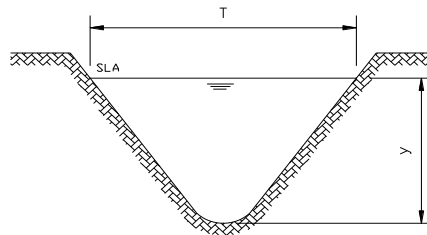
ÁREA HIDRÁULICA	PERÍMETRO MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA	FACTOR DE SECCIÓN
zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{\sqrt{2}}{2}zy^{2.5}$

➤ SECCIÓN CIRCULAR



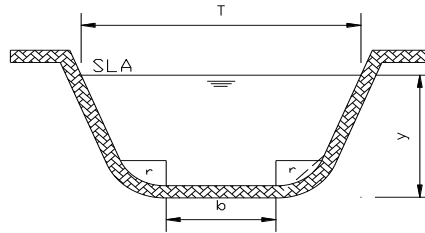
ÁREA HIDRÁULICA	PERÍMETRO O MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA	FACTOR DE SECCIÓN
$\frac{1}{8}(\theta - \text{sen})do^2$	$\frac{1}{2}\theta do$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right)do$	$2\sqrt{1+z^2}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \text{sen}\theta}{\text{sen}\frac{1}{2}\theta}\right)$	$\frac{\sqrt{2}(\theta - \text{sen}\theta)^{1.5}}{32\left(\text{sen}\frac{1}{2}\theta\right)^{0.5}}do$

➤ SECCIÓN PARABÓLICA



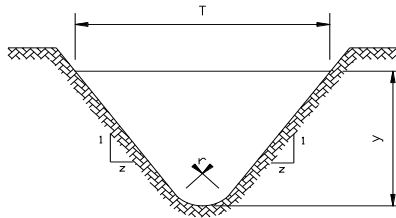
ÁREA HIDRÁULICA	PERÍMETRO MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA	FACTOR DE SECCIÓN
$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{8T}$	$\frac{2T^2y}{3T^3 + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$	$\frac{2}{3}y$	$\frac{2}{9}\sqrt{6T^{1.5}}$

➤ SECCIÓN RECTANGULAR CON ESQUINAS REDONDAS



ÁREA HIDRÁULICA	PERÍMETRO MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA	FACTOR DE SECCIÓN
$\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y$	$(\pi - 2)r + b + 2y$	$\frac{\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y}{(\pi - 2)r + b + 2y}$	$b + 2r$	$\frac{\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2}{b + 2r} + y$	$\frac{\left[\left(\frac{\pi}{2} - 2\right)r^2 + (b + 2r)y\right]^{1.5}}{\sqrt{b + 2r}}$

➤ SECCIÓN TRIANGULAR CON FONDO REDONDO



ÁREA HIDRÁULICA	PERÍMETRO MOJADO	Rh	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE	PROF. HIDRÁULICA	FACTOR DE SECCIÓN
$\frac{T^2}{4z} - \frac{r^2}{z}(1 - z \cot^{-1} z)$	$\frac{T}{z} \sqrt{1 + z^2} - \frac{2r}{z}(1 - z \cot^{-1} z)$	$\frac{A}{P}$	$2\left[z(y - r) + r\sqrt{1 + z^2}\right]$	$\frac{A}{T}$	$A \sqrt{\frac{A}{T}}$

2.6 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS DEL FLUJO EN LOS CANALES ABIERTOS

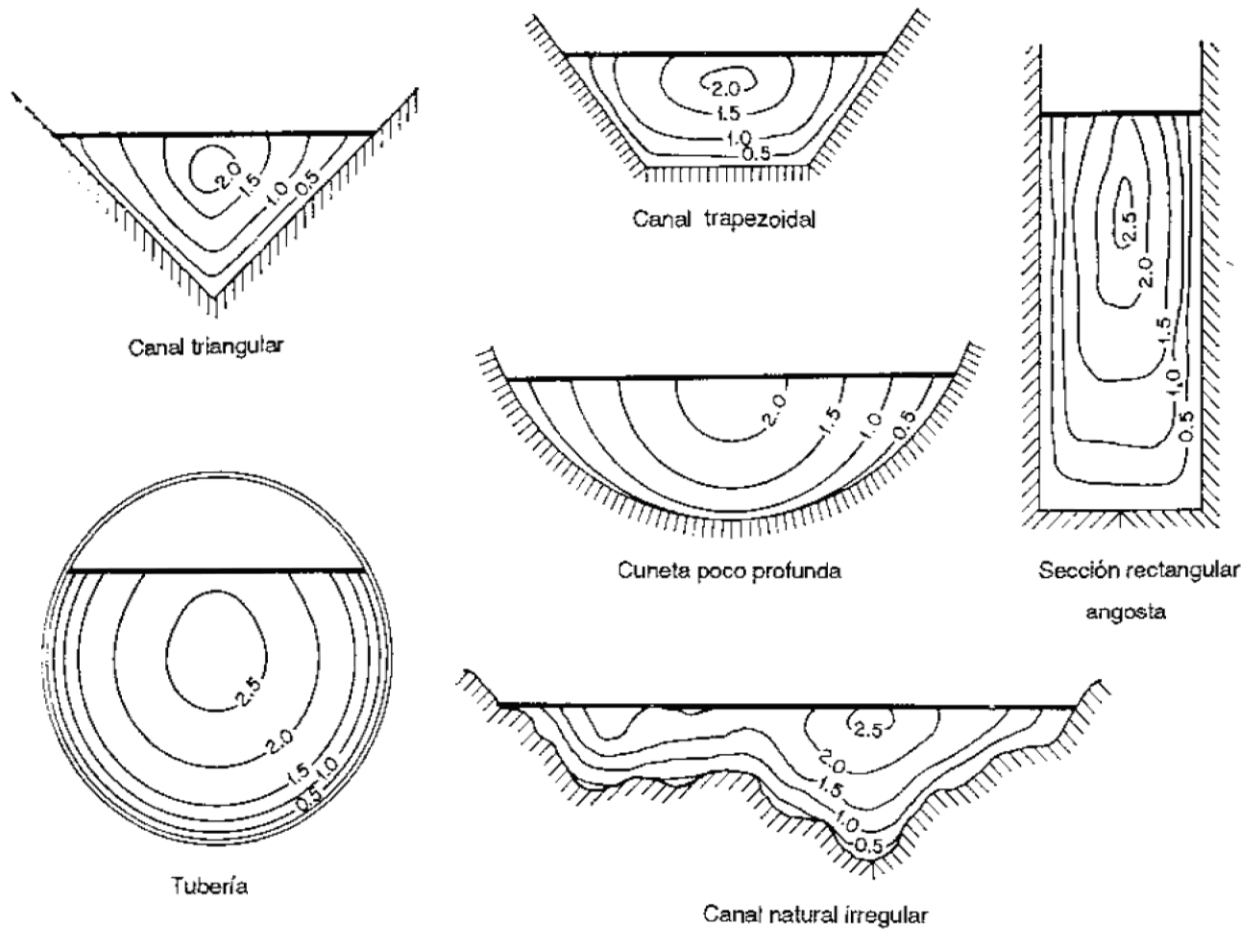
Las siguientes características se estudian en cursos previos de ingeniería hidráulica; sin embargo es de vital importancia en el estudio de los canales, debido a su mayor influencia en los fenómenos anexos que ocurren en este tipo de escurrimiento.

➤ ISOTACAS

En este tipo de conducción se presentan pérdidas de energía por fricción, generadas por el roce que hay entre el flujo y las paredes del conducto. En el caso de las tuberías las máximas velocidades se encuentran en el centro de la sección, esto debido a que es la parte más alejada de las paredes. En los conductos a superficie libre, la parte más alejada de las paredes del conducto es la superficie libre del agua. Pero esta es la interfaz entre el flujo y la presión atmosférica, por lo cual se genera fricción (aunque es mucho menor). El resultado de esto es que la velocidad máxima se presenta a cierta distancia por debajo de la S. L. A.

A diferencia de lo que ocurre en los conductos a presión, en los conductos a superficie libre la distribución de velocidades en la sección depende de varios factores, entre ellos: las proporciones geométricas y las forma de la sección, la cercanía de curvas situadas aguas arriba, los cambios en la forma de la sección de un tramo a otro, la presencia de estructuras, etc.

Las siguientes figuras presentan la distribución de las curvas de igual velocidad o isotacas, en algunos casos comunes.



➤ VORTICIDAD

La vorticidad es un movimiento de giro, generalmente pequeñas, puede avanzar con el flujo y recorrer grandes distancias, mientras va actuando en contra de las paredes del canal, desprendiendo pequeñas partículas sólidas y poniéndolas en suspensión, lo cual facilita el transporte de sedimentos. En el caso de corrientes naturales, la construcción de estructuras extrañas a la corriente (pilas o estribos de puentes) generan una gran producción de vórtices y por consecuencia un desequilibrio en la estabilidad de las partículas sólidas del fondo y las paredes del cauce, lo cual puede dar lugar a efectos de socavación, que en ocasiones desestabilizan las estructuras antes mencionadas.

➤ TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

En los canales excavados de tierra se tiene la acción directa de la velocidad del flujo, que actúan sobre las partículas sólidas con esfuerzos cortantes que tienden a desprenderlas, arrastrarlas y transportarlas, ya sea en forma de arrastre o por suspensión. El equilibrio entre las cantidades de sólido que entran en un tramo y las cantidades de sólidos que salen, determinan la estabilidad del transporte de los sedimentos.

La falta de estabilidad de un canal puede producir grandes daños en el mismo, tanto como por pérdida de material (socavación) como por acumulación del mismo (azolve).



Ejemplo de azolve

ECUACIONES BÁSICAS

III.- ECUACIONES BÁSICAS

En Hidráulica de canales se pueden analizar los fenómenos por medio de tres ecuaciones básicas o fundamentales:

- ***Ecuación de Continuidad.***
- ***Ecuación de Energía.***
- ***Ecuación de impulso y cantidad de movimiento.***

3.1- ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La cantidad de flujo que fluye en un sistema por unidad de tiempo, se puede expresar mediante los tres términos que definimos a continuación:

(Q) *La rapidez de flujo de volumen:* es el volumen del flujo de fluido que pasa por una sección por unidad de tiempo.

(W) *La rapidez de flujo de peso:* es el peso de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo.

(M) *La rapidez de flujo de masa:* es la masa de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo.

El más importante de estos tres términos es la rapidez de flujo de volumen Q, que se calcula con la ecuación:

$$Q = A.v$$

En donde "A" es el área hidráulica de la sección y la "v" es la velocidad promedio del flujo. Las unidades de "Q" se pueden derivar de la manera siguiente, utilizando unidades Sistema Internacional (SI) como ejemplo;

$$Q = A.v = m^2 \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{m^3}{s}$$

Símbolo	Nombre	Definición	Unidades SI	Sistema Británico de Unidades
Q	Rapidez de flujo de volumen	$Q = Av$	m ³ /s	pie ³ /s
W	Rapidez de flujo de peso	$W = \gamma Q$ $W = \gamma Av$	N/s	lb/s
M	Rapidez de flujo de masa	$M = \rho Q$ $M = \rho Av$	kg/s	slugs/s

En la tabla se resumen estos tres tipos de rapidez de flujo de fluido y en ella se dan las unidades estándar tanto en el Sistema Internacional como en el Británico de Unidades. Debido a que los metros cúbicos por segundo y los pies cúbicos por segundo son cantidades muy grandes para la rapidez de flujo, con frecuencia se utilizan otras unidades, como los litros por minuto (LPS) y galones por minuto (gal/min.).

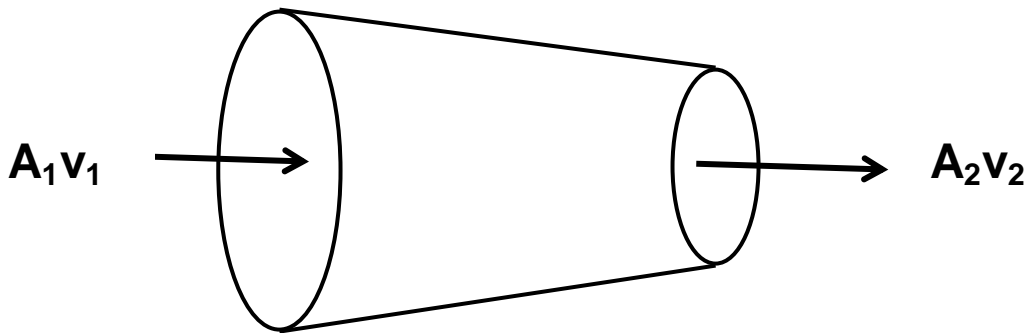
El principio de conservación de la materia (la materia no se crea ni se destruye sólo se transforma) o de transporte de masa permite derivar la primera ecuación fundamental o de *continuidad*. Por lo anterior, de la masa de un fluido que en la unidad de tiempo entra a un volumen especificado dentro del flujo, una parte se queda almacenada en su interior y el resto sale del volumen. Si el volumen que se estudia es de forma y magnitud constante (volumen de control), el almacenaje no puede ser definido.

Matemáticamente es preferible tratar con la cantidad neta de masa que sale y entra, sumadas algebraicamente; así, el principio de conservación de la materia, aplicado a un volumen de control fijo completamente arbitrario dentro del flujo, se expresa de la forma siguiente:

Cantidad neta de masa que atraviesa la superficie de frontera de volumen, en la unidad de tiempo.	+	Rapidez de variación de la masa contenida en el volumen	= 0
---	---	---	-----

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = A_n v_n$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_n \quad (\text{Principio de conservación de la materia})$$



3.2- ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

La ecuación de la energía, permite calcular las diferentes transformaciones de la energía mecánica dentro del flujo y las cantidades disipadas en energía calorífica que, en el caso de los líquidos, no se aprovecha.

En física se aprendió que la energía no puede ser creada ni destruida, sino que puede ser transformada de un tipo a otro. Este es el enunciado de la primera ley de la termodinámica.

- *Energía potencial.* Debido a su elevación, la energía potencial del elemento con respecto de algún nivel de referencia es:

$$PE = wz$$

En la que "w" es el peso del elemento.

- *Energía cinética.* Debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es

$$KE = wv^2 / 2g$$

- *Energía de flujo.* En ocasiones conocida como energía de presión o trabajo de flujo, ésta representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión (*p*). La energía de flujo se abrevia *FE* (Flow Energy) y se calcula a partir de la ecuación.

$$FE = wp / \gamma$$

La energía en una sección transversal es igual a la energía en otra sección situada aguas arriba menos la energía utilizada por el flujo entre las dos secciones.

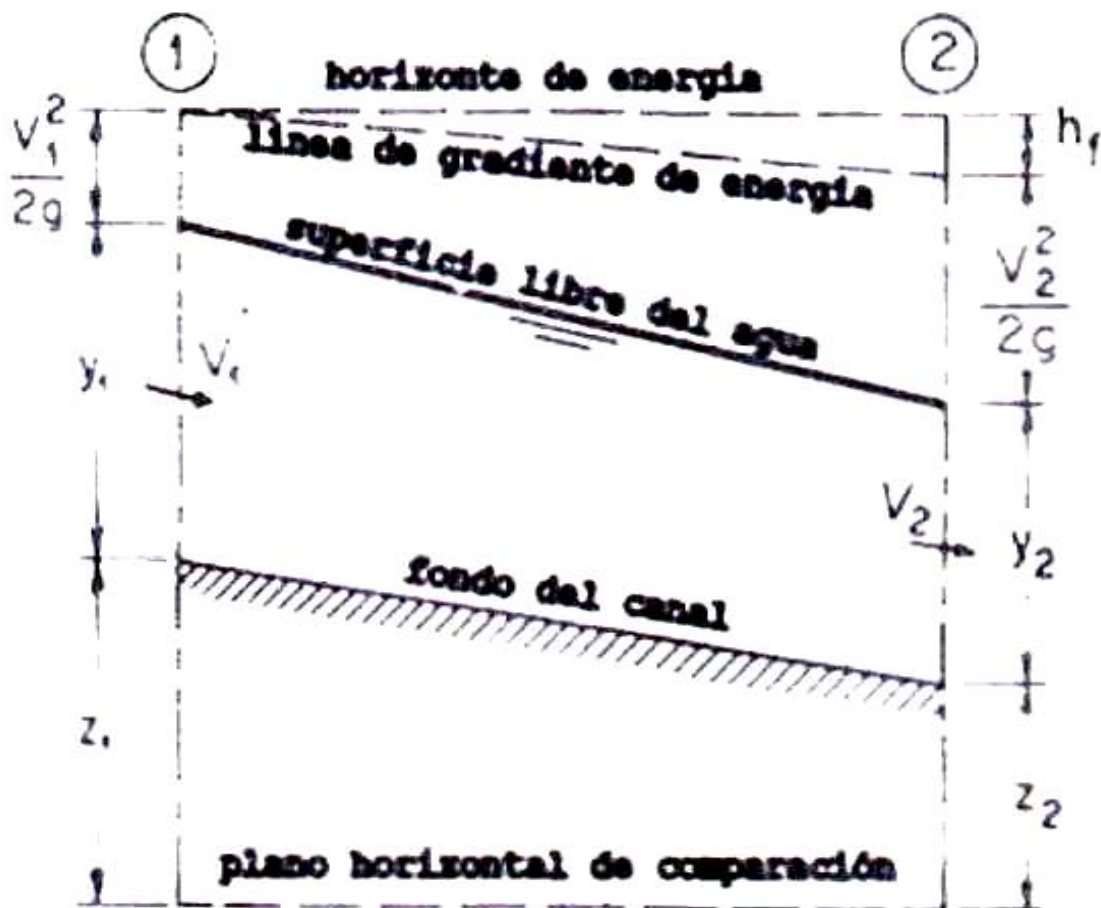
$$z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + hf_{1-2} + \sum h_{K1-2}$$

Z_1 = Es la elevación de la plantilla en la sección uno.

Y_1 = Tirante en la sección uno.

$\frac{v_1^2}{2g}$ = Carga de velocidad en la sección uno.

hf_{1-2} = Pérdida de energía entre las secciones



3.3- ECUACIÓN IMPULSO Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO

$$\Sigma F_x = ma = m \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (mv)$$

$$\Sigma F_x = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{\Delta(m)\Delta(v)}{\Delta t} = \frac{\Delta(m)}{\Delta t} \Delta(v) = \frac{\Delta(\rho v)}{\Delta t} \Delta(v) = \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} \Delta(v) = \rho Q \Delta(v) = \rho Q (v_2 - v_1)$$

Donde:

ρ = Masa específica del líquido $\rho = \frac{m}{V}$

m = Masa involucrada en el fenómeno

V = Volumen considerado

Q = Gasto o caudal $Q = \frac{V}{t}$

t = Tiempo en el que escurre el volumen (V)

FLUJO UNIFORME

IV.- FLUJO UNIFORME

4.1 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO UNIFORME

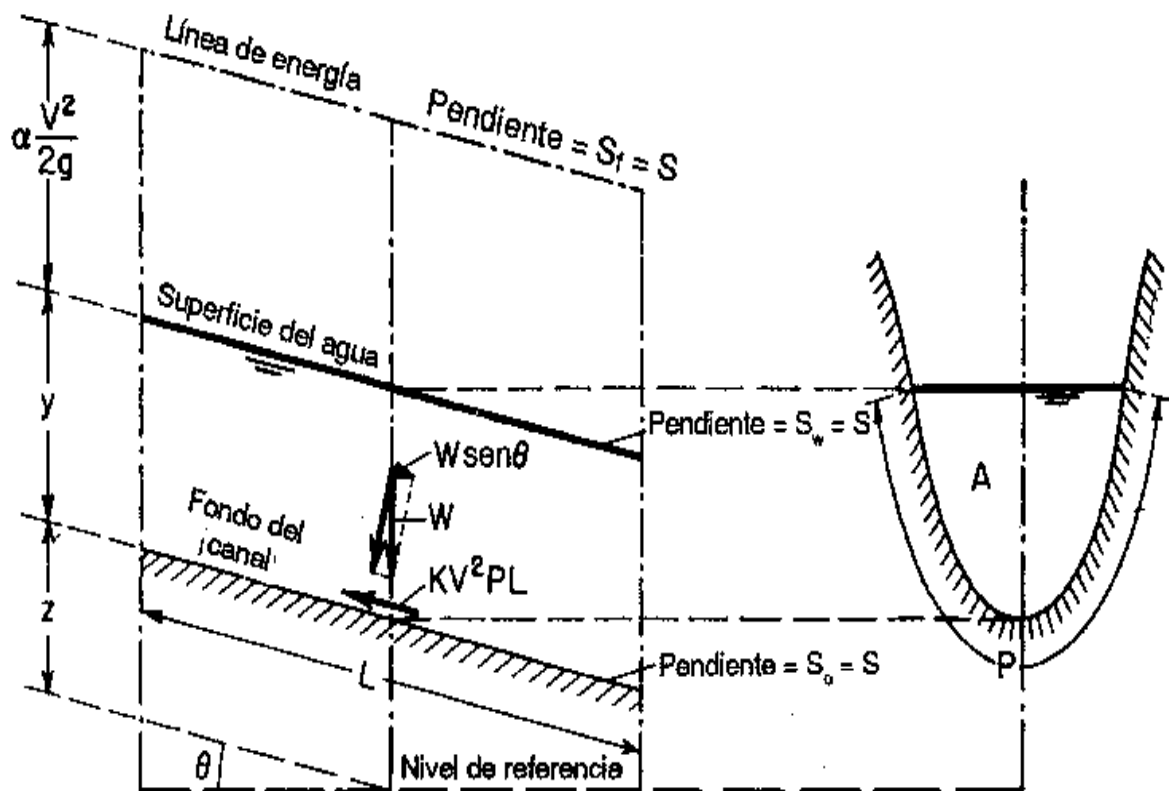
El flujo uniforme para ser considerado como tal, debe cumplir los siguientes aspectos principales:

- El tirante, el área hidráulica, la velocidad y el gasto en cada sección del tramo del canal son constantes.
- La línea de energía, la superficie del agua y fondo del canal son todas paralelas, es decir, sus pendientes son todas iguales, o $S_f = S_w = S_o = S$.

Para propósitos prácticos, el requerimiento de velocidad constante puede ser reemplazado por una velocidad media constante. Esto significa que el flujo posee una velocidad constante en cada punto sobre la sección del canal dentro del tramo de flujo uniforme. En otras palabras, la distribución de velocidad a través del canal no es alterada en el tramo.

Se debe destacar que el flujo uniforme no ocurre a velocidades altas. Esto es porque, cuando el flujo uniforme alcanza una velocidad alta, se hace inestable y no uniforme.

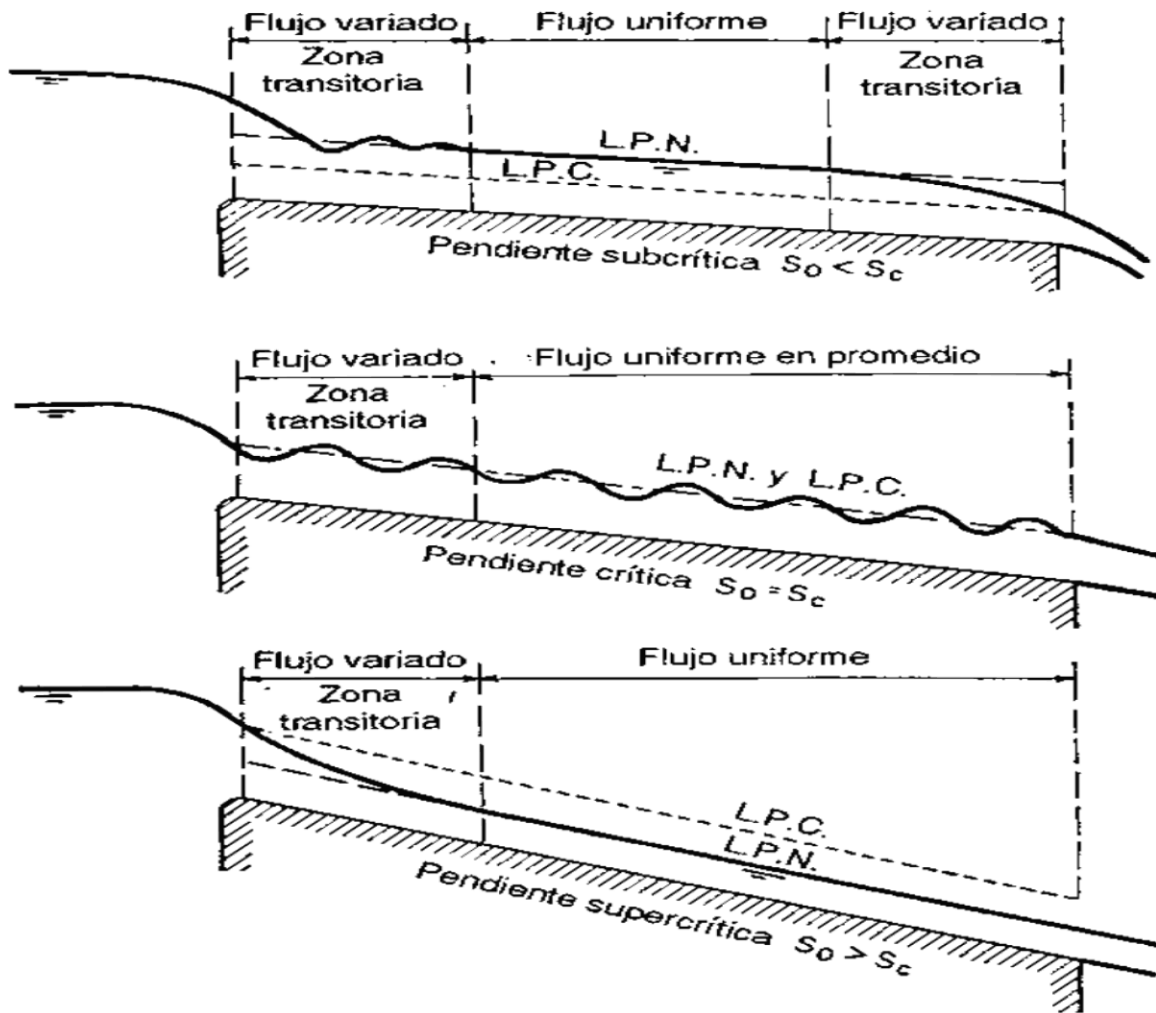
Establecimiento de flujo uniforme:



Cuando el flujo corre en un canal presenta resistencia por el roce del agua en las paredes del conducto, así como entre las mismas partículas del líquido. Esta resistencia se contrarresta generalmente por los componentes de las fuerzas de gravedad que actúan sobre el cuerpo del agua en la dirección del movimiento. Un flujo uniforme desarrollará resistencia al movimiento, y esta resistencia será balanceada por las fuerzas de gravedad. La magnitud de la resistencia depende de la velocidad del flujo. Si el agua entra al canal lentamente, la velocidad y la resistencia es compensada por las fuerzas de gravedad, resultando un flujo acelerado en el tramo de aguas arriba. La velocidad y resistencia se incrementarán gradualmente hasta que se alcance un balance entre las fuerzas de resistencia y las de gravedad. En este momento y de ahí en adelante el flujo se hace uniforme. El tramo de aguas arriba que se requiere para el establecimiento del flujo uniforme es conocido como la zona transitoria. En esta zona el flujo es acelerado y variado. Si el canal es más corto que la longitud transitoria requerida por las condiciones dadas, el flujo uniforme

no se puede obtener. Hacia el extremo corriente abajo del canal, la resistencia puede otra vez ser superada por las fuerzas de gravedad y el escurrimiento puede hacerse otra vez variado.

Para propósitos de explicación, un canal largo es mostrado con tres pendientes diferentes; subcrítica, crítica y supercrítica.



En la pendiente subcrítica (parte superior en la figura, la superficie del agua en la zona transitoria aparece ondulatoria).

El flujo es uniforme en el tramo central del canal pero es variado en los dos extremos.

En la pendiente crítica la superficie del agua del flujo crítico es inestable. Posibles ondulaciones pueden ocurrir en el tramo central, pero en el promedio la profundidad es constante y el flujo puede considerarse uniforme. Más allá de la zona transitoria, el flujo se acerca a la uniformidad. La profundidad de un flujo uniforme es constante. En todas las figuras, la línea punteada larga representa la línea de profundidad normal, abreviada como L. P. N., y la línea punteada corta representa la línea de profundidad crítica, o L. P. C.

La longitud de la zona transitoria depende de la descarga y de las condiciones físicas del canal, tales como condiciones de la entrada, forma, pendiente y rugosidad.

Expresión de la velocidad de un flujo uniforme

Para cálculos hidráulicos la velocidad media de un flujo uniforme turbulento en canales se expresa normalmente por la fórmula de flujo uniforme. La mayoría de las formulas prácticas de flujo uniforme se pueden expresar en la siguiente forma general:

$$V = CR^x S^y$$

V = Velocidad media en pies/segundo

R = Radio hidráulico en ft

S = Pendiente de la energía

x e y = Exponentes

C = Factor de resistencia del flujo, variando con la velocidad media, radio hidráulico, rugosidad del canal, viscosidad y muchos otros.

Para propósitos prácticos, el flujo en un canal natural puede asumirse como uniforme, es decir, si no hay crecidas o flujos variados, causados por irregularidades del canal. Aplicando la fórmula de flujo uniforme a una corriente natural, se comprende que el resultado es muy aproximado ya que la condición del flujo está sujeta a más factores inciertos que los que podrían estar involucrados en un canal regular artificial. Como fue

destacado por Schneckenberg, una buena fórmula de flujo uniforme para un canal aluvial con transporte de sedimentos y flujo turbulento debería tener en cuenta las siguientes variables:

Ah	=	Área hidráulica
v	=	Velocidad media
V _{ms}	=	Velocidad máxima de superficie
Pm	=	Perímetro mojado
Rh	=	Radio hidráulico
y	=	Profundidad máxima del área mojada
S _w	=	Pendiente de la superficie del agua
n	=	Un coeficiente representando la rugosidad del canal, conocido como coeficiente de rugosidad
Qs	=	Carga de sedimento suspendido
Q _b	=	Arrastre de fondo.

Se han desarrollado y publicado un gran número de fórmulas prácticas de flujo uniforme. Las fórmulas mejor conocidas y más ampliamente usadas son las de Chézy y Manning. Fórmulas teóricas del flujo uniforme que han sido también derivadas sobre la base de una distribución teórica de la velocidad a través de la sección del canal.

Una propuesta diferente para la determinación de la velocidad en un canal natural ha sido propuesta por Toebes. Los factores involucrados en la determinación de la velocidad en un canal aluvial dado son: área hidráulica, velocidad máxima de superficie, perímetro mojado, profundidad máxima, pendiente de la superficie del agua, coeficiente de rugosidad y temperatura del agua. Por este método, es posible evaluar la influencia individual de cada variable sobre la magnitud de la velocidad.

4.2 ECUACIÓN DE CHÉZY

El ingeniero francés Antonio Chézy desarrolla la primera fórmula de flujo uniforme, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$v = C\sqrt{RS}$$

Fórmula de Chézy

v = Velocidad media

R = Radio hidráulico

S = Pendiente de la línea de la energía

C = Factor de resistencia del flujo, llamado el C de Chézy.

La fórmula de Chézy se puede derivar matemáticamente partiendo de dos hipótesis. La primera hipótesis fue hecha por Chézy. Establece que la fuerza resistente al flujo por unidad de área del lecho de la corriente es proporcional al cuadrado de la velocidad; es decir, esta fuerza es igual a KV^2 donde K es una constante de proporcionalidad. La superficie de contacto del flujo con el lecho de la corriente es igual al producto del perímetro mojado y la longitud del tramo del canal, o PL . La fuerza total resistiendo al flujo es entonces igual a KV^2PL .

La segunda hipótesis es el principio básico de flujo uniforme, el cual se cree ha sido planteado primero por Brahms en 1754. Él establece que, en flujo uniforme, la componente efectiva de la fuerza de gravedad causando el escurrimiento debe ser igual a la fuerza total de resistencia. La componente efectiva de la fuerza de gravedad es paralela al fondo del canal e igual a $wAL \text{ sen}\theta = wALS$, donde w es el peso unitario del agua, A es el área hidráulica, θ es el ángulo de la pendiente y S es la pendiente del canal. De aquí $wALS = KV^2PL$.

Hagamos $A/P = R$ y permitamos que $\sqrt{w/K}$ sea reemplazado por un factor C .

Entonces la ecuación previa se reduce a $V = \sqrt{(w/K)(A/P)S} = C\sqrt{RS}$ o fórmula Chézy.

Muchos intentos han sido hechos para determinar el valor del "C" de Chézy.

Cálculo del factor de resistencia de Chézy

El valor del coeficiente de Chézy "C" en el sistema Internacional (SI) de unidades varía aproximadamente entre 40 (para paredes rugosas) y 100 (para paredes lisas). Diversos autores han propuesto fórmulas empíricas para calcularlo.

A continuación se presentan algunas de las ecuaciones para determinar el coeficiente de Chézy.

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIÓN
Ganguillet y Kutter	$C = \frac{23 + \frac{0.00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}}$	Se aconseja que se utilice en canales naturales.
Kutter	$C = \frac{100\sqrt{R}}{m + \sqrt{R}}$	Es una simplificación de la anterior, "m" es un coeficiente de rugosidad.
Bazin	$C = \frac{87}{1 + \frac{B}{\sqrt{R}}}$	"B" es un coeficiente de rugosidad.
Manning-Strickler	$C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n}$	Esta fórmula fue obtenida a partir de ensayos de Bazin y posteriormente verificada por observaciones. Es una de las más utilizadas; "n" es un coeficiente de rugosidad.
Kozeny	$C = 20 \log Y + Nc$	"Y" es el tirante, y "Nc" el coeficiente de rugosidad.
Martínez	$C = 17.7 \log \frac{R}{d} + 13.6$	"d" es el diámetro de los granos en el fondo del río, en metros. La fórmula es válida para: $0.15 \leq R \leq 2.25\text{m}$ $0.00004 \leq R \leq 0.0039\text{m}$ $0.004 \leq d \leq 0.25\text{m}$

4.3 ECUACIÓN DE MANNING

En 1889 el ingeniero Irlandés Roberto Manning, quien mide la constante "C" y le confiere el siguiente valor:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$$

Si el valor anterior se sustituye en la ecuación de Chézy se obtiene lo siguiente:

$$v = C\sqrt{RS} \quad \text{Para} \quad C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}$$

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \sqrt{RS}$$

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} R^{\frac{1}{2}} S^{\frac{1}{2}}$$

Realizando operaciones algebraicas resulta:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

Fórmula de Manning

v = Velocidad media en la sección transversal del conducto.

n = Coeficiente de rugosidad que depende de la superficie del conducto.

R = Radio hidráulico de la sección trasversal del canal.

S = Pendiente de la plantilla del canal.

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación de Manning para obtener gasto.}$$

Obsérvese que "A" y "R", son características de la sección y "n" depende del material y de la superficie del canal.

$$AR^{\frac{2}{3}} = \frac{Qn}{S^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Factor de sección para el cálculo de flujo uniforme.}$$

Hay otros autores que manejan la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\phi}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

$\phi = 1$ Para el Sistema Internacional de Unidades.

$\phi = 1.49$ Para el Sistema Inglés.

4.4 SELECCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD "n"

Cuando se aplica la fórmula de Manning se presenta una dificultad; seleccionar el coeficiente de rugosidad "n", pues no hay un método exacto para la selección de dicho valor.

Con el objeto de proporcionar una guía en la determinación apropiada del coeficiente de rugosidad, serán discutidas tres propuestas generales, para la selección de "n".

- 1.- Consultar un cuadro de valores comunes de "n" para canales de varios tipos.
- 2.- Revisar ejemplos y ejercicios de canales típicos cuyos coeficientes de rugosidad son conocidos.
- 3.- Determinar "n" a través de un procedimiento analítico basado en la distribución teórica de velocidad en la sección transversal del canal, y sobre los datos de medidas de velocidad o de rugosidad. (Laboratorio)

Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning:

Para seleccionar el valor de "n" apropiado en diferentes condiciones de diseño, resulta muy útil tener un conocimiento básico de estos factores. Los factores que intervienen en la selección del coeficiente de rugosidad tanto de canales artificiales como en canales naturales se escriben más adelante. Nótese que estos factores están hasta cierto punto interrelacionados.

Rugosidad superficial: Se presenta por el tamaño y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y que producen un efecto retardador del flujo. Por lo general éste se considera como el único factor para la selección de un coeficiente de rugosidad, pero en realidad es sólo uno de varios factores principales. En general, granos finos dan como resultado un valor relativamente bajo de "n", y granos gruesos, un valor alto de "n".

En corrientes aluviales en las cuales el material es fino, como arena, arcilla o limos, el efecto retardador es mucho menor que cuando el material es grueso, como gravas o cantos rodados. Cuando el material es fino, el valor de "n" es bajo y relativamente no se afecta por cambios en el nivel del flujo.

Vegetación: La vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, pero también reduce de manera notable la capacidad del canal y retarda el flujo. Este efecto depende por completo de la altura, la densidad, la distribución y del tipo de vegetación, y es muy importante en el diseño de pequeños canales de drenaje.

Irregularidad del canal: Las irregularidades del canal incluyen irregularidades en el perímetro mojado y variaciones en la sección transversal, tamaño y forma de éste a lo largo del canal. En canales naturales, tales irregularidades por lo general son producidas por la presencia de barras de arena, ondas de arena, crestas, depresiones, fosos y montículos en el lecho del canal. Estas irregularidades introducen rugosidad adicional a la causada por la rugosidad superficial y otros factores. En general, un cambio gradual y uniforme en la sección transversal o en su tamaño y forma no produce efectos apreciables en el valor de " n ", pero cambios abruptos o alteraciones de secciones pequeñas y grandes requieren el uso de un valor grande de " n ". En este caso, el incremento en " n " puede ser 0.005 o mayor.

Alineamientos del canal: Curvas suaves con radios grandes producirán valores de " n " relativamente bajos, en tanto que curvas bruscas con meandros severos incrementan el valor de " n ".

Sedimentación y socavación: En general, la sedimentación puede cambiar un canal muy irregular en un canal relativamente uniforme y disminuir la " n ", en tanto que la socavación puede hacer lo contrario e incrementar la " n ". Sin embargo, el efecto dominante de la sedimentación dependerá de la naturaleza del material depositado. Depósitos no uniformes, como barras de arena y ondulaciones de arena, constituyen irregularidades del canal e incrementarán la rugosidad. La cantidad y uniformidad de la socavación, dependerán del material que conforma el perímetro mojado. Así, un lecho de arena o de gravas se erosionará más uniformemente que un lecho de arcillas. La sedimentación de las arcillas erosionadas en los terrenos aguas arriba tenderá a emparejar las irregularidades en un canal dragado a través de un suelo arcilloso. La energía utilizada para erosionar y mover el material en suspensión o por saltación a lo largo del lecho también incrementará el valor de " n ". El efecto de la socavación no es importante siempre y cuando la erosión en el lecho del canal causado por velocidades altas progrese igual y uniformemente.

Obstrucción: La presencia de obstrucciones de troncos, pilas de puentes y estructuras similares tiende a incrementar la " n ". La magnitud de este aumento depende de la naturaleza de las obstrucciones, de su tamaño, forma, número y distribución.

Tamaño y forma del canal: No existe evidencia definitiva acerca del tamaño y la forma del canal como factores importantes que afecten el valor de " n ". Un incremento en el radio hidráulico puede aumentar o disminuir la " n ", según la condición del canal.

Nivel y caudal: En la mayor parte de las corrientes el valor de " n " disminuye con el aumento en el nivel y en el caudal. Cuando el agua es poco profunda, las irregularidades del fondo del canal quedan expuestas y sus efectos se vuelven pronunciados. Sin embargo, el valor de la " n " puede ser grande en niveles altos si las bancas están cubiertas por pasto o son rugosas.

Cambio estacional: Debido al crecimiento estacional de plantas acuáticas, hierbas, malezas, sauces y árboles en el canal o en las bancas, el valor de "*n*" puede aumentar en la estación de crecimiento y disminuir en la estación inactiva. Este cambio estacional puede producir cambios en otros factores.

Material en suspensión y carga de lecho: El material en suspensión y la carga de lecho, ya sea en movimiento o no, consumirá energía y causará energía, lo que producirá una pérdida de altura e incrementará la rugosidad aparente del canal.

Todos los factores anteriores deben estudiarse y evaluarse con respecto a las condiciones relacionadas con el tipo de canal, el estado de flujo, el grado de mantenimiento y otras consideraciones. Ellos dan una base para determinar el valor de "*n*" apropiado para el problema determinado.

MATERIAL	n
Canales en tierra en buen estado.	0.025 – 0.030
Canales naturales, limpios, rectos, sin deslaves o remansos profundos.	0.030 – 0.033
Canales naturales, limpios, curvos, con algunas irregularidades en el fondo.	0.033 – 0.045
Cauces naturales con mucha hierba, con estanques profundos o cauces de avenidas, con raíces y plantas subacuáticas.	0.075 – 0.150
Canales revestidos de concreto liso, terminados con llana.	0.015

Coefficiente de rugosidad "n" en cauces naturales

Material (no)	Tierra	0.020
	Roca	0.025
	Arena 1 – 2 mm	0.024
	Grava 2 – 20 mm.	0.028
Irregularidades en el fondo y las paredes del cauce (n1)	Liso	0.000
	Irregularidades pequeñas	0.005
	Irregularidades medias	0.010
	Irregularidades grandes	0.020
Cambios en la forma del área hidráulica a lo largo del cauce (n2)	Perfil uniforme	0.000
	Pocos cambios	0.005
	Cambios frecuentes	0.010 – 0.015
Obstáculos (n3)	Despreciables	0.000
	Suaves	0.010 – 0.015
	Notables	0.020 – 0.030
	Bruscos	0.040 – 0.060
Vegetación (n4)	Poca	0.005 – 0.010
	Mediana	0.010 – 0.025
	Mucha	0.025 – 0.050
	Demasiada	0.050 – 0.100

Trazo longitudinal (k)	Aproximadamente recto	1.000
	Curvas suaves	1.150
	Curvas notables	1.200

4.5 MÉTODOS PARA DETERMINAR EL TIRANTE NORMAL (UNIFORME)

4.5.1 Método del nomograma o de la carta

- Cálculo del factor de sección para flujo normal (z); $Z = AR^{\frac{2}{3}}$ y dividirlo entre $b^{\frac{8}{3}}$
- Localizar el valor obtenido en el eje horizontal superior, proyectar verticalmente hacia abajo hasta interceptar la curva correspondiente al talud, marcar ese punto y proyectarlo hacia la izquierda (horizontalmente), obtenido un valor de $\frac{y_n}{b}$
- Despejar el valor del tirante crítico " y_n "

4.5.2 Método algebraico

Se requiere realizar aproximaciones sucesivas a partir de las siguientes ecuaciones:

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad \text{Agrupando términos} \quad AR^{\frac{2}{3}} = \frac{Qn}{S^{\frac{1}{2}}}$$

Nota: La ecuación anterior es solo válida para sección trapezoidal y rectangular.

4.5.3 Método Gráfico

Este método consiste en la construcción de una gráfica, en donde la ordenada adquiera los valores de " y_n " y la abscisa el factor de sección " z ".

$$Z = AR^{\frac{2}{3}}$$

FLUJO CRÍTICO

V.- FLUJO CRÍTICO

El estado crítico del flujo a través de una sección del canal se caracteriza por varias condiciones importantes:

- (1) La energía específica es mínima para una descarga dada.
- (2) La descarga es un máximo para una energía específica dada.
- (3) La fuerza específica es mínima para una descarga dada.
- (4) La altura de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica en un canal de pendiente pequeña.
- (5) El número de "Froude" es igual a la unidad.

Para iniciar el estudio del flujo crítico es importante introducir un concepto fundamental en los conductos a superficie libre: La **energía específica**.

5.1 ENERGÍA ESPECÍFICA

Se define como **energía específica** (E_e) a la suma del tirante más la carga de velocidad, esto es:

$$E_e = d_A \cos \alpha + \frac{v_A^2}{2g}$$

Para un canal de pequeña pendiente y $\alpha = 1$

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

La ecuación anterior en función del gasto resulta:

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

Al compararla con la energía total en la sección:

$$H_A = Z_A + d_A \cos \alpha + \frac{v_A^2}{2g}$$

Se observa que la única diferencia entre la energía específica (E_e) y la energía total (H_T), es la energía potencial o de posición (Z).

Para la comprensión del significado físico de la " E_e ", a continuación se describirá un experimento que puede realizarse en un canal de pendiente variable en el laboratorio de ingeniería hidráulica de la ESIA unidad Zacatenco, y que actualmente es el objeto de una práctica de la asignatura de Tuberías y Canales.

Se alimentará el canal con un gasto constante y conocido, se producirá un flujo uniforme; se irá modificando gradualmente la pendiente, aumentándola a partir de un valor muy pequeño. Para cada valor de la pendiente se deberá medir el valor del tirante normal respectivo.

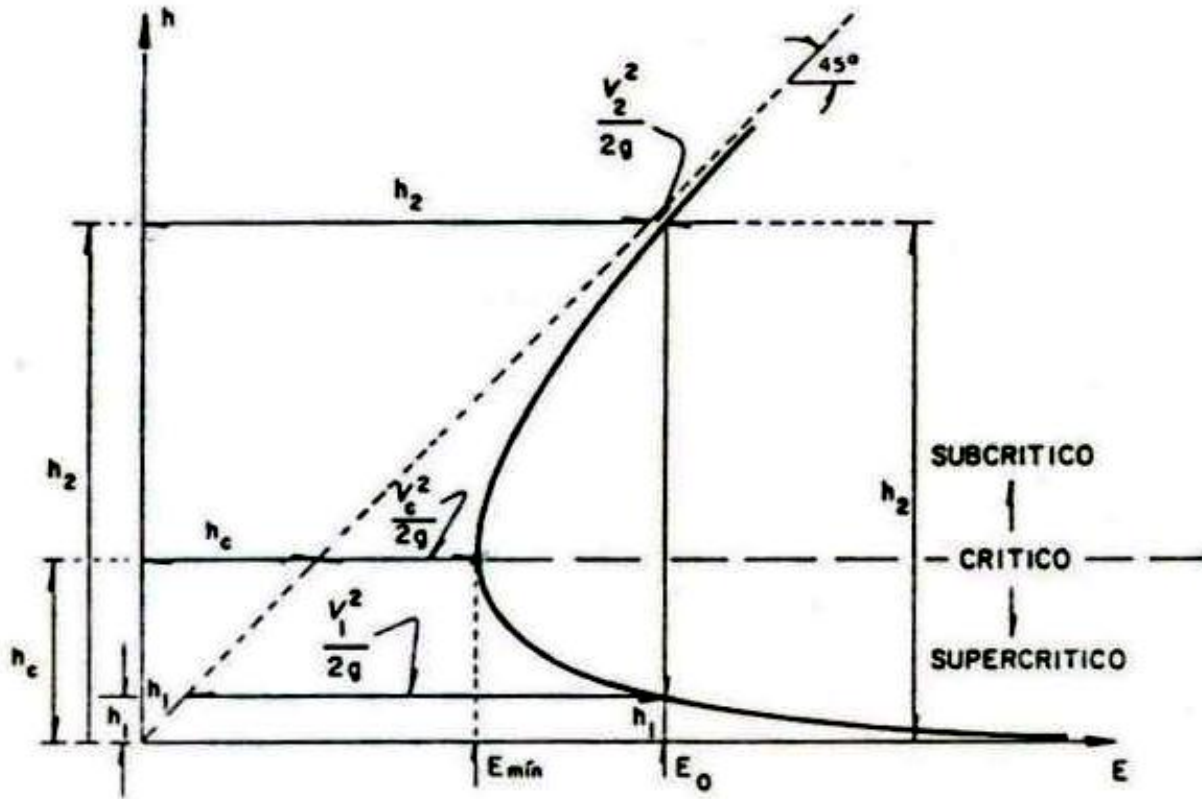
Durante el experimento se podrá observar que, a medida que aumentamos la pendiente, la velocidad incrementa y el tirante disminuye. Al inicio se tendrá un flujo lento y después uno rápido.

Con los datos medidos de los tirantes se calculará la velocidad media en la sección para cada valor del tirante, y se calculará el valor de la energía específica respectiva. Esto es:

N° de experimento	y	v	E_e
1			
2			
3			

Si se grafican los valores ajustados de la curva dos " d ", contra los de la columna cuatro " E_e ", la gráfica resultante es una hipérbola asíntota al eje de las abscisas (E_e) y una recta a 45° que pasa por el origen de coordenadas.

Si se repite el experimento con diferentes valores de gasto, se comprobaría que a un valor mayor del gasto corresponde una hipérbola situada a la derecha.



Interpretación de la figura anterior:

- Si $y \rightarrow \infty$ entonces $E_e \rightarrow \infty$, la asíntota es a 45° y se llama energía potencial.
- Si $y \rightarrow 0$ entonces $E_e \rightarrow \infty$, la asíntota está en el eje "x"
- De la rama "B" a "C" se presenta un flujo Supercrítico $F_R < 1$
- De la rama "A" a "C" se presenta un flujo Subcrítico $F_R > 1$
- El punto "C" se presenta un flujo crítico $F_R = 1$; energía Específica Mínima.
- Existe un punto "C" que corresponde a la energía específica mínima (E_m), se presentará un solo tirante " y_c ", y una sola velocidad " v_c ".

5.2 CONDICIÓN DE RÉGIMEN CRÍTICO

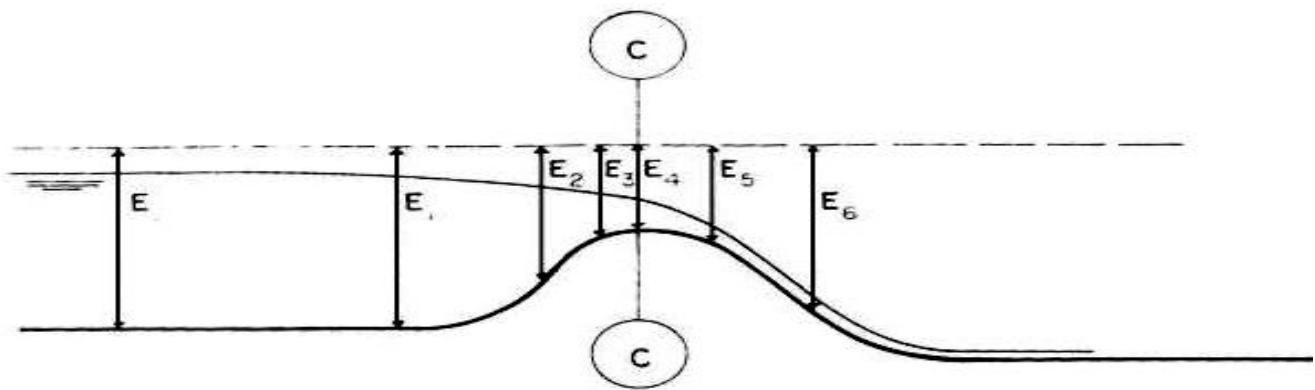
$$E_m = y_c + \frac{v_c^2}{2g}$$

E_m = Energía específica mínima.

y_c = Tirante crítico.

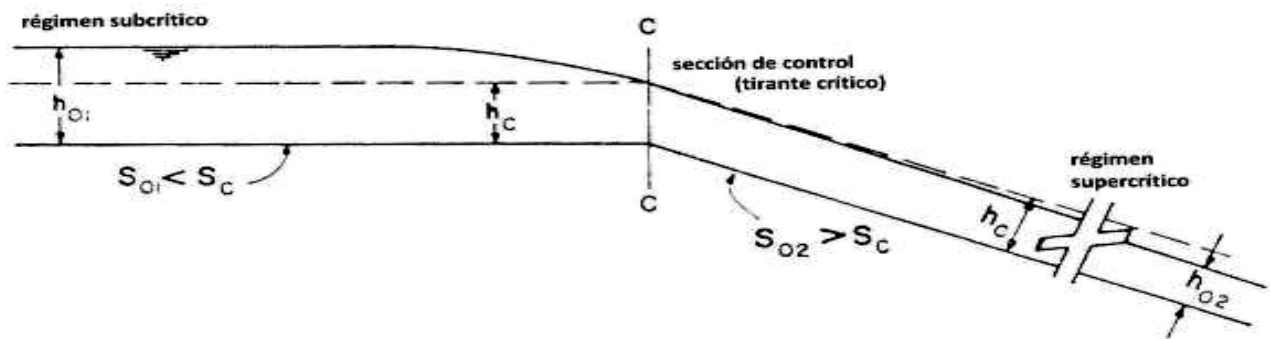
v_c = Velocidad media crítica.

g = Aceleración de la gravedad.



$$E_1 > E_2 > E_3 > E_4 < E_5 < E_6; \quad E \text{ mínima} = E_4 \text{ (en la cresta)}$$

INTERPRETACIÓN A LO LARGO DE UN CANAL CON CAMBIO DE PENDIENTE



El punto "C" se le denomina sección de control; es el punto en donde se presenta el tirante crítico.

- El flujo subcrítico o lento se presenta cuando:
 - $F_R < 1$
 - La pendiente $S_0 < S_c$
 - El tirante del flujo es mayor que el tirante crítico $y_1 > y_c$

- El flujo supercrítico o rápido se presenta cuando:
 - $F_R > 1$
 - La pendiente $S_0 > S_c$
 - El tirante del flujo es menor que el tirante crítico $y_2 < y_c$

- Es un flujo crítico:
 - La energía específica es mínima para un "Q" determinado.
 - El gasto es un máximo para una energía específica dada.
 - La pendiente del fondo del canal (S_0) es igual a la pendiente crítica (S_c).
 - El tirante del flujo es igual al tirante crítico (y_c).
 - Froude es igual a uno, $F_R = 1$.
 - El factor de sección es el siguiente;

$$Z = A \sqrt{dm} = A \sqrt{\frac{A}{B}} = \frac{Q}{\sqrt{g}}$$

- Si se tiene un tirante crítico (y_c), también se tendrá un área hidráulica crítica (A_c), radio hidráulico crítico (R_{h_c}), perímetro mojado crítico (P_{m_c}), etc.

5.3 MÉTODOS PARA CALCULAR EL TIRANTE CRÍTICO

5.3.1 Método del nomograma o de la carta (aproximado)

- Cálculo del factor de sección para flujo crítico (z); $Z = \frac{Q}{\sqrt{g}}$ y dividirlo entre $b^{2.5}$
- Localizar el valor obtenido en el eje horizontal superior, proyectar verticalmente hacia abajo hasta interceptar la curva correspondiente al talud, marcar ese punto y proyectarlo hacia la izquierda (horizontalmente), obtenido un valor de $\frac{y_c}{b}$
- Despejar el valor del tirante crítico "y_c"

5.3.2 Método Algebraico (exacto)

Utilizar las siguientes ecuaciones para el cálculo de tirante crítico, de acuerdo a la forma de la sección transversal del canal.

- **Sección Rectangular.**

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \qquad q = \frac{Q}{B} = h * v$$

- **Sección Triangular.**

$$h_c = \sqrt[5]{\frac{2}{g} \left(\frac{Q}{k} \right)^2}$$

q = Gasto unitario

Q = Gasto total

B = Ancho de la superficie libre del agua

h = Tirante

v = Velocidad del líquido

k = Talud

➤ **Sección triangular.**

$$h_{CT} = \left(1 - \frac{\sigma}{3} + 0.105\sigma^2 \right) h_{CR}$$

$$h_{CR} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}} \quad \sigma = \frac{mh_{CR}}{b}$$

5.3.3 Método Grafico (aproximado)

Este método consiste en la construcción de una gráfica, en donde la ordenada adquiera los valores de " y_c " y las abscisas el factor de sección " z ". En donde el factor de sección es:

$$Z = A\sqrt{d_m} = \frac{Q}{\sqrt{g}} = A\sqrt{\frac{A}{B}}$$

FLUJO RETARDADO

VI.- FLUJO RETARDADO

6.1 REMANSO

Al colocar un obstáculo en un canal o en el río el tirante se incrementa dando lugar a lo que se llama remanso, en el caso de la presa de derivación hay un remanso causado por el dique vertedor.

Los tirantes que están relativamente cerca del dique vertedor, puesto que son los de mayor valor, son los que pueden causar inundaciones en los terrenos adyacentes.

Existen varias formas para calcular el tirante a una cierta distancia del obstáculo, sin embargo, los resultados no son muy precisos, una forma de calcular los tirantes es por medio de la aplicación sucesiva del Teorema de Bernoulli.

EJEMPLOS

1.- Una acequia rectangular ($n=0.013$) tiene 1.80 m. de ancho y transporta $1,782 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua. En una cierta sección F la profundidad es de 9.96 m. Si la pendiente del canal es constante e igual a 0.0004, determinar la distancia que hay entre la sección F y la sección donde la profundidad es 0.81 m.

$$Q = 9.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$n = 0.013$$

$$S = 0.0004$$

$$b = 2d$$

Solución:

Se supone que la sección cuya profundidad es 0.81 m. está aguas arriba de F .

$$A_1 = 1.80(0.81) = 1.458 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 1.80(0.96) = 1.728 \text{ m}^2$$

$$V_1 = 1.782 / 1.458 = 1.221 \text{ m/s}$$

$$V_2 = 1.782 / 1.728 = 1.032 \text{ m/s}$$

$$R_1 = 1.458 / 3.42 = 0.426 \text{ m}$$

$$R_2 = 1.728 / 3.72 = 0.465 \text{ m}$$

$$\text{De ahí, } V_{media} = 1.728 \text{ m/s} \quad \text{y} \quad R_{media} = 0.445 \text{ m}$$

Entonces, para flujo no uniforme.

$$L = \frac{\left(\frac{V_2^2}{2g} + y_2\right) - \left(\frac{V_1^2}{2g} + y_1\right)}{S_0 - s} = \frac{(0.055 + 0.96) - (0.077 + 0.81)}{0.0004 - \left(\frac{0.013 \times 1.126}{0.445^{2/3}}\right)^2} = -556.5 \text{ m}$$

El signo menos significa que la sección cuya profundidad es 0.81 m. está aguas debajo de F y no aguas arriba como se ha supuesto.

Este problema ilustra cómo debe de emplearse el método. Una mayor precisión se obtendría suponiendo profundidades intermedias de 0.90 m. y 0.855 m. (profundidades exactas por interpolación de valores), calculando valores de ΔL y sumando estos. De esta forma debe calcularse una curva de perfil. La curva de perfil no es una línea recta.

2.- Un canal rectangular de 12 m. de ancho conduce 25 m³ de agua. La pendiente del canal es 0.0283. En la sección 1 la profundidad es 1.35 m. y en la sección 2; 90 m. aguas abajo, la profundidad es 1.50 m. ¿Cuál es el valor medio del factor de rugosidad n ?

Solución:

$$A_2 = 12(1.50) = 18.00m^2$$

$$A_1 = 12(1.35) = 16.20m^2$$

$$V_2 = 25/18.00 = 1.39m/s$$

$$V_1 = 25/16.20 = 1.54m/s$$

$$R_2 = 18.00/15 = 1.20m$$

$$R_1 = 16.20/14.70 = 1.10m$$

De ahí, $V_{media} = 1.465m/s$

$R_{media} = 1.15m$ Para flujo no uniforme.

$$L = \frac{\left(\frac{V_2^2}{2g} + y_2\right) - \left(\frac{V_1^2}{2g} + y_1\right)}{S_0 - s}$$

$$90 = \frac{(0.0984 + 1.50) - (0.1215 + 1.35)}{0.0283 - \left(\frac{n \times 1.465}{1.15^{2/3}}\right)^2} = -556.5m$$

$$\mathbf{n = 0.0282}$$

3.- Un canal rectangular de 6 m. de ancho tiene una pendiente de 1 m. por cada 1,000 m. La profundidad en la sección 1 es 2,550 m. y en la sección 2 600 m. aguas abajo, la profundidad es 3.075 m. Si $n = 0.011$, determinar el caudal probable en m^3/s .

Solución:

Empleando como referencia el plano del lecho de la corriente en la sección 2.

$$\text{Energía en 1} = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = 2.55 + \frac{V_1^2}{2g} + 0.60$$

$$\text{Energía en 2} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = 3.075 + \frac{V_2^2}{2g} + 0$$

La caída de la línea de alturas totales = energía en 1 menos energía en 2. Puestos que el valor es desconocido, se supondrá un valor de la pendiente.

$$\text{Pendiente } S = \frac{\text{pendiente de carga}}{L} = \frac{(Z_1 - Z_2) + \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}\right)}{L} = \frac{(Z_1 - Z_2) + \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}\right)}{600}$$

Se supone que $S = 0.000144$. Por otra parte son necesarios los valores de A_{media} y R_{media}

$$A_1 = 6(2.55) = 15.30m^2$$

$$A_2 = 6(3.075) = 18.45m^2$$

$$R_1 = 15.30/11.10 = 1.38m$$

$$R_2 = 18.45/12.15 = 1.52m$$

$$\text{De ahí, } A_{media} = 16.875m^2/s \quad \text{y} \quad R_{media} = 1.45m$$

Primera aproximación:

$$Q = A_m \left(\frac{1}{n}\right) R_m^{2/3} S^{1/2} = 16.875(1/0.011)(1.45)^{2/3}(0.000144)^{1/2} = 23.58m^3/s$$

En la ecuación (1) anterior se comprueba el valor de la pendiente S:

$$V_1 = \frac{23.58}{15.30} = 1.54 \quad \frac{V_1^2}{2g} = 0.121$$

$$V_2 = \frac{23.58}{18.45} = 1.28 \quad \frac{V_2^2}{2g} = 0.083$$

$$S = \frac{(3.15 - 3.075) + 0.038}{600} = 0.000188$$

En gradiente de la línea de altura total es de 0.113 m. en 600 m., superior al valor supuesto.

Segunda aproximación:

$$\text{Haciendo } S = 0.00021, Q = 23.58(0.00021/0.000144)^{1/2} = 28.50 \text{ m}^3/\text{s}$$

Comprobando:

$$V_1 = \frac{28.50}{15.30} = 1.86 \text{ m/s} \quad \frac{V_1^2}{2g} = 0.177 \text{ m}$$

$$V_2 = \frac{28.50}{18.45} = 1.54 \text{ m/s} \quad \frac{V_2^2}{2g} = 0.122 \text{ m}$$

$$S = \frac{(3.15 - 3.075) + 0.055}{600} = 0.000217$$

Está pendiente comprueba (razonablemente) la hipótesis hecha. Por consiguiente, Q aproximado = **28.50 m³/s.**

4.- Una corriente, que fluye a la profundidad normal por un canal rectangular de hormigón de 12.00 m. de anchura, se encuentra con una obstrucción, que produce un aumento de profundidad normal en la obstrucción y que afecta hasta una cierta distancia aguas arriba. El caudal de agua es de $126 \text{ m}^3/\text{s}$, y la pendiente de la plantilla del canal es 0.00086. Si la profundidad del agua justamente aguas arriba de la obstrucción (y_0) es de 4.55 m., determinar la distancia aguas arriba hasta el punto en que la profundidad es la normal.

Solución:

$$y_c = \sqrt[3]{(Q/b)^2/g} = \sqrt[3]{\left(\frac{126}{12}\right)^2/9.81} = 2.24\text{m}$$

$$V = Q/A$$

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

$$126/(12y) = \left(\frac{1}{0.013}\right) \left[\frac{12y}{12+2y}\right]^{2/3} (0.00086)^{1/2}$$

$$(2.256) \left[\frac{12y}{12+2y}\right]^{2/3} - \frac{10.5}{y} = 0$$

La solución de esta ecuación por aproximaciones sucesivas proporciona un valor de y , la profundidad normal (y_N), de 2.95 m. Como $y_N > y_c$ el flujo es subcrítico, y los cálculos pueden continuarse aguas arriba. El problema consiste ahora en determinar la distancia desde el punto donde la profundidad es de 4.55 m. hasta el punto aguas arriba donde la profundidad es de 2.95 m. El cálculo se realizará (arbitrariamente) para 10 incrementos iguales de la profundidad de 0.16 m. Los cálculos se dan en la tabla que figura más abajo. La suma de los valores que se dan en la columna (8) de la tabla (4.568 m.) da la solución del problema (es decir, la distancia aguas arriba desde la obstrucción hasta el punto en que la superficie libre del agua tiene la profundidad normal).

HIDRÁULICA DE LOS CANALES ABIERTOS
"COMPENDIO"

(1) $y(m)$	(2) $\frac{V(m/s)}{126}$ $\frac{12(1)}{12(1)}$	(3) V_m (m/s)	(4) $\frac{V^2/2g(m)}{(2)^2}$ $\frac{2(9.807)}{2(9.807)}$	(5) $\frac{R(m)}{12(1)}$ $\frac{12 + 2(1)}{12 + 2(1)}$	(6) $R_m(m)$	(7) S $\left[\frac{0.013(3)}{(6)^{2/3}}\right]^2$	(8) $L(m)$ $\frac{[(4) + (1)]_2 - [(4) + (1)]_1}{0.00086 - (7)}$
4.55	2.308	2.350	0.2716	2.588	2.562	0.0002662	- 236
4.39	2.392	2.437	0.2917	2.535	2.508	0.0002946	- 243
4.23	2.482	2.531	0.3141	2.481	2.453	0.0003272	- 253
4.07	2.580	2.633	0.3394	2.425	2.396	0.0003654	- 266
3.91	2.685	2.743	0.3676	2.367	2.338	0.0004098	-284
3.75	2.800	2.863	0.3997	2.308	2.277	0.0004626	- 311
3.59	2.925	2.993	0.4362	2.246	2.214	0.0005246	- 353
3.43	3.061	3.136	0.4777	2.182	2.150	0.0005989	- 429
3.27	3.211	3.294	0.5257	2.117	2.083	0.0006893	- 613
3.11	3.376	3.468	0.5811	2.048	2.013	0.0007997	-1,580
2.95	3.559		0.6458	1.978			- 4,568

FLUJO BRUSCAMENTE VARIADO

VII.- FLUJO BRUSCAMENTE VARIADO

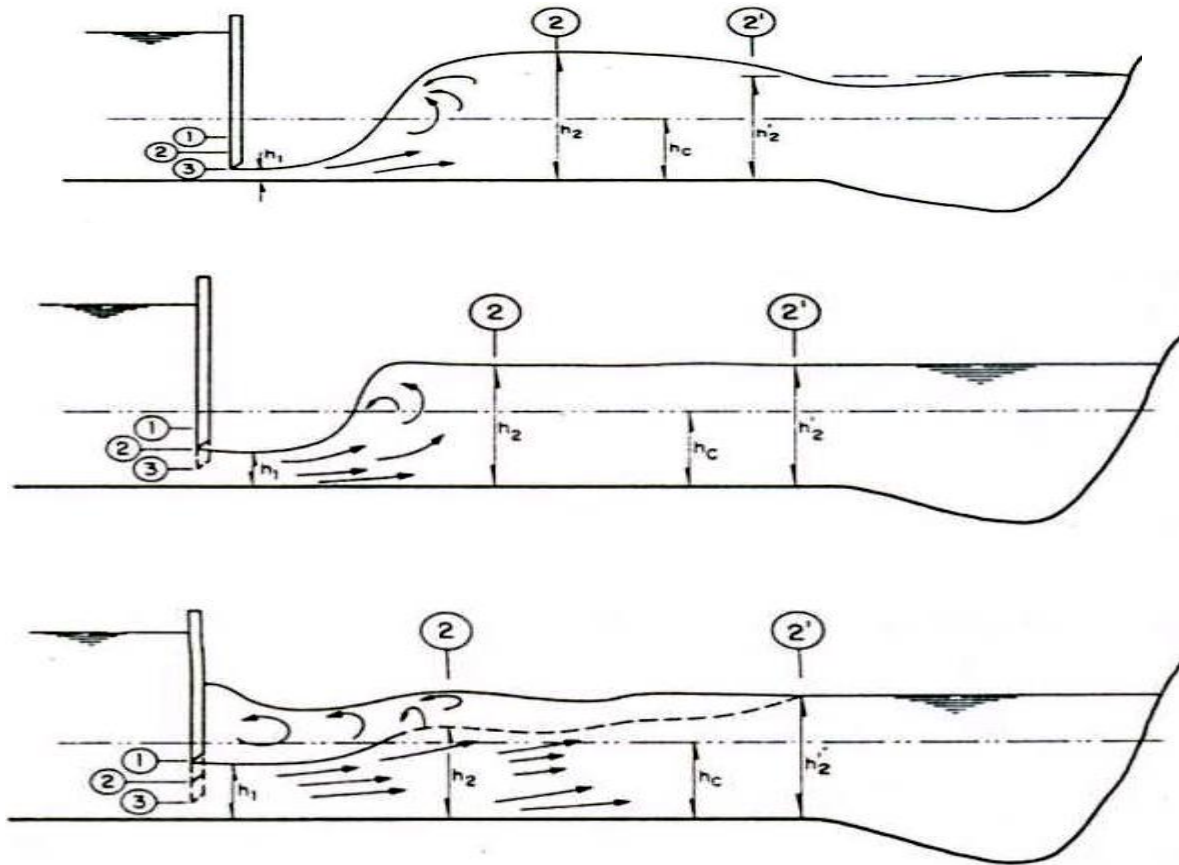
7.1 SALTO HIDRÁULICO

Es un fenómeno local que se produce por el paso brusco de régimen supercrítico a régimen subcrítico.

Este fenómeno generalmente sucede al pie de estructuras hidráulicas, tales como rápidas, vertedores, caídas y en aberturas de compuertas.

Las principales características de un salto hidráulico:

- Rompiente de velocidades altas.
- Incremento de tirante aguas abajo.
- Gran turbulencia
- Aireación (tratamientos ambientales)



7.2 LONGITUD DEL SALTO HIDRÁULICO

La zona en donde esté actuando el salto hidráulico debe protegerse con una estructura adecuada llamada "tanque amortiguador", por lo cual es importante el cálculo de la distancia de barrido; no existe un criterio unificado, ya que muchos científicos han realizado sus propios experimentos y cada uno tiene sus propias conclusiones, de aquí los más generales para la aplicación directa son los siguientes:

CANALES RECTANGULARES	
AUTOR	ECUACIÓN
SMETANA	$L = 5(h_2 - h_1)$
SAFRANEZ	$L = 5.9(h_1)(Fr_1)$ $Fr_1 = \text{número de Froude}$
EINWATCHER	$L = 8.3(h_1)(Fr_1 - 1)$ $Fr_1 = \text{número de Froude}$
WOYCICKY	$L = (h_2 - h_1) \left(8 - 0.005 \frac{h_2}{h_1} \right)$
CHERTUSON	$L = (10.3 * h_1)(Fr_1 - 1)^{0.81}$
CANALES TRAPECIALES	
H. SING	$L = 5y_2 \left(1 + y_1 \sqrt{\frac{y_2 - y_1}{y_1}} \right)$
SIENCHIN	$L = A(y_2 - y_1)$ $A = \text{depende de } K$

Talud K	0	0.5	0.75	1.0	1.25	1.50
A	5	7.9	9.20	10.6	12.6	15

7.3 PERDIDA DE ENERGÍA EN EL SALTO HIDRÁULICO

De acuerdo con la energía específica la carga en las secciones antes y después del salto será:

$$E_2 - E_1 = hf$$

$$\frac{v_2^2}{2g} + h_2 - \left(\frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right) = hf$$

$$hf = h_1 - h_2 + \frac{1}{2g}(v_1 - v_2)(v_1 + v_2)$$

También se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

$$h_f = \frac{(h_2 - h_1)}{4h_1h_2}$$

$$h_f = h_1 - h_2 + \frac{1}{2g}(v_1^2 - v_2^2)$$

EJERCICIOS

VIII.- EJERCICIOS

8.1. Determinar el gasto normal (Q_n) que se presenta en un canal trapecial con la siguiente información; $b = 3m$, $k = 1.5$, $S_0 = 0.016$, $n = 0.013$, $Y_n = 2.6m$

- Para una sección trapecial;

$$Ah = (b + kY)Y$$

$$Ah = [3m + 1.5(2.6m)](2.6m) = 17.94m^2$$

$$Pm = b + 2Y\sqrt{1 + k^2}$$

$$Pm = 3m + 2(2.6m)\sqrt{1 + (1.5)^2} = 12.37m$$

$$Rh = \frac{Ah}{Pm}$$

$$Rh = \frac{17.94m^2}{12.37m} = 1.45m$$

- Aplicando la ecuación de Manning;

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

$$v = \frac{1}{0.013} (1.45m)^{\frac{2}{3}} (0.016)^{\frac{1}{2}} = 12.47 \frac{m}{s}$$

- El gasto normal que circula por la sección trapecial es;

$$Q = Ah.v$$

$$Q = (17.94m^2) \left(12.47 \frac{m}{s} \right) = 223.71 \frac{m^3}{s}$$

8.2. Determinar el tirante de un canal rectangular que transporta un gasto de $4.25\text{m}^3/\text{s}$, para unas condiciones normales revestido de un concreto liso terminado con llana ($n=0.015$), con un ancho de plantilla de 3.6m y con una pendiente de 0.00025

- Aplicando la ecuación de continuidad;

$$Q = Ah.v$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4.25}{3.6Y}$$

$$Rh = \frac{Ah}{Pm} = \frac{b * Y}{b + 2Y} = \frac{3.6Y}{3.6 + 2Y}$$

- Sustituyendo la velocidad y el radio hidráulico en la ecuación de Manning,

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{4.25}{3.6Y} = \frac{1}{0.015} \left(\frac{3.6Y}{3.6 + 2Y} \right)^{\frac{2}{3}} (0.00025)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{1.181}{Y} = 1.054 \left(\frac{3.6Y}{3.6 + 2Y} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$1.181 = 1.054Y \left(\frac{3.6Y}{3.6 + 2Y} \right)^{\frac{2}{3}}$$

- Realizar iteraciones con la ecuación anterior

"Y _n " propuesto en metros	Resultado
1.00	0.785 < 1.181
2.00	2.033 > 1.181
1.50	1.383 > 1.181
1.34	1.185 > 1.181
1.337	1.181 = 1.181

El tirante normal para el canal rectangular es **Y_n = 1.337m**

8.3 Calcular el gasto que conduce un canal rectangular con las siguientes características:

$$n = 0.018$$

$$S = 0.0004$$

$$y = 3.5 \text{ m}$$

$$b = 4.2 \text{ m.}$$

$$Q = ?$$

➤ Aplicando la ecuación de continuidad;

$$Q = Ah.v$$

$$v = \frac{Q}{Ah} = \frac{4.25}{3.6Y}$$

➤ Determinación del radio hidráulico

$$Rh = \frac{Ah}{Pm} = \frac{b * Y}{b + 2Y} = \frac{3.6Y}{3.6 + 2Y}$$

➤ Cálculo del área hidráulica

$$Ah = yb$$

$$Ah = 3.5m(4.2m) = 14.70m^2$$

➤ Cálculo del perímetro mojado

$$Pm = b + 2y = 4.2m + 2(3.5m) = 11.20m$$

➤ Cálculo del radio hidráulico

$$R = \frac{Ah}{Pm} = \frac{14.70m^2}{11.20m} = 1.31m$$

- Cálculo del gasto que conducirá el canal

$$Q = \frac{Ah}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = \frac{14.70}{0.018} (1.31)^{2/3} (0.0004)^{1/2}$$

$$Q = 19.55 m^3 / s$$

8.4 Calcular el gasto que conduce un canal trapecial con las siguientes características:

$$n = 0.029$$

$$S = 0.00002$$

$$d = 3.5 \text{ m}$$

$$b = 5.2 \text{ m}$$

$$t = 1.3 \text{ s}$$

$$Q = ?$$

- Determinación área hidráulica

$$Ah = bd + td^2$$

$$Ah = 5.2m(3.5)m + 1.3(3.5m)^2 = 34.13m^2$$

- Cálculo del perímetro mojado

$$Pm = b + 2d\sqrt{1+t^2}$$

$$Pm = 5.2m + 2(3.5m)\left(\sqrt{1+(1.3)^2}\right) = 16.68m$$

- Cálculo del radio hidráulico

$$R = \frac{Ah}{Pm}$$

$$R = \frac{34.13m^2}{16.68m} = 2.05m$$

- Cálculo del gasto que conducirá el canal

$$Q = \frac{Ah}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = \frac{34.13m^2}{0.029} (2.05m)^{2/3} (0.00002)^{1/2} = 8.49m^3 / s$$

$$Q = 8.49m^3 / s$$

8.5 Calcular el gasto que conduce el siguiente canal triangular:

$$n = 0.018$$

$$S = 0.02$$

$$d = 0.40 \text{ m}$$

$$t = 0.6 \text{ s}$$

$$Q = ?$$

- Determinación área hidráulica

$$Ah = td^2$$

$$Ah = 0.6m(0.4m)^2 = 0.10m^2$$

- Cálculo del perímetro mojado

$$Pm = 2d\sqrt{1+t^2}$$

$$Pm = 2(0.40m)\left(\sqrt{1+(0.6)^2}\right) = 0.93m$$

- Cálculo del radio hidráulico

$$R = \frac{Ah}{Pm}$$

$$R = \frac{0.10m^2}{0.93m} = 0.11m$$

- Cálculo del gasto que conducirá el canal

$$Q = \frac{Ah}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = \frac{0.10}{0.018} (0.11)^{2/3} (0.02)^{1/2}$$

$$Q = 0.18m^3 / s$$

8.6 Calcular la pendiente del siguiente canal, de sección rectangular:

$$Q = 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$n = 0.025$$

$$b = 2.45 \text{ m}$$

$$d = 1.85 \text{ m.}$$

$$S = ?$$

- Determinación área hidráulica

$$Ah = db$$

$$Ah = 1.85\text{m}(2.45\text{m}) = 4.53\text{m}^2$$

- Cálculo del perímetro mojado

$$Pm = b + 2d$$

$$Pm = 2.45\text{m} + 2(1.85\text{m}) = 6.15\text{m}$$

- Cálculo del radio hidráulico

$$R = \frac{Ah}{Pm}$$

$$R = \frac{4.53\text{m}^2}{6.15\text{m}} = 0.74\text{m}$$

- Cálculo de la pendiente del canal

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

$$S = \frac{3.5(0.025)}{4.53(0.74)^{2/3}}$$

$$S = 0.00056$$

8.7 Calcular la pendiente necesaria para que el siguiente canal trapecial conduzca $2\text{m}^3/\text{s}$:

$$Q = 6.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$N = 0.035$$

$$b = 3.51 \text{ m.}$$

$$d = 1.83 \text{ m.}$$

$$t = 1.2 \text{ s}$$

$$S = ?$$

➤ Determinación área hidráulica

$$Ah = db + td^2$$

$$Ah = 1.83\text{m}(3.51)\text{m} + 1.2(1.83\text{m})^2 = 10.44\text{m}^2$$

➤ Cálculo del perímetro mojado

$$Pm = b + 2d\sqrt{1+t^2}$$

$$Pm = 3.51 + 2(1.83)\left(\sqrt{1+(1.2)^2}\right)$$

➤ Cálculo del radio hidráulico

$$R = \frac{Ah}{Pm}$$

$$R = \frac{10.44\text{m}^2}{9.23\text{m}} = 1.13\text{m}$$

➤ Cálculo de la pendiente del canal

$$S = \left(\frac{Qn}{AR^{2/3}}\right)^2$$

$$S = \left(\frac{6(0.035)}{10.44(1.13)^{2/3}}\right)^2$$

$$S = 0.00034$$

8.8 Un canal rectangular está diseñado de manera que el ancho de plantilla es el doble del tirante. Determinar el tirante si la pendiente es de 0.0004 y se conduce un gasto de 9.25 m³/s. El canal está construido de concreto liso (n=0.018):

$$Q = 9.25 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$n = 0.018$$

$$S = 0.0004$$

$$b = 2d$$

Solución:

Se desconoce los datos geométricos de la sección (b, d, A, R) pero se conoce "Q", "n" y "S". El área hidráulica y el radio hidráulico se pueden expresar en función de "b" y de "d" usando la relación estipulada "b = 2d"

- Al aplicarse la fórmula de Manning se tiene:

$$Q = \frac{Ah}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

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

$$AR^{2/3} = \frac{9.25(0.018)}{(0.0004)^{1/2}}$$

$$AR^{2/3} = 8.33$$

- Cálculo del perímetro mojado

$$Ah = db$$

$$Ah = 2d(d)$$

$$Ah = 2d^2$$

- Cálculo del perímetro mojado

$$Pm = b + 2d$$

$$Pm = 2d + 2d$$

$$Pm = 4d$$

- Cálculo del radio hidráulico

$$R = \frac{Ah}{Pm}$$

$$R = \frac{2d^2}{4d}$$

$$R = \frac{d}{2}$$

➤ Cálculo de tirante del canal;

$$8.33 = 2d^2(d/2)^{2/3}$$

$$8.33 = 2d^2 \left(\frac{d^{2/3}}{2^{2/3}} \right)$$

$$8.33 = 1.26d^{8/3}$$

$$d = \frac{8.33^{3/8}}{1.26}$$

$$d = 2.03m$$

BIBLIOGRAFÍA

IX.- BIBLIOGRAFÍA

Bonilla Gris, Robie. Hidráulica de conductos a superficie libre. I.P.N. E.S.I.A., México, 2003, 130 págs.

Chow, Ven Te. Hidráulica de los canales abiertos. Editorial Diana., México, 1982, 667 págs.

French, Richard H. Hidráulica de los canales abiertos. Editorial Mc. Graw Hill, México, 1988, 724 págs.

Gardea Villegas, Humberto. Hidráulica de canales. Facultad de Ingeniería UNAM, México, 1999, 217 págs.

Henderson, T. M. Open Channels Flow. Editorial Mc Millan series Incivil Enginnerig. Nueva York, 1969, 522 págs.

Naudasher, Eduard. Mecánica de canales (Diseño de estructuras). Noriega Limusa, México, 2002, 381 págs.

Silvestre, Paschoal. Fundamentos de Hidráulica General. Editorial Limusa, México, 1983, 381 págs.

Sotelo Ávila, Gilberto. Hidráulica General. Editorial Limusa, México, 1999, 620 págs.

Sotelo Ávila, Gilberto. Hidráulica 2da. Parte Flujo en Canales. Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1993, 559 págs.

Streeter, Victor. Mecánica de fluidos e hidráulica. Editorial Mc. Graw Hill, México, 1990, 747 págs.

PÁGINAS DE INTERNET

<http://www.cemcas.com.mx/?p=175>

<http://www.monografias.com/trabajos14/canales-abiert/canales-abiert.shtml>

<http://www.scribd.com/doc/232960/Manual-De-Practicas-De-Hidraulica-li>

http://www.forestales.net/archivos/forestal/pdfs%2033/simulacion_hidraulica.pdf

http://atenea.unicauca.edu.co/~hdulica/7_friccioncanales.pdf

<http://www.eia.edu.co/sitios/webalumnos/laderas%20andinas/paginas/canales.htm>

GLOSARIO

Alcantarilla: Es una construcción destinada a evacuar las aguas residuales.

Bocatoma: Una bocatoma, o captación, es una estructura hidráulica destinada a derivar desde unos cursos de agua, río, arroyo, o canal; o desde un lago; o incluso desde el mar, una parte del agua disponible en esta, para ser utilizada en un fin específico, como pueden ser abastecimiento de agua potable, riego, generación de energía eléctrica, acuicultura, enfriamiento de instalaciones industriales, etc.

Coefficiente: En matemáticas, el *coeficiente* es un factor multiplicativo vinculado a ciertos elementos matemáticos. En física *coeficiente* es una expresión numérica que mediante alguna fórmula determina las características o propiedades de un cuerpo.

Densidad: Es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, y puede utilizarse en términos absolutos o relativos.

Desnivel: Diferencia entre dos o más puntos.

Escurrimiento: Es la relación entre la lámina de agua precipitada sobre una superficie y la lámina de agua que escurre superficialmente, (ambas expresadas en mm).

Erosión: Proceso de sustracción o desgaste de la roca del suelo intacto (roca madre), por acción de procesos geológicos exógenos como las corrientes superficiales de agua o hielo glaciar, el viento o la acción de los seres vivos. La erosión se refiere al transporte de granos y no a la disgregación de las rocas, por tanto, es distinta a la meteorización.

Fluido: Medio que se deforma continuamente o que fluye en el tiempo ante la aplicación de una tensión tangencial y sin importar la magnitud de ésta. También se puede definir un fluido como aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene.

Geomorfología: Es la rama de la geografía que estudia el relieve de la Tierra, el cual es el resultado de un balance dinámico —que evoluciona en el tiempo— entre procesos constructivos y destructivos, dinámica que se conoce de manera genérica como ciclo geográfico.

Hidráulica: Es una rama de la física y la ingeniería que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas de los fluidos. Todo esto depende de las fuerzas que se interponen con la masa (fuerza) y empuje de la misma.

Hidrología: Ciencia geográfica que se dedica al estudio de la distribución, espacial y temporal, y las propiedades del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre. Esto incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el

equilibrio de las masas glaciares. Por otra parte, el estudio de las aguas subterráneas corresponde a la hidrogeología.

Mampostería: Se llama mampostería al sistema tradicional que consiste en la construcción de muros y paramentos, para diversos fines, mediante la colocación manual de elementos que pueden ser, por ejemplo: ladrillos, bloques de cemento prefabricados, piedras talladas en formas regulares o no.

Meandro: Es una curva descrita por el curso de un río cuya sinuosidad es pronunciada. Se forman con mayor facilidad en los ríos de las llanuras aluviales con pendiente muy escasa, dado que los sedimentos suelen depositarse en la parte convexa del meandro, mientras que en la cóncava, debido a la fuerza centrífuga, predomina la erosión y el retroceso de la orilla.

Pendiente: La pendiente de una recta en un sistema de representación triangular (cartesiano), suele ser definido como el cambio o diferencia en el eje Y dividido por el respectivo cambio en el eje X, entre 2 puntos de la recta.

Sedimentación: Es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin. Toda corriente de agua caracterizada por su caudal, tirante de agua, velocidad y forma de la sección tiene una capacidad de transportar material sólido en suspensión. El cambio de alguna de estas características de la corriente puede hacer que el material transportado se sedimente; o el material existente en el fondo o márgenes del cauce sea erosionado.

Sinuosidad: Es el índice que representa cuanto el trazado del río se aparta de una línea recta. Se mide por la relación entre la distancia que separa dos puntos a lo largo de la parte más profunda del cauce, o thalweg y la distancia en línea recta entre ellos. Un cauce en línea recta tiene una sinuosidad de 1.0, mientras que se describen los ríos como meándricos cuando la sinuosidad es mayor de 1.5.

Vaguada: Es la línea que marca la parte más honda de un valle, y es el camino por donde van las aguas de las corrientes naturales. En términos científicos se utiliza también el nombre de **Talweg**, voz procedente del alemán que significa "camino del valle", es la línea que une los puntos de menor altura en un valle o en el cauce de un río y donde la corriente, si la hay, es más rápida.

Velocidad: Es la relación entre espacio y tiempo empleado para ello.

Viscosidad: Es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama **fluido ideal**, en realidad todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones.