

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
EXTENSIÓN CANTAURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO HIDRÁULICO PARA EL ESTUDIO DE  
DESCARGA POR VERTEDEROS Y RESALTO HIDRÁULICO. CASO:  
UNIVERSIDAD DE ORIENTE- EXTENSIÓN CANTAURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL”**

Realizado por:

**Díaz Rodríguez, Marling Belèn      Segnini Rodríguez Eliezer David**

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente Como Requisito  
para optar al Título de

**INGENIERO CIVIL**

Cantaura, Octubre de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
EXTENSIÓN CANTAURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO HIDRÁULICO PARA EL ESTUDIO DE  
DESCARGA POR VERTEDEROS Y RESALTO HIDRÁULICO. CASO:  
UNIVERSIDAD DE ORIENTE- EXTENSIÓN CANTAURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL”**

Realizado por:

Díaz Rodríguez, Marling Belèn

Segnini Rodríguez Eliezer David

---

**Prof. Anabel González**

Tutor Académico

Cantaura, Octubre de 2016

UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
EXTENSIÓN CANTAURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO HIDRÁULICO PARA EL ESTUDIO DE  
DESCARGA POR VERTEDEROS Y RESALTO HIDRÁULICO. CASO:  
UNIVERSIDAD DE ORIENTE- EXTENSIÓN CANTAURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL”**

El jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de

**APROBADO**

---

**Prof. Jhonatan Martínez**  
Jurado Principal

---

**Prof. Mary Medina**  
Jurado Suplente

---

**Ing. Anabel González**  
Tutor Académico

Cantaura, Octubre de 2016

## RESOLUCIÓN

Según Artículo 41, del Reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente dice:

“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien le participará al Consejo Universitario”



## **DEDICATORIA**

Este trabajo de investigación está dedicado a todos los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad de Oriente Extensión Cantaura, a ellos por haber sido en gran parte lo que motivó a la realización de este trabajo de grado, para ustedes compañeros Udistas, impulsando siempre a crear mejores profesionales.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente a dios por todo lo que me ha dado, por tanta paciencia y humildad para poder aceptar tantas cosas y guiarme siempre por el camino del bien.

A mis padres Luis Díaz y Romelia Rodríguez por su apoyo en esta etapa de mi vida, gracias por aprender a confiar en mí. A mis hermanos por ser mi razón para seguir siempre adelante, los amo!!!

A mis abuelos Claudio Rodríguez (papi Claudio), Carmen de Rodríguez (mami María), María Belén Álvarez (mamá Belén) y Carlos Díaz (Q.E.P.D).

A mi bisabuela por ser tan especial y siempre lograr algo difícil...sacarme una sonrisa, por eso te adoro mamá, dios te regale muchos años más de vida. A mis tíos, gracias por su colaboración en la elaboración de este trabajo de grado.

A mis primos, en especial a mi Nita Adriana Rodríguez, más que mi prima, una hermana para mí, gracias por apoyarme siempre. Familia Pérez Fernández y Frandell Preciado gracias por formar parte de la familia que dios me ha permitido escoger, gracias por su apoyo, comprensión, consejos y locuras que alegran mi vida.

A Eliezer Segnini, mi compañero de tesis y vida estos últimos 7 años, Vidita gracias por estar conmigo en las buenas y en las malas, gracias por tu apoyo, paciencia y constancia durante la realización de este proyecto. Familia Segnini Rodríguez, gracias a todos por toda su ayuda y colaboración que me han brindado siempre dejándome formar parte de su familia.

Compañeros de clase, gracias a todos, compartir con ustedes durante toda la carrera especialmente con los Fc me dejo gratas experiencias y algunos buenos amigos.

Profesores gracias por toda la enseñanza dada.

Marling Díaz

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a dios por permitirme lograr esta meta e iluminarme en el camino. A mis padres Mercedes de Segnini y Héctor Segnini por todo su apoyo y colaboración durante toda la carrera. Los amo mucho mis viejos me enseñaron que con poco se hace mucho, ejemplo de padres con humildad.

A mis hermanos, Daniel gracias hermano por tanto apoyo estaré siempre agradecido contigo y tu familia, Elaine gracias hermana por tus consejos y ayuda para seguir adelante, Hendry gracias por tu ayuda, Oscar y mi morocha Elizaine por su motivación para seguir siempre a delante todos juntos como familia. Que aunque no lo veo siempre están conmigo en todo momento, A mi cuñado Gilberto Maza por toda su colaboración en la ejecución de este proyecto. A mis cuñadas, sobrinos, en especial a Daniela Segnini por sus valiosos consejos durante esta etapa. (Tío ya estás viejo, te tienes que graduar para que trabajes). Gracias mi flaquita.

A mi compañera de tesis Marling Díaz por su esfuerzo y paciencia durante el desarrollo de esta investigación. A pesar de todos los obstáculos que pasamos siempre positiva apoyándome incondicionalmente, gracias vidita eres muy especial para mí. Ahora es q nos queda camino por recorrer.

A la familia Rodríguez por su colaboración en la etapa de construcción del equipo hidráulico. Sin ustedes no lo hubiéramos logrado. Al señor Claudio gracias por colaborar siempre con nosotros esta tesis también es de usted.

A mis fieles compañeros de clase conocidos como los Fc. Por todo su apoyo y ayuda incondicional. Edgar rodríguez, Carlos Gómez, estaré inmensamente agradecidos con ustedes, Jesús Tovar, gracias por tu paciencia y ayuda. Franklin Medina, María Planchart gracias por su apoyo, y que siga la rumba.

A los profesores Jhonatan Martínez y Anabel González, gracias por confiar en nosotros para la realización de esta tesis.

Eliezer Segnini

## ÍNDICE GENERAL

RESOLUCIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvi
INTRODUCCION.....	xvii
CAPITULO I.....	19
EL PROBLEMA.....	19
1.1 Planteamiento del problema.....	19
1.2. OBJETIVOS.....	22
1.2.1. Objetivo General.....	22
1.2.2. Objetivos Específicos.....	22
CAPITULO II.....	23
MARCO TEORICO.....	23
2.1. ANTECEDENTES.....	23
2.2 Fundamentos teóricos.....	24
2.2.1. Mecánica de Fluidos.....	24
2.2.2 Definición de los fluidos.....	25
2.2.3 Propiedades de los fluidos.....	25
2.2.3.1 Densidad específica o absoluta.....	25
2.2.3.2 Peso específico.....	26
2.2.3.3Volumen específico.....	26
2.2.3.4 Viscosidad.....	26

2.2.3.5 Tensión superficial. ....	27
2.2.4 Ecuaciones fundamentales de los fluidos. ....	28
2.2.4.1 Ecuación de continuidad. ....	29
2.2.4.2 Fuerzas que actúan sobre un fluido. ....	30
2.2.4.3 Energías presentes en un fluido incompresible. ....	30
A. Energía potencial geodésica. ....	31
B. Energía de presión. ....	31
2.2.4.4 Ecuación de Bernoulli generalizada. ....	32
2.2.5 Tipos de flujo en canales hidráulicos. ....	32
2.2.5.1 Descripción general de los canales hidráulicos. ....	32
2.2.5.2 Tipos de flujo en canales ....	33
2.2.5.3 Estados de flujo. ....	34
2.2.5.4 Clases de canales abiertos. ....	36
2.2.6 Flujo en canales abiertos y sus propiedades. ....	37
2.2.6.1 Geometría de un canal. ....	37
2.2.6.2 Elementos geométricos de una sección de canal. ....	37
2.2.6.3 Distribución de velocidades en una sección de canal. ....	39
2.2.6.4 Distribución de presión en una sección de canal. ....	40
2.2.7 Principios de energía y momentum. ....	40
2.2.7.1 Energía específica. ....	41
2.2.7.2 Criterio para el estado crítico de flujo. ....	42
2.2.7.3 Fenómenos locales. ....	43
2.2.7.4 Energía específica a gasto constante. ....	44
2.2.7.5 Ecuaciones de caudal y velocidad crítica ....	47

2.2.7.6 Energía específica, condiciones críticas sección rectangular. ....	47
2.2.7.7 Fuerza específica.....	49
2.2.8 Flujo rápidamente variado: resalto hidráulico.....	52
2.2.8.1 Salto hidráulico en un canal rectangular. ....	53
2.2.8.2 Tipos de salto .....	55
2.2.8.3 Características básicas del salto hidráulico. ....	57
2.2.9 Herramientas para el análisis del flujo uniforme .....	59
2.2.9.1 Características del flujo uniforme.....	59
2.2.9.2 Expresión de la velocidad en flujo uniforme.....	61
2.2.9.3 Ecuación de Chezy .....	63
2.2.9.4 Ecuación de manning .....	65
2.2.9.5 Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de manning. ....	66
2.2.10 Diseño de canales con flujo uniforme. ....	68
2.2.10.1 Materiales y revestimientos no erosionables. ....	68
2.2.10.2 Velocidad mínima permisible. ....	68
2.2.10.3 Pendientes de canal. ....	68
2.2.10.4 Borde libre. ....	69
2.2.10.5 Sección hidráulica óptima. ....	69
2.2.11 Flujo gradualmente variado.....	70
2.2.11.1 Suposiciones básicas. ....	70
2.2.11.2 Ecuación dinámica de flujo gradualmente variado.....	72
2.2.11.3 Característica y clasificación de los perfiles de flujo. ...	75

2.2.11.4 Clasificación de los perfiles de flujo. ....	80
2.2.12 Medición de flujos en canales. ....	85
2.2.12.1 Objetivo de los vertederos. ....	85
2.2.12.2 Tipos de vertederos. ....	85
2.2.12.2.1 Clasificación de los vertederos por tipo de cresta. ....	86
2.2.12.2.2 Clasificación de los vertederos por los niveles de agua abajo. ....	86
2.2.12.2.3 Clasificación por las condiciones laterales de descarga. ....	87
2.2.12.2.4 Clasificación de los vertederos según su forma. ....	87
2.2.12.2.5 Clasificación de los vertederos por la inclinación del paramento. ....	88
2.2.12.2.6 Vertederos según su geometría. ....	89
A.)Vertederos rectangulares. ....	90
B.)Vertedero triangular. ....	96
C.)Vertedero de pared gruesa. ....	99
CAPITULO III. ....	101
MARCO METODOLÓGICO ....	101
3.1 Tipo de investigación. ....	101
3.2 Nivel de investigación. ....	102
3.3 Técnicas a utilizar. ....	102
3.4. Etapas del proyecto. ....	103
3.5.- Recursos necesarios. ....	107
3.5.1. Equipos. ....	107
3.5.2. Materiales. ....	107
3.5.3 Herramientas. ....	107

CAPITULO IV .....	108
DISEÑO.....	108
4.1 Propósitos de diseño.....	108
4.2 Alternativas de Diseño .....	108
4.3 Geometría del canal.....	109
4.4 Selección de las partes.....	109
4.5 Descripción del equipo hidráulico.....	110
4.6 Diseño del sistema.....	111
4.6.1 Canal artificial .....	111
4.6.2 Diseño de borde libre.....	111
4.7 Determinación de características de flujo y físicas del canal. ..	113
4.7.1 Dimensión del canal.....	113
4.7.2 Determinación de la pendiente crítica.....	115
4.7.3 Iteraciones para puntos de pendiente crítica .....	116
4.7.4 Comprobación de la profundidad crítica.....	119
4.7.5 Profundidad normal.....	119
4.7.6 Medidores de Profundidad y ángulos.....	122
4.8 Diseño de tanques.....	122
4.8.1 Tanque de alimentación:.....	122
4.8.2 Tanque principal .....	123
4.8.3 Tanque De descarga.....	123
4.9 Diseño de la estructura de soporte del equipo .....	123
4.9.1 Chequeo de estructura metálica en el software sap2000 ..	124
4.10 Diseño de vertederos.....	136
4.10.1 Vertedero rectangular sin contracción.....	136
4.10.2 Vertedero rectangular con contracción.....	137
4.10.3 Vertederos triangulares.....	138
4.10.4 Vertederos de pared gruesa.....	139

CAPITULO V .....	146
CONSTRUCCION Y CALIBRACION.....	146
5.1 Construcción .....	146
5.1.1 Tanque de Alimentación y tanque principal .....	146
5.1.2 Tanque de Descarga y canal artificial. ....	147
5.1.3 Soporte del Equipo .....	148
5.2 Materiales y equipos para la construcción .....	149
5.2.1 Construcción de los tanques de hierro y soportes: .....	149
5.2.2 Construcción del canal artificial y tanque de descarga: .....	153
5.2.3 Para las conexiones.....	155
CAPITULO VI .....	157
RESULTADOS .....	157
CAPITULO VII .....	161
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	161
BIBLIOGRAFIAS .....	162
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO	164

## ÍNDICE DE TABLAS 1

Tabla 1.Elementos Geométricos de secciones de canal.....	37
Tabla 2.Secciones hidráulicas óptimas.....	70
Tabla 3.Tipos de perfiles de flujo en canales prismáticos.....	77
Tabla 4. Coeficientes de descarga, típicos para distintos valores de $\alpha$ .....	98
Tabla 5.Formula simplificada de vertederos para distintos ángulos.....	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tensión superficial. ....	27
Figura 2 Fenómenos debidos a la tensión superficial.....	28
Figura 3. Energía de presión. ....	32
Figura 4. Tipos de flujo.. ....	33
Figura 5. Perímetro mojado.....	38
Figura 6. Distribución de velocidades en un canal rectangular. ....	40
Figura 7. Interpretación gráfica de la Energía Específica. ....	42
Figura 8. Caída libre interpretada mediante una curva de energía específica.....	44
Figura 9. Gráfico de la Energía Específica (Curva E – y) .....	45
Figura 10. Figura general de una sección de canal cualquiera. ....	46
Figura 11. Distribución de la Energía Específica en canal rectangular..	48
Figura 12. Gráfica para la deducción de la ecuación de la Fuerza específica.....	49
Figura 13. Fuerza específica.. ....	51
Figura 14. Resalto hidráulico.....	52
Figura 15. Formación del resalto. ....	53
Figura 16. Salto ondular.. ....	55
Figura 17. Salto débil.....	55
Figura 18. Salto oscilante.. ....	56
Figura 19. Salto permanente.. ....	56
Figura 20. Salto fuerte. ....	56
Figura 21. Establecimiento de flujo uniforme en un canal largo .....	61
Figura 22. Deducción de la ecuación de Chezy. ....	64
Figura 23. Deducción de la ecuación de flujo gradualmente variado. ...	73
Figura 24. Clasificación de los perfiles de flujo en flujo gradualmente variado. ....	78

Figura 25. Puntos teóricos de inflexión en perfiles de flujo.....	80
Figura 26. Ejemplo de tipos de perfiles de flujo.....	83
Figura 27. Vertederos de pared delgada y vertedero de pared gruesa .	86
Figura 28. Vertedero libre(a) y vertedero sumergido (b).....	86
Figura 29. Clasificación por las condiciones laterales de descarga.....	87
Figura 30. Vertederos según su forma .....	88
Figura 31. Vertederos con inclinación con respecto a la corriente .....	88
Figura 32. Vertedero de pared delgada.....	89
Figura 33. Perfiles de rebose de vertederos.....	89
Figura 34. Esquema para la reducción de la fórmula de descarga en un vertedero rectangular.....	90
Figura 35. Longitud efectiva.. .....	95
Figura 36. Gráfica para determinar el coeficiente de descarga. ....	96
Figura 37. Análisis del vertedero triangular.. .....	97
Figura 38. Gráfica para determinar el valor del coeficiente de descarga para un vertedero triangular.....	99
Figura 39. Distintos tipos de vertederos de pared gruesa regularmente utilizados como estructuras de control.....	100
Figura 40. Soporte del equipo. ....	124
Figura 41. Inicio del programa SAP2000 y selección del modelo.....	125
Figura 42. Opción de edición de líneas de referencia .....	125
Figura 43. Líneas de referencia de la estructura.. .....	126
Figura 44. Líneas de referencia de la estructura (vista 3D).....	127
Figura 45. Opción <i>Materials</i> en menú <i>Define</i> .. .....	128
Figura 46. Definición de acero A36.. .....	128
Figura 47. Opción <i>Frame Sections</i> .....	129
Figura 48. Ventana <i>Add Frame Section Properties</i> . ....	129
Figura 49. Ventana <i>Angle Section</i> . ....	130
Figura 50. Ventana <i>General Section</i> .....	131

Figura 51.Opción <i>Draw Frame/Cable</i> .....	131
Figura 52.Vista 3D de estructura metálica.....	132
Figura 53. Modelo de estructura metálica con cargas asignadas.....	134
Figura 54.Opción <i>Start Design/Check of Structure</i> .....	135
Figura 55. Chequeo de la estructura metálica.....	135
Figura 56. Perfil creager.....	139
Figura 57.Datos hoja de Excel.....	140
Figura 58.Método del bureau of reclamation..	141
Figura 59Fórmula para perfil creager..	141
Figura 60.Método del bureau of reclamation, para determinar coeficientes k y n..	142
Figura 61. Método del bureau of reclamation, para determinar relaciones Xc, Yc, R1 y R2.	143
Figura 62. Grafica perfil creager.....	145

## **RESUMEN**

El objetivo principal de esta investigación consistió en la construcción de un equipo hidráulico que permita el estudio de resalto y descarga por vertedero en el laboratorio de Ingeniería Civil en la universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui- Extensión Cantaura, con la finalidad de brindar a los estudiantes de esta casa de estudio la oportunidad de obtener conocimientos mediante la realización de prácticas de laboratorio, reforzando así los conocimientos teóricos ya obtenidos. Para ello fue necesario el estudio de los materiales existentes en la zona así como la realización de planos para concretar el diseño del equipo mediante la utilización de Autocad y SAP 2000, seguidamente se procedió a la construcción y calibración del mismo para la ejecución de los ensayos pertinentes, por último se seleccionaron las guías que permiten el realizar las prácticas correspondientes.

## INTRODUCCION

La ingeniería Hidráulica es la rama de la ingeniería Civil que se ocupa de la proyección y ejecución de obras importantes relacionadas con el agua, ya sea para su uso diario o hasta para la obtención de energía eléctrica. Se puede decir que dicha rama de estudio es tan antigua como la civilización misma. Esto es evidente si se piensa en la lucha del hombre por la supervivencia, que lo obligó a aprender a utilizar y controlar el agua. Por esto, las civilizaciones antiguas se desarrollaron en las proximidades de los grandes ríos y basaron su economía en la agricultura. Paulatinamente fueron utilizando el riego en sus formas primitivas.

El primer modelo físico hidráulico fue construido en el año 1795 por el ingeniero Luís Jerónimo Fargue sobre un tramo del Río Garona. En el año 1885, Reynolds construyó un modelo del río Merssey, cerca de Liverpool.. Hoy en día, esta relación se denomina número de Reynolds, parámetro adimensional muy significativo en los modelos hidráulicos actuales.

El arquitecto naval William Froude, en 1870, indicó la importancia de tal relación de la fuerza de inercia y de la fuerza de gravedad. En la actualidad ésta relación se denomina número de Froude, parámetro adimensional básico en el análisis de los modelos hidráulicos. El primer laboratorio hidráulico fue fundado en Dresden (Alemania), en 1891, por el Profesor Engels, y después de éste muchos otros aparecieron en casi todos los países del mundo; hoy en día hay más de un centenar.

La investigación en el laboratorio adquiere importancia debido a que los estudiantes desarrollan habilidades para resolver analíticamente problemas que surgen en ingeniería, teniendo en cuenta esto surgió la necesidad de construir un equipo hidráulico para el estudio de descarga por vertedero y resalto hidráulico, dicho equipo a su vez ayudara a incentivar la

dotación total de un laboratorio de hidráulica en la Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui - Extensión Cantaura.

Tomando en cuenta lo antes mencionado, el presente trabajo de investigación, como se ha mencionado antes, tiene como Objetivo General la construcción de un equipo hidráulico para el estudio de descarga por vertedero y resalto hidráulico, para lo cual se aplicó un método científico expresado en los siguientes capítulos:

Capítulo I: se describe el problema de la investigación y los objetivos para abordar el problemática planteada.

Capítulo II: Se presentan los estudios y referencias afines a la temática investigada sustentada a través de antecedentes y todas las bases teóricas relacionadas al trabajo de investigación e importantes mencionar.

Capítulo III: Comprende toda la metodología empleada para sustentar y desarrollar en cuanto a nivel de diseño y técnicas el presente trabajo de investigación.

Capítulo IV: Sustenta toda la etapa de diseño.

Capítulo V: Describe y presenta todo el procediendo del calibración del equipo según el desarrollo de los objetivos planteados.

Capítulo VI: En este capítulo de presentan los resultados obtenidos mediante la elaboración de esta investigación.

Capítulo VII: Enfoca las conclusión y recomendaciones deducidas una vez finalizada la presente investigación

# **CAPITULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del problema.**

Para poder realizar un estudio práctico de ciertos sistemas hidráulicos, se necesitan equipos que simulen las condiciones que se podrían presentar en la realidad, ya que si estos ensayos son realizados a escala natural resultarían sumamente costosos, para lograr esto es necesario tener equipos que produzcan una simulación con características similares a las de un sistema a gran escala, como es el caso de los laboratorios implementados en las universidades. Sin embargo hoy en día existen algunas sedes universitarias donde la falta de laboratorios representa un problema que afecta a las poblaciones estudiantiles, generando así inconvenientes en su formación académica.

En el municipio Pedro María Freites, el cual posee una ubicación geográfica estratégica dentro de la extensión del Estado Anzoátegui, se ha venido desarrollando como una entidad de carácter universitario la Universidad de Oriente (UDO) Extensión Cantaura, ubicada en la capital de este municipio (Cantaura). Este recinto universitario fue inaugurado el día siete (7) de diciembre del año dos mil nueve (2009), de conformidad a un convenio realizado entre la alcaldía del municipio Pedro María Freites y la Universidad de Oriente.

Actualmente, el laboratorio de hidráulica del departamento de ingeniería civil de dicha universidad, no cuenta con equipos que permitan realizar estudios en esta área. Lo cual trae como consecuencia que los estudiantes de la extensión programen visitas al núcleo Anzoátegui ubicado en la ciudad de Puerto la Cruz, para realizar las prácticas contempladas en el

programa de la asignatura laboratorio de hidráulica del pensum de ingeniería civil.

Motivado a esto se emplea la necesidad de construir un equipo hidráulico para realizar estudios correspondientes a las prácticas de descarga por vertederos y resalto hidráulico, por otra parte también la dotación del Laboratorio de hidráulica, con la finalidad de aumentar los conocimientos prácticos, para los estudiantes de ingeniería civil.

Para comenzar con la construcción del equipo se realizará un estudio de los materiales y componentes requeridos, para saber su disponibilidad en el mercado, ya que se pueden encontrar diferentes tipos de materiales, lo cual permitirá estudiar distintas opciones para la construcción del equipo, de esta forma se elegirá la mejor opción que cumpla con las condiciones experimentales. Con esta información se procederá a estimar el costo aproximado del equipo hidráulico y la adquisición de los materiales.

La metodología a utilizar será la que aplicaron Almeida y Cesin (2010), quienes realizaron la construcción de un equipo para el estudio de resalto hidráulico en el Núcleo Anzoátegui, por lo cual, el diseño del equipo se realizará partiendo de los equipos utilizados en dicho Núcleo. Posteriormente se ensamblarán las partes y componentes para realizar las pruebas de ensayo y la calibración del mismo, y finalmente se elaborará el manual de uso del equipo hidráulico. Luego de haber realizado el equipo y su manual será entregado al departamento de ingeniería civil para su posterior uso en el laboratorio de hidráulica.

La realización de esta investigación servirá para llevar a cabo el proyecto de construcción de un equipo hidráulico para el estudio de descarga por vertedero y resalto hidráulico, ya que, como se mencionó anteriormente, actualmente la Universidad de oriente extensión Cantaura no cuenta con un

laboratorio de hidráulica debido a la falta de los equipos necesarios para la realización de las 13 prácticas correspondientes a la asignatura laboratorio de hidráulica. Por esta razón los estudiantes del Departamento de Ingeniería civil se ven en la necesidad de trasladarse a la Universidad de oriente Núcleo Anzoátegui a cursar la asignatura y así cumplir con lo establecido en el programa académico.

En el año 2010 fueron realizados como trabajo de grado para optar por título de ingeniero civil alrededor de 5 equipos hidráulicos para la dotación del laboratorio de ingeniería hidráulica en la UDO Núcleo Anzoátegui, lo cual motivó la realización de esta investigación en la Universidad de oriente extensión Cantaura como aporte para la disminuir las carencias de nuestra casa de estudio.

Es necesario complementar los conocimientos teóricos con los conocimientos prácticos obtenidos en los laboratorios, de esta manera se obtendrán resultados favorables reflejándose en el mejor entendimiento y rendimiento académico del estudiante, por lo cual con la realización de este proyecto en la Universidad de oriente extensión Cantaura se brindara la posibilidad de cursar la materia correspondiente en dicha casa de estudio lo cual disminuirá los viajes programados al Núcleo Anzoátegui y se facilitara el aprendizaje de los alumnos de laboratorio de hidráulica; del mismo modo servirá de guía para la creación de futuros equipos necesarios para el laboratorio de hidráulica de la UDO- extensión Cantaura, en investigaciones de futuros trabajos de grado como base de consulta bibliográfica, dando aportes tecnológicos que puedan mejorar la comprensión de los conocimientos teóricos y prácticos de los estudiantes de ingeniería civil en la UDO extensión Cantaura.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Construir un equipo hidráulico para el estudio de descarga por vertederos y resalto hidráulico. Caso: universidad de oriente- extensión Cantaura Departamento de ingeniería civil.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Describir las características físicas y técnicas del equipo hidráulico.
- ✓ Calcular cálculos hidráulicos y estructurales del equipo usando los programas HiCalc 2.0.2 y SAP 2000.
- ✓ Presentar los planos de ingeniería del equipo hidráulico.
- ✓ Confeccionar el equipo hidráulico teniendo en cuenta los materiales de la zona.
- ✓ Realizar ensayos para la calibración del equipo hidráulico.
- ✓ Seleccionar guías correspondientes a las prácticas de resalto hidráulico y descarga por vertedero.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEORICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES**

En el Departamento de Ingeniería Civil del Núcleo Anzoátegui de la Universidad de Oriente se han presentado las siguientes tesis relacionadas con la construcción de equipos hidráulicos a ser utilizados en el laboratorio de la asignatura Laboratorio de Ingeniería Hidráulica, a continuación se hará breve mención sobre ellas:

Almeida y Cesin. (2010) para cumplir con el objetivo de su trabajo de grado realizaron un amplio estudio sobre el fenómeno del resalto hidráulico, así como también un sondeo en el mercado de los diferentes materiales existentes, lo que les permitió elegir el más adecuado.

Este estudio servirá como base de referencia para el proyecto en ejecución, ya que, permitirá utilizar la técnica del sondeo en el mercado, eligiendo así materiales óptimos.

Por otro lado Carvajal. (2010) Observó la necesidad de contar con equipos de laboratorio hidráulico debido a que los existentes se encontraban en mal estado y arrojaban resultados erróneos, por lo cual estudio todas las posibilidades existentes para colaborar con la dotación de dicho laboratorio, ejecutando así la construcción de un equipo hidráulico para el estudio de compuertas sumergidas.

De la misma manera la metodología utilizada por Carvajal impulsa a continuar con la dotación de los laboratorios de hidráulica para estudiantes de ingeniería civil en la Universidad de Oriente extensión Cantaura.

Del mismo modo Velásquez, y Muñoz. (2010) en su investigación se enfocaron en las necesidades de la Universidad de oriente núcleo Anzoátegui, proponiendo la construcción de un equipo hidráulico para el estudio de descarga por vertedero, con la finalidad de aumentar los conocimientos prácticos de los estudiantes de ingeniería civil.

Tomando en cuenta como referencia el diseño de Velásquez y Muñoz se logrará el proyecto en ejecución. Cabe destacar que este tipo de investigación es un gran aporte para realizar prácticas correspondientes a la carrera de ingeniería civil

Así mismo Longart, y Manzano (2010). En su trabajo de grado inicialmente estudiaron el lugar donde realizarían los experimentos para así saber de cuanto espacio disponían para ensamblar un equipo hidráulico para el estudio de pérdida por fricción y accesorios.

Otro aporte es que este estudio permite garantizar que existe el espacio suficiente para la disposición final del equipo ya ensamblado en la Universidad de Oriente Extensión Cantaura.

## **2.2 Fundamentos teóricos**

### **2.2.1. Mecánica de Fluidos.**

Según Mataix. (1986), “la mecánica de los fluidos es la parte de la mecánica que estudia las leyes del comportamiento de los fluidos en equilibrio, hidrostática, y en movimiento, hidrodinámico”. (p.1). En otras palabras la mecánica de fluidos es fundamental en campos tan diversos como la aeronáutica, la ingeniería química, civil e industrial, la meteorología, las construcciones navales y la oceanografía. La característica fundamental

que define a los fluidos es su incapacidad para resistir esfuerzos cortantes (lo que provoca que carezcan de forma definida)

### 2.2.2 Definición de los fluidos.

"Fluido es aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene. Cuando están en equilibrio los fluidos no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes". (*op. cit.*, p.24). A groso modo todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma.

"Los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases. La diferencias esenciales entre líquidos y gases son: a) los líquidos son prácticamente incompresibles y los gases son compresibles, por lo que en muchas ocasiones hay que tratarlos como tales; b) los líquidos ocupan un volumen definido y tienen superficies libres mientras que una masa dada de gas se expansiona hasta ocupar todas las partes del recipiente que lo contenga". (*Ibidem*).

### 2.2.3 Propiedades de los fluidos.

#### 2.2.3.1 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

### 2.2.3.2 Peso específico.

El peso específico es el peso por unidad de volumen.

$$\gamma = \frac{w}{v} = \frac{m \cdot g}{v} = \rho g$$

Donde

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.

### 2.2.3.3 Volumen específico.

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

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

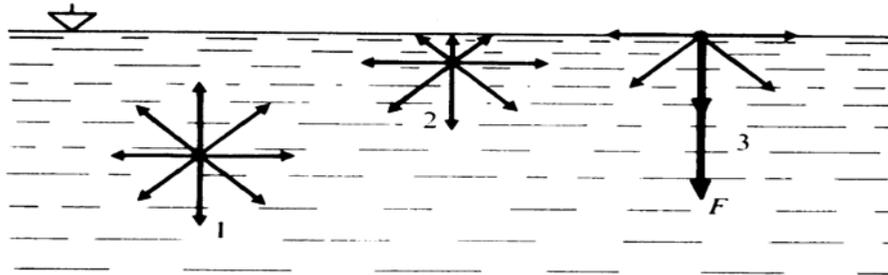
### 2.2.3.4 Viscosidad.

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) “η” La viscosidad, como cualquiera otra propiedad del

fluido, depende del estado del fluido caracterizado por la presión y la temperatura(op. cit., p.24).

### 2.2.3.5 Tensión superficial.

La tensión superficial es una fuerza que, como su nombre indica, produce efectos de tensión en la superficie de los líquidos, allí donde el fluido entra en contacto con otro fluido no miscible, particularmente un líquido con un gas o con un contorno sólido (vasija, tubo, etc.). El origen de esta fuerza es la cohesión intermolecular y la fuerza de adhesión del fluido al sólido. En la superficie libre de un líquido, que es por tanto la superficie de contacto entre dos fluidos, líquidos y aire la tensión superficial se manifiesta como si el líquido creara allí una fina membrana. (*Ibíd.*)



**Figura 1. Tensión superficial. Fuente: Mataix (1986)**

La tensión superficial explica la formación de las gotas en un líquido. En un líquido que se pulveriza las fuerzas de cohesión predominantes dirigidas siempre hacia el interior tienden a la formación de superficies de área mínima, originando así fenómenos tales como el que ocurre cuando hay contacto entre agua y vidrio cuando se forman efectos de capilaridad, así como lo muestra la figura (*Ibíd.*)

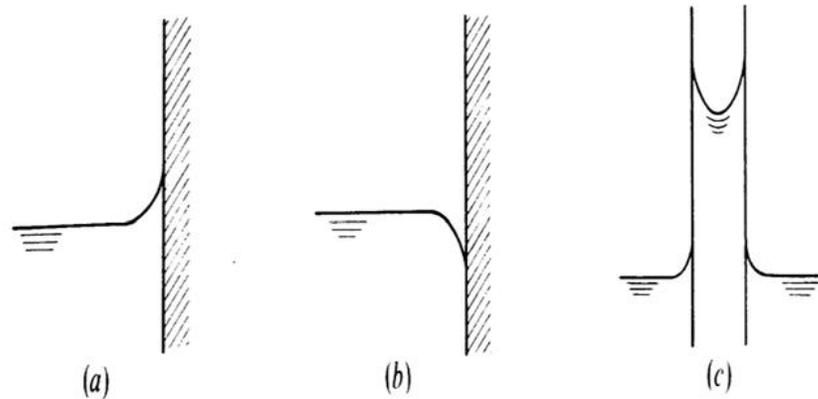


Figura 2 Fenómenos debidos a la tensión superficial: (a) contacto entre agua y vidrio; (b) contacto entre mercurio y vidrio; (c) elevación capilar. Fuente: Mataix (1986)

#### 2.2.4 Ecuaciones fundamentales de los fluidos.

Antes de establecer las ecuaciones fundamentales de los fluidos es conveniente distinguir los siguientes regímenes de corriente:

a) Corriente permanente y corriente variable.

- Permanente: 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.
- Variable: sucede lo contrario al permanente.

b) Corriente uniforme y no uniforme.

- Uniforme: 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.
- No uniforme: es caso contrario a la corriente no uniforme.

c) Corriente laminar y turbulenta.

- Laminar: 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.
- Turbulenta: es caso contrario. El camino que recorre una partícula de fluido en su movimiento se llama trayectoria de la partícula. En régimen permanente la trayectoria coincide con la llamada línea de corriente, que es la curva tangente a los vectores de velocidad en cada punto.

#### 2.2.4.1 Ecuación de continuidad.

Las siguientes ecuaciones son para un fluido incompresible y un hilo de corriente.

$$dQ = cdA = C$$

Solo en fluido incompresible el caudal volumétrico que atraviesa una sección transversal cualquiera de un filamento de corriente es constante; pero en todo fluido tanto compresible como incompresible el caudal másico es constante. La ecuación de continuidad para un tubo de corriente y un fluido incompresible se obtiene integrando la ecuación anterior.

$$Q = \int dQ = \int cdA = C$$

Donde

C: componente normal de la velocidad en cada elemento  $dA$ , que coincide con la ecuación antes mencionada.

#### **2.2.4.2 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 esta 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.

#### **2.2.4.3 Energías presentes en un fluido incompresible.**

La energía es la capacidad de un cuerpo a realizar trabajo mecánico. Según la ley universal de conservación de la energía o primer principio de la termodinámica, la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma. El estudio de la energía se simplifica en la Mecánica de Fluidos incompresibles por lo siguiente:

1) No se ocupa del calor ni de su transformación en otras formas de energía, lo cual pertenece al dominio de la Termodinámica.

2) No se ocupa de la energía atómica liberada en la fisión o fusión del átomo, de la energía química liberada o absorbida en las reacciones químicas, ni de otras muchas formas de energía como la eléctrica, magnética, etc.

3) No se ocupa solo de las tres formas siguientes de energía del fluido: energía potencial geodesia, energía de presión y energía cinética.

4) Estudia las transformaciones de estas tres formas entre si y de su intercambio con el trabajo mecánico.

**A. Energía potencial geodésica.** Energía potencial geodésica o simplemente energía geodésica o de posiciones igual al trabajo que la fuerza de la gravedad puede ejercer cuando su altura desciende de  $z_1$  a  $z_2$ . Cuando un líquido se remonta, con una bomba por ejemplo, del nivel inferior  $z_2$  al superior  $z_1$  es preciso ejercer sobre él un trabajo contra la fuerza de la gravedad igual y de sentido contrario que se transforma en energía potencial.

- **Energía geodésica total.**

$$E_z = \rho g V Z$$

- **Energía geodésica específica.**

$$e_z = \frac{\rho g V Z}{\rho V} = g Z$$

Dónde:

$\rho$  es la densidad

$g$  es la aceleración de la gravedad

$V$  es el volumen de líquido

$Z$  altura geodésica (con respecto a un nivel de referencia)

**B. Energía de presión.** En el cilindro de la siguiente figura el aceite a una presión  $p$ , que supondremos constante, desplaza el embolo de superficie  $A$  venciendo la resistencia  $F$ , y recorriendo un espacio  $x^4$ . El trabajo que realiza el fluido se presenta en la figura 3.

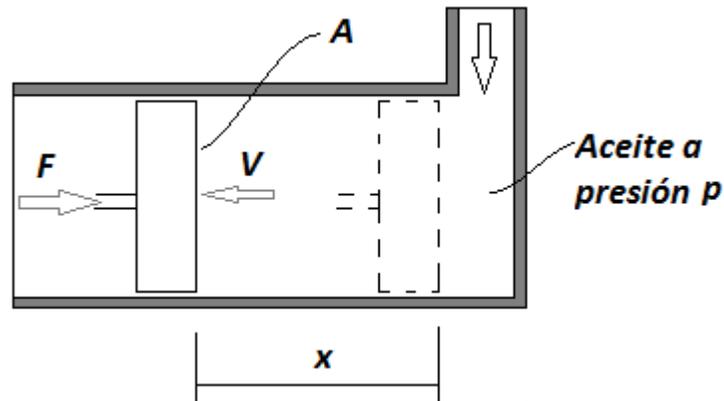


Figura 3. Un volumen  $V$  de un fluido a una presión  $p$  tiene una energía de presión igual a  $pV$ , o sea igual a la fuerza  $pA$  que ejerce sobre el fluido multiplicado por el camino recorrido por  $x$ .

$$T = pAx = pV$$

Dónde:  $V = Ax$  es el volumen barrido por el pistón

#### 2.2.4.4 Ecuación de Bernoulli generalizada.

En hidráulica se prefiere expresar toda la energía en forma de alturas equivalentes (dividiendo todos los términos por  $g$ ). Se tiene la ecuación siguiente:

$$\frac{p_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - \sum Hh^{1-2} + \sum Hr^{1-2} - \sum Ht - \sum Ht = \frac{p_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

#### 2.2.5 Tipos de flujo en canales hidráulicos.

##### 2.2.5.1 Descripción general de los canales hidráulicos.

Según Chow, (2004). "El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en tubería. Estas dos clases de flujo son similares en muchos aspectos pero se diferencian en otros".(p.3) El flujo en canal abierto

debe tener una superficie libre, mientras que el flujo en tubería no la tiene, debido a que en este caso el agua debe llenar completamente el conducto. Una superficie libre está sometida a la presión atmosférica.

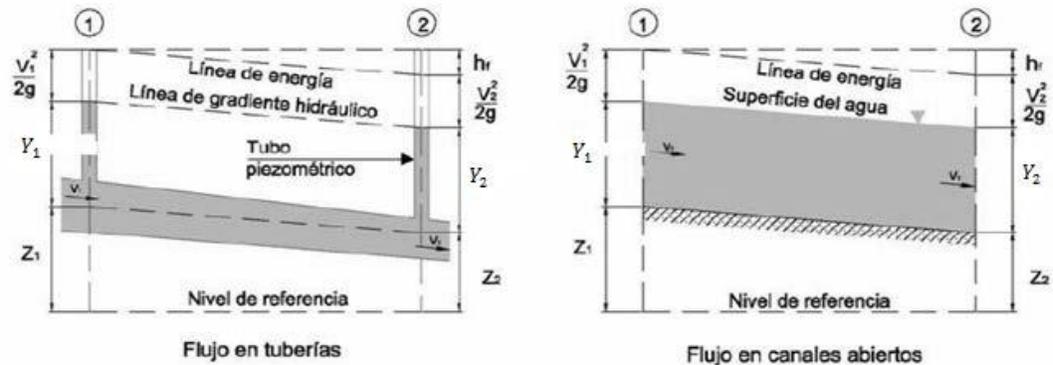


Figura 4. Tipos de flujo. Fuente: Chow (2004).

### 2.2.5.2 Tipos de flujo en canales

La clasificación del flujo en un canal depende de referencia que se tome, así tenemos:

#### a) Flujo permanente y flujo no permanente.

“El flujo es permanente si los parámetros (tirante, velocidad, área, etc.), no cambian con respecto al tiempo, es decir, en una sección del canal en todos los tiempos los elementos del flujo permanecen constantes”.

**b) Flujo uniforme y flujo variado.-** Esta clasificación obedece a la utilización del espacio como variable. El flujo es uniforme si los parámetros (tirante, velocidad, área, etc.), no cambian con respecto al espacio, es decir, en cualquier sección del canal los elementos del flujo permanecen constantes. El flujo variado puede clasificarse como rápidamente variado o gradualmente variado.

**Flujo rápidamente variado:** El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas, como es el caso del resalto hidráulico.

**Flujo gradualmente variado:** El flujo gradualmente variado es aquel en el cual los parámetros cambian en forma gradual a lo largo del canal, como es el caso de una curva de remanso. (op. cit., p.24).

### 2.2.5.3 Estados de flujo.

El estado o comportamiento del flujo en canales abiertos está gobernado básicamente por los efectos de la viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo. (op. cit., p.33).

- Efecto de la viscosidad: el flujo puede ser laminar, turbulento o transicional según el efecto de la viscosidad en relación con la inercia.
- El flujo es laminar: si las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las fuerzas inerciales, de tal manera que la viscosidad juega un papel importante para determinar el comportamiento de flujo.

Si el número de Reynolds es menor o igual a 2000 denomina al flujo laminar, este se produce a bajas velocidades o altas viscosidades, el fluido fluye en forma de suaves capas o láminas, con la velocidad más alta en el centro de la tubería y velocidades bajas cerca de la pared de la tubería donde las fuerzas viscosas lo retienen, una característica significativa del flujo laminar es la forma parabólica de su perfil de velocidad.

- El flujo es turbulento: si las fuerzas son débiles en relación con las fuerzas inerciales. El efecto de la viscosidad en relación con la inercia puede representarse mediante el número de Reynolds<sup>7</sup> definido por:

$$R = \frac{vL}{V}$$

Dónde:

$v$ : velocidad de flujo, en pies/s.

$L$ : longitud, en pies.

$V$ : Viscosidad cinemática, en pies<sup>2</sup> /s.

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.

Cuando el número de Reynolds se encuentra entre 2000 y 4000 el fluido se encuentra en una zona de transición, donde puede ser tanto laminar como turbulento.

Si el número de Reynolds es mayor de 4000 el flujo es turbulento caracterizándose por presentar altas velocidades o bajas viscosidades, este tipo de flujo se descompone en turbulentos remolinos con la misma velocidad promedio en toda la tubería, el fluido se mueve de forma desordenada en todas las direcciones; el perfil de este tipo de flujo tiene una forma mucho más uniforme.

- Efecto de la gravedad: el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. La relación antes mencionada está dada por el número de Froude , el cual se representa como:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

Donde  $v$ : es la velocidad de flujo, en pies/s.

$g$ : es la aceleración de la gravedad, en pies<sup>2</sup> /s.

L: es una longitud característica en pies.

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.

#### **2.2.5.4 Clases de canales abiertos**

Según Villon, M. (2007), "los canales son conductos en los que el agua circula debido a la acción de gravedad y sin ninguna presión, pues la superficie libre del líquido está en contacto con la atmosfera".(p.15.). En ingeniería se denomina canal a una construcción destinada al transporte de fluidos; generalmente utilizada para agua y que, a diferencia de las tuberías, es abierta a la atmósfera. También se utilizan como vías artificiales de navegación.

Los canales pueden ser naturales (ríos o arroyos) o artificiales (construidos por el hombre). Dentro de estos últimos, pueden incluirse conductos cerrados que trabajan parcialmente llenos (alcantarillas, tuberías).

La descripción del comportamiento hidráulico de los canales es una parte fundamental de la hidráulica y su diseño pertenece al campo de la Ingeniería hidráulica, una de las especialidades de la Ingeniería Civil.

## 2.2.6 Flujo en canales abiertos y sus propiedades.

### 2.2.6.1 Geometría de un canal.

Un canal construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante se conoce como canal prismático. (op. cit., p.33). En la tabla 1 muestras las 7 formas geométricas utilizadas comúnmente.

Sección	Área A	Perímetro Mojado P	Radio hidráulico R	Ancho superior T	Profundidad hidráulica D	Factor de la sección
 Rectangular	$by$	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	$b$	$y$	$by^{1.5}$
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$	$\frac{(b+zy)y}{b+2zy}$	$\frac{[(b+zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b+2zy}}$
 Triangular	$zy^2$	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{\sqrt{2}}{2}zy^{2.5}$
 Circular	$\frac{1}{8}(\theta \text{sen} \theta) do^2$	$\frac{1}{8}\theta do$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen} \theta}{\theta}\right) do$	$2\sqrt{1+z^2}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \text{sen} \theta}{\text{sen} \frac{1}{2}\theta}\right)$	$\frac{\sqrt{2}(\theta - \text{sen} \theta)}{32\left(\text{sen} \frac{1}{2}\theta\right)}$
 Parabólica	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{8T}$	$\frac{2T^2y}{3T^2 + 8y^2}$	$\frac{34}{2y}$	$\frac{2}{3}y$	$\frac{2}{9}\sqrt{6T^{1.5}}$
 Curva	$\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2 + (b+2r)y$	$(\pi-2)r+b+2y$	$\frac{\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2 + (b+2r)y}{(\pi-2)r+b+2y}$	$b+2r$	$\frac{\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2}{b+2r}$	$\frac{\left[\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2 + (b+2r)y\right]^{1.5}}{\sqrt{b+2r}}$
 Talud recto	$\frac{T^2}{4z} - \frac{r^2}{z}(1 - z \cot^{-1}z)$	$\frac{T}{z}\sqrt{1+z^2} - \frac{2r}{z}(1 - z \cot^{-1}z)$	$\frac{A}{P}$	$2\left[\frac{Z(y-r)}{r\sqrt{1+z^2}}\right]$	$\frac{A}{T}$	$A\sqrt{\frac{A}{T}}$

**Tabla 2. Elementos Geométricos de secciones de canal. Fuente: Chow (2004).**

### 2.2.6.2 Elementos geométricos de una sección de canal.

Según Rocha (2007). "Los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad de flujo". (p.10).

Para secciones regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección, pero para secciones complicadas y secciones de corrientes naturales, no se pueden escribir una ecuación simple

para expresar estos elementos, pero pueden prepararse curvas que representen la relación entre estos elementos y la profundidad de flujo para uso en cálculos hidráulicos.

A continuación se dan las definiciones de varios elementos geométricos de importancia básica:

- **La profundidad de flujo o tirante ( $y$ ):** 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.
- **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.
- **El ancho superficial ( $T$ ):** Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.
- **El área mojada ( $A$ ):** Es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.
- **El 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. Ver Figura 2.2.6.2

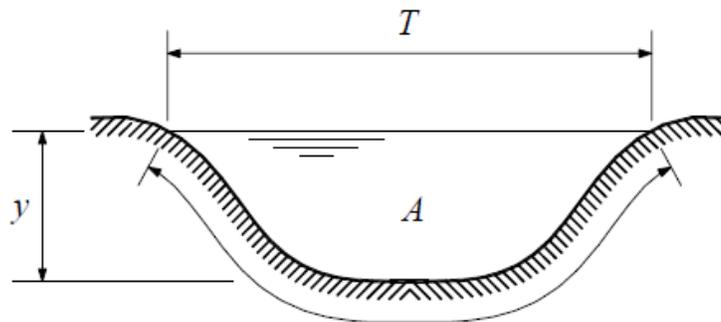


Figura 5. Perímetro mojado. Fuente: Rocha (2007)

- **El radio hidráulico ( $R$ ):** Es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.

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

- **La profundidad hidráulica o tirante hidráulico (D):** Es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie

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

- **El factor de sección para el cálculo de flujo crítico (Z):** es el producto del área mojada y la raíz cuadrada de la profundidad hidráulica.

$$Z = A \bar{D} = A \sqrt{\frac{A}{T}}$$

- **El factor de sección para el cálculo de flujo uniforme  $AR^{2/3}$  :** Es el producto del área mojada y el radio hidráulico elevado a la potencia 2/3

### 2.2.6.3 Distribución de velocidades en una sección de canal.

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05m a 0.025m de la profundidad. A continuación se muestra la figura 2.2.6.3 y cual es un modelo general de la distribución de velocidades para varias secciones horizontales y verticales en un canal con sección rectangular. (op. cit., p.33).

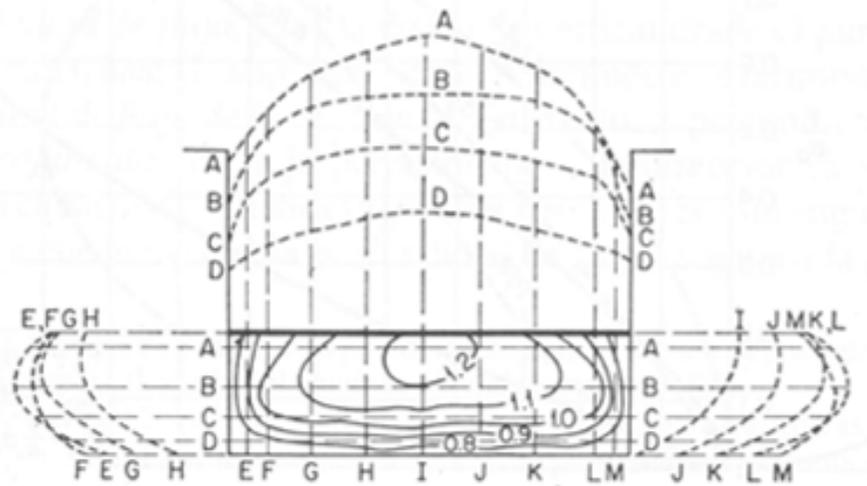


Figura 6. Distribución de velocidades en un canal rectangular. Fuente: Chow (2004)

#### 2.2.6.4 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. (*Ibidem*).

#### 2.2.7 Principios de energía y momentum.

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

### 2.2.7.1 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:

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuacion válida para pendientes grandes}$$

$$E = y + \frac{V^2}{2g} = y + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad \text{Ecuacion válida para pendientes pequeñas } (\alpha=1)$$

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. (op. cit., p.38).

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

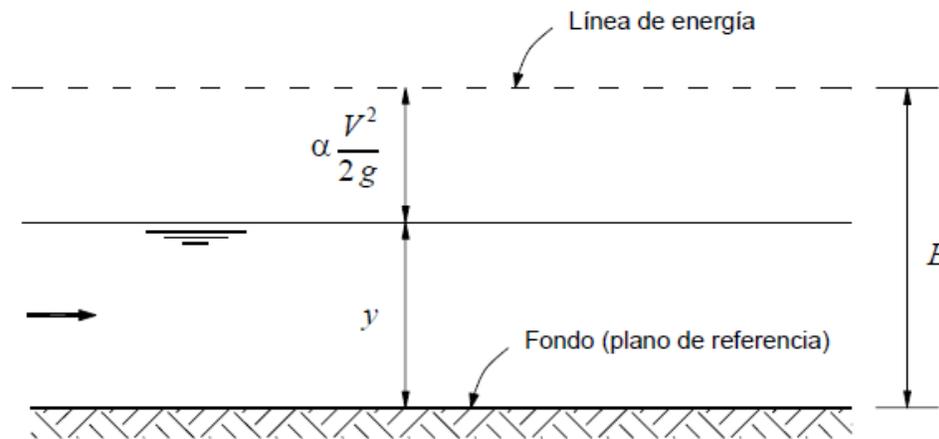


Figura 7. Interpretación gráfica de la Energía Específica. Fuente: Rocha (2007)

### 2.2.7.2 Criterio para el estado crítico de flujo.

El estado crítico de flujo ha sido definido anteriormente como la condición para el cual el número de Froude es igual a la unidad o definición más común es el estado de flujo para el cual la energía específica es mínima para un caudal determinado<sup>17</sup>. En el estado crítico de flujo la energía específica es mínima, o  $dE/dy = 0$ . (op. cit., p.38).

La anterior ecuación, por consiguiente da

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

Este es el criterio para el flujo crítico, el cual establece que en el estado crítico del flujo la altura de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica. La ecuación anterior se puede representar de la siguiente forma:

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

Para un canal con un ángulo de pendiente grande y un coeficiente de energía “ $\alpha$ ”, el criterio de flujo crítico queda

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

El número de Froude puede definirse como:

$$F = \frac{V}{\frac{gD \cos \theta}{\alpha}}$$

### 2.2.7.3 Fenómenos locales.

Un fenómeno local es si el cambio ocurre con rapidez a lo largo de una distancia relativamente corta y el flujo es rápidamente variado. A continuación se describen dos fenómenos locales. (op. cit., p.33).

- Caída Hidráulica. Un cambio rápido en la profundidad de flujo de un nivel alto a un nivel bajo resultara en una depresión abrupta de la superficie del agua, entonces caída hidráulica es un fenómeno causado por un cambio abrupto en la pendiente del canal o en la sección transversal.

- Caída libre: es un caso especial de la caída hidráulica, esta ocurre cuando existen una discontinuidad en el fondo de un canal plano. Ver figura

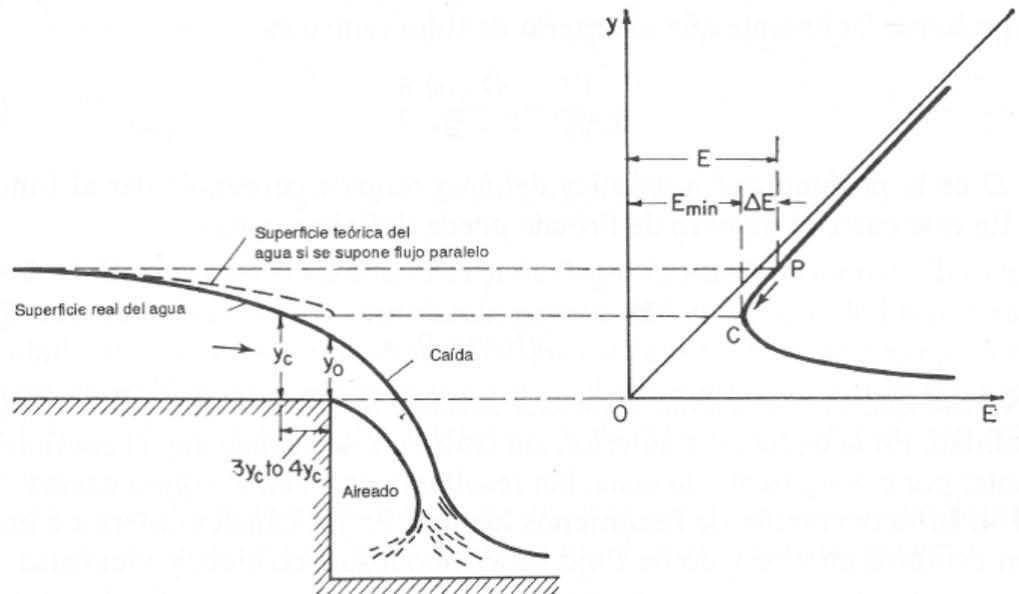


Figura 8. Caída libre interpretada mediante una curva de energía específica.  
Fuente: Chow (2004)

#### 2.2.7.4 Energía específica a gasto constante.

La ecuación de energía específica a gasto constante puede ser graficada colocando en el eje de las abscisas o "X" los valores de la energía específica y en el eje de las ordenadas o "Y" la profundidad del flujo o tirante. (op. cit., p.38).

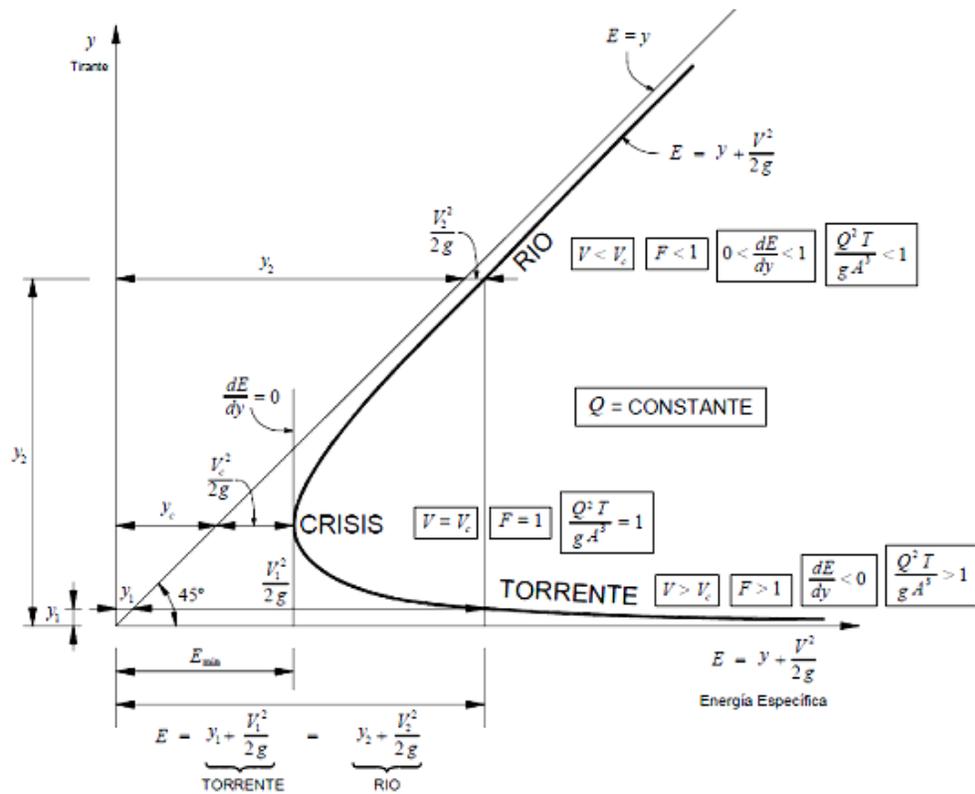


Figura 9. Gráfico de la Energía Específica a gasto constante. (Curva E – y)  
 Dónde:

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

$$\frac{V_1^2}{2g} > \frac{V_2^2}{2g} \text{ ----- flujo supercrítico ----- } F > 1 \text{ (} y_1 > y_c \text{)}$$

$$\frac{V_1^2}{2g} < \frac{V_2^2}{2g} \text{ ----- flujo subcrítico ----- } F < 1 \text{ (} y_2 < y_c \text{)}$$

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

A continuación se presenta una expresión para una sección transversal cualquiera como se ve en la figura 10.

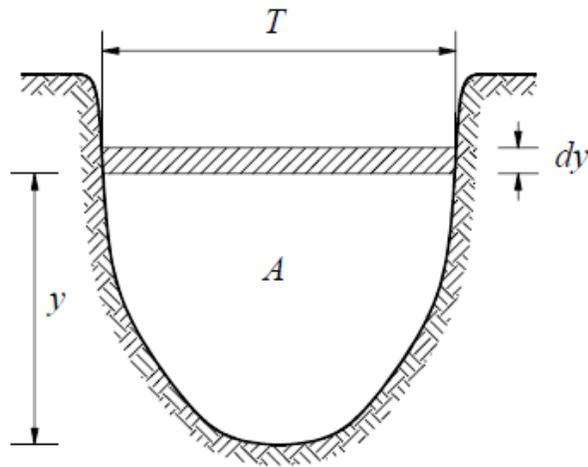


Figura 10. Figura general de una sección de canal cualquiera. Fuente: Rocha (2007)

Para cada valor de la profundidad “y” que es variable, hay un valor del área “A” y un valor del ancho superficial “T”, entonces el área es:

$$A = \int_0^y y \, dy$$

Luego se tiene:

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

Haciendo los arreglos matemáticos pertinentes se llega a la **ecuación general de flujo crítico** en cualquier sección transversal

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{T} \text{ o } \frac{Q^2 T}{g A^3} = 1$$

Como se puede ver en la figura 19 tiene dos asíntotas y un mínimo, a continuación se muestran cada uno de ellos.

- La rama superior corresponde al régimen denominado RIO y cumple siempre que:

$$\frac{Q^2 T}{g A^3} < 1$$

- La rama inferior corresponde al régimen denominado TORRENTE, siempre cumple que:

$$\frac{Q^2 T}{g A^3} > 1$$

- El régimen CRITICO, se separa de los ríos y de los torrentes y corresponde a:

$$\frac{Q^2 T}{g A^3} = 1$$

#### 2.2.7.5 Ecuaciones de caudal y velocidad crítica

- **Caudal critico**

$$Q = A \sqrt{g \frac{A}{T}}$$

- **Velocidad critica**

$$V_c = \sqrt{g \frac{A}{T}} = \sqrt{g \bar{d}c}$$

- **Velocidad critica real**

$$V_c = \frac{\bar{g}}{\alpha} dc$$

#### 2.2.7.6 Energía específica, condiciones críticas sección rectangular.

La energía que corresponde a las condiciones críticas es:  $E = yc + \frac{V_c^2}{2g}$

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

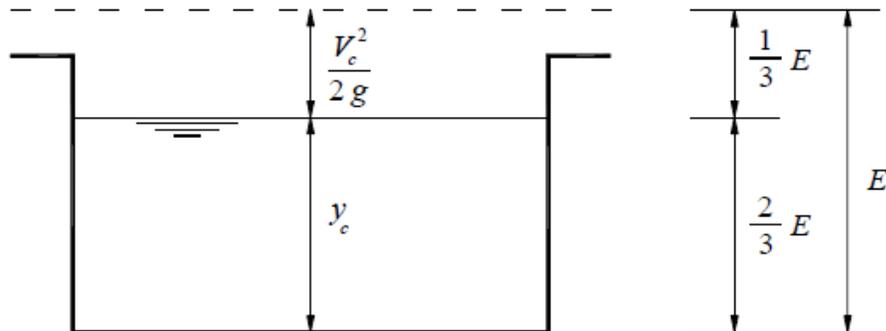


Figura 11. Distribución de la Energía Específica en un canal rectangular.  
Fuente: Rocha (2007)

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

$$V_c = \frac{Q}{A} = \frac{q}{y_c} = \sqrt{g y_c} \quad \text{Entonces} \quad y_c = \frac{\overline{q^2}}{g} = 0.467 q^2 \text{ } ^3$$

### 2.2.7.7 Fuerza específica.

La segunda ley del movimiento de Newton dice que: “el cambio de la cantidad de movimiento por unidad de tiempo es igual a la fuerza resultante de las fuerzas exteriores”. Se considera un canal con un flujo permanente cualquiera y un volumen de control limitado por dos secciones transversales 1 y 2, la superficie libre y el fondo del canal. (op. cit., p.38). Tal como se muestra en la figura

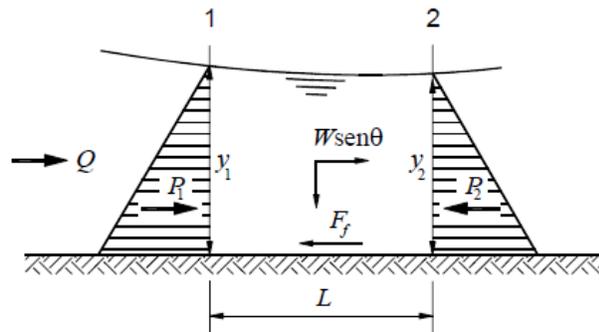


Figura 12. Gráfica para la deducción de la ecuación de la Fuerza específica.  
Fuente: Rocha (2007)

Ahora aplicando el teorema de la cantidad de movimiento (segunda ley del movimiento de Newton) entre las secciones 1 y 2 se obtiene lo siguiente:

$$\rho Q \beta_2 V_2^2 - \beta_1 V_1^2 = P_1 - P_2 + W \sin \theta - F_f$$

$\rho$ : Densidad del fluido

$Q$ : gasto

$\beta$ : coeficiente de Boussinesq

$V$ : velocidad media.

$P$ : fuerza hidrostática.

$W$ : peso.

$F_f$ : fuerza debida a la fricción.

$y$ : tirante

$\Theta$ : ángulo que corresponde a la pendiente del canal.

L: longitud

$W \sin \theta$ : componente del peso en la dirección del escurrimiento.

En la anterior ecuación se ha considerado una distribución hidrostática de presiones lo que es válido para el movimiento uniforme y aproximadamente válido en el movimiento gradualmente variado.

En la ecuación de la cantidad de movimiento están involucradas las fuerzas exteriores, en tanto que en la ecuación de energía se expresan la disipación de energía interna. Para un canal en el cual el volumen de control tenga peso y fricción despreciables y en el que  $\beta_1 = \beta_2 = 1$  la ecuación se reduce a:

$$\rho Q (V_2 - V_1) = P_1 - P_2$$

En donde  $P = \gamma \bar{y} A$  siendo  $\bar{y}$  la profundidad del centro de gravedad, sustituyendo y haciendo arreglos a la ecuación anterior se tiene lo siguiente:

$$\frac{Q^2}{gA} + \bar{y} A = \text{constante} = \text{fuerza específica} = \text{momento}$$

$\frac{Q^2}{gA}$ : Es la cantidad de movimiento del fluido que pasa por la sección, por unidad de tiempo y f por unidad de peso.

$\bar{y} A$ : es la fuerza hidrostática por unidad de peso. Ver figura

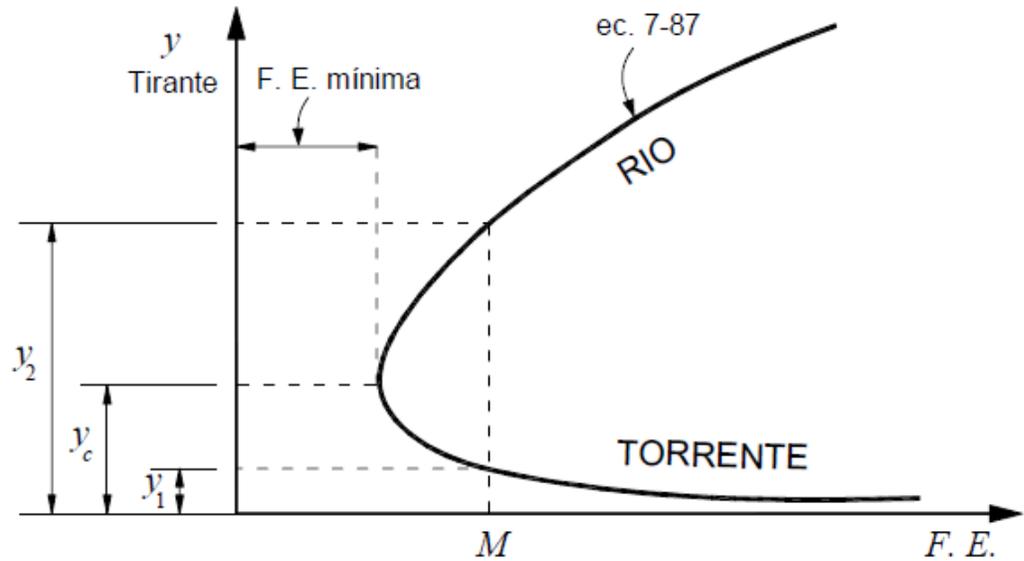


Figura 13. Fuerza específica. Fuente: Rocha (2007).

Cada uno de los dos términos de la ecuación de la fuerza específica es dimensionalmente una fuerza por unidad de peso de agua. Se observa que para una fuerza específica hay dos tirantes posibles  $y_1$  e  $y_2$ . Los tirantes que corresponden a la misma fuerza específica se denominan conjugados. Para un canal rectangular el tirante crítico es:

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

Y como se dijo en el párrafo anterior que se denominan conjugados se concluye que tienen la misma Fuerza Específica.

### 2.2.8 Flujo rápidamente variado: resalto hidráulico.

“Es un fenómeno local, que se presenta en el flujo rápidamente variado, el cual va siempre acompañado por el aumento súbito del tirante y una pérdida de energía bastante considerable (disipada principalmente como calor), en un tramo relativamente corto”.(p.179). (op. Cit., p.36). Ocurre en el paso brusco de régimen supercrítico (rápido) a régimen subcrítico (lento), es decir, en el resalto hidráulico el tirante, en un corto tramo, cambia de un valor inferior al crítico a otro superior a este.

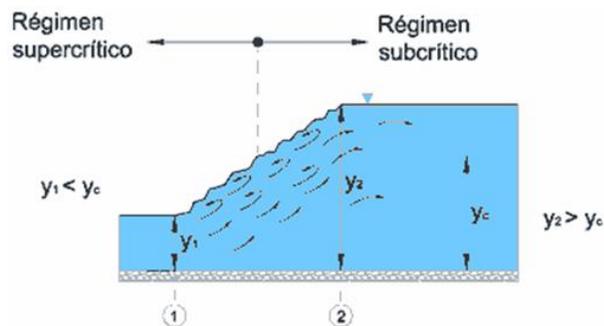


Figura 14. Resalto hidráulico. Fuente: Villon (2007).

Generalmente, el resalto se forma cuando en una corriente rápida existe algún obstáculo o un cambio brusco de pendiente. Esto sucede al pie de estructuras hidráulicas tales como vertederos de demasías, rápidas, salidas de compuertas con descarga por el fondo, etc., lo que se muestra en la Figura 15.



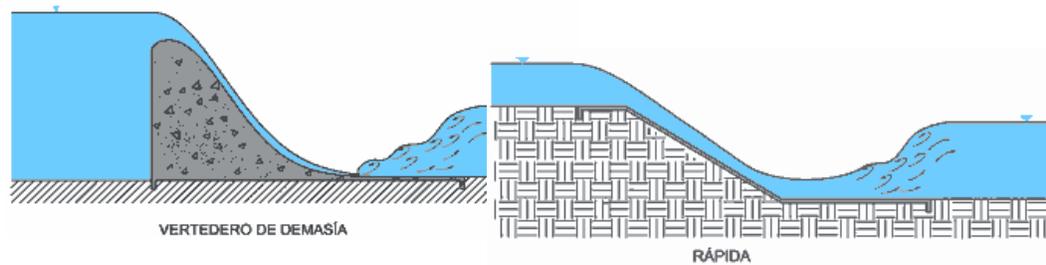


Figura 15. Formación del resalto. Fuente: Villon (2007).

Además de su mérito como disipador natural de energía, el resalto hidráulico tiene muchos otros usos prácticos, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

**a)** Prevención o confinamiento de la socavación aguas debajo de las estructuras hidráulicas donde es necesario disipar energía.

**b)** Mezclado eficiente de fluidos o de sustancias químicas usadas en la purificación de aguas, debido a la naturaleza fuertemente turbulenta del fenómeno.

**c)** Incremento del caudal descargado por una compuerta deslizante al rechazar el retroceso del agua contra la compuerta. Esto aumenta la carga efectiva y con ella el caudal.

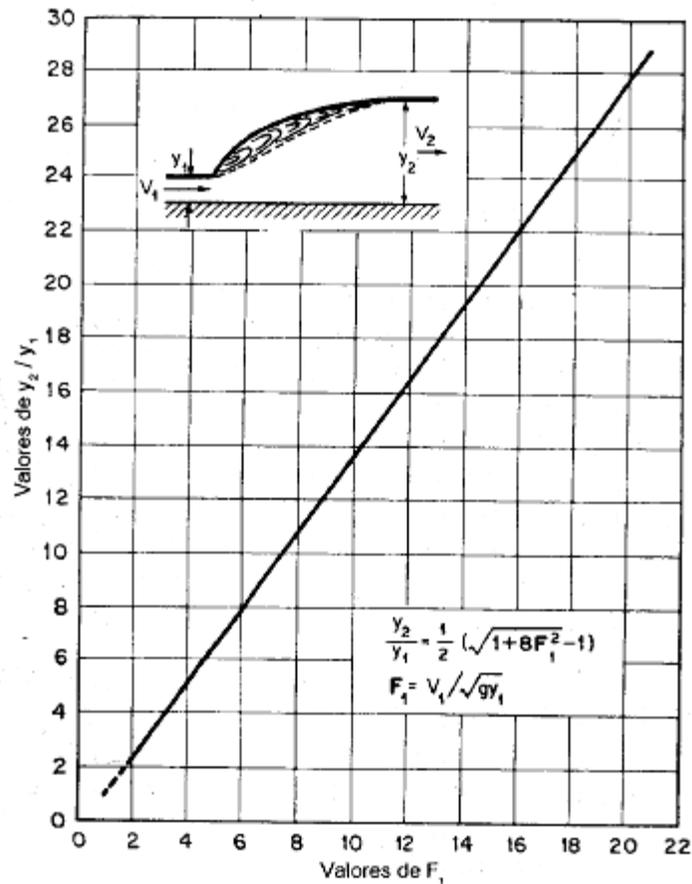
**d)** La recuperación de carga aguas debajo de un aforador y mantenimiento de un nivel alto del agua en el canal de riego o de distribución del agua

### 2.2.8.1 Salto hidráulico en un canal rectangular.

Para flujo supercrítico en un canal rectangular horizontal, la energía del flujo se disipa a través de la resistencia de fricción a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la

profundidad en la dirección del flujo y aguas abajo satisfacen la siguiente ecuación

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



Relación entre  $F_1$  y  $y_2 / y_1$  para un resalto hidráulico en un canal rectangular horizontal

El salto hidráulico es un movimiento rápidamente variado, con fuerte curvatura de las líneas de corriente. Se caracteriza por la gran disipación de energía. Se puede describir como el paso violento de un régimen supercrítico a uno sub-crítico.

El salto hidráulico es un fenómeno tridimensional que se presenta grandes fluctuaciones de la velocidad y de la presión en cada punto; es decir, que tiene un alto radio de turbulencia, lo que se traduce en una alta capacidad de mezcla. En un salto hidráulico se produce también la incorporación de aire a la masa líquida, como también produce oleaje el cual se propaga aguas abajo.

### 2.2.8.2 Tipos de salto

$F=1$  Flujo crítico, no hay salto.

$1 < F < 1.7$  “Salto ondular” (la superficie libre presenta ondulaciones y presenta el resalto ondulante).



Figura 16. Salto ondular. Fuente: Villon (2007).

$1.7 < F < 2.5$  “Salto débil” (la disipación de energía es pequeña, se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme).



Figura 17. Salto débil. Fuente: Villon (2007).

$2.5 < F$  “Salto oscilante”, (se produce el efecto de chorro, hay ondas superficiales).



Figura 18. Salto oscilante. Fuente: Villon (2007).

$4.5 < F < 9$  “Salto permanente o fijo”, (buena disipación de energía (45 – 70 %), la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo ocurren prácticamente en la misma sección vertical se llama también “resalto estable”).



Figura 19. Salto permanente. Fuente: Villon (2007).

$F \geq 9$  “Salto fuerte”, (gran disipación de energía 85%, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto).



Figura 20. Salto fuerte. Fuente: Villon (2007).

### 2.2.8.3 Características básicas del salto hidráulico.

- **Perdidas de energía.** En el resalto la pérdida de energía es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto, como sigue:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{y_2 - y_1^2}{4y_1 * y_2}$$

La relación  $\Delta E/E_1$  se conoce como pérdida relativa.

- **Eficiencia.** La relación entre la energía específica antes y después del resalto se define como la eficiencia del resalto. Puede mostrarse que la eficiencia es:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{8F_1^2 + 1^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)}$$

La ecuación anterior indica que la eficiencia de un resalto es una función adimensional, que depende solo del número Froude del flujo de aproximación. La pérdida relativa es

$$1 - \frac{E_2}{E_1} = \frac{\Delta E}{E_1}$$

Ésta también es una función adimensional de  $F_1$ .

- **Altura de resalto.** La diferencia entre las profundidades antes y después del resalto es la altura de resalto, o  $h_j = y_2 - y_1$ . Al expresar cada término como la relación con respecto a la energía específica inicial

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{1 + 8F_1^2 - 3}{F_1^2 + 2}$$

- **Longitud del resalto.** Esta puede definirse como la distancia medida desde la cara frontal del resalto hasta un punto en la superficie inmediatamente aguas abajo del remolino. En teoría, esta longitud no puede determinarse con facilidad mediante el número de Froude  $F_1$  contra una relación adimensional  $L / (y_2 - y_1)$ , o  $L/y_1$  o  $L/y_2$ . Sin embargo a continuación se presenta la curva que muestra la regularidad de una parte plana para el rango de los resaltos bien establecidos. Como se dijo anteriormente la longitud del salto es difícil de determinarse, pues esta depende de algunos factores como los siguientes: pendiente del canal, número de Froude, etc., pero aproximadamente se tiene:

Como se dijo anteriormente la longitud del salto es difícil de determinarse, pues esta depende de algunos factores como los siguientes: pendiente del canal, número de Froude, etc., pero aproximadamente se tiene:

$$L = 6.9(y^2 - y_1)$$

- **Altura del salto ( $h_i$ ):** La altura del salto se define como la diferencia entre los tirantes después y antes del salto.  $h_i = y_2 - y_1$ . Se demuestra entonces que:

$$\frac{h_i}{E_1} = \frac{1 + 8F_1^2 - 3}{F_1^2 + 2}$$

- **Oleaje.** En un salto hidráulico se producen ondas que se propagan hacia aguas abajo. Sus alturas y periodos dependen del número de Froude incidente. Se designa como  $H_s$  a la altura significativa (promedio del tercio superior). Algunos autores han establecido

relaciones válidas para el número de Froude, la siguiente relación se aplica para números de Froude mayores o iguales que siete:

$$\frac{Hs}{y_1} = \frac{1}{6}(F_1 - 1)$$

## 2.2.9 Herramientas para el análisis del flujo uniforme

### 2.2.9.1 Características del flujo uniforme.

Las características que son principales en el flujo uniforme son las siguientes:

1. En cada sección del canal son constantes la profundidad, el área mojada, la velocidad y el caudal.

2. Son paralelos la línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal, es decir que, para que sus pendientes sean todas constantes, la distribución de velocidad a través de la sección del canal permanece inalterada.

Casi siempre se supone una condición de flujo uniforme para el cálculo de flujo en corrientes naturales. Se considera que el flujo uniforme es solo permanente, ya que el flujo uniforme no permanente prácticamente no existe y no es aplicable a casos reales ya que a menudo se supone una condición de flujo uniforme para el cálculo de flujo en corrientes naturales.

Ahora bien, es de hacer notar que el flujo uniforme no es posible que suceda a velocidades conocidas como velocidades ultra rápidas, ya que cuando el flujo uniforme alcanza cierta velocidad alta se vuelve muy inestable. Además es posible que a velocidades altas el flujo atrape aire y es de esa manera como se vuelve inestable.

Cuando se ingresa flujo al canal (aguas arriba) El flujo sufre una resistencia al movimiento, pero esta resistencia es balanceada por las

fuerzas de la gravedad a medida fluye aguas abajo, cuando esto ocurre se desarrolla el flujo uniforme.

La magnitud de esta resistencia depende de la velocidad del flujo, esto cuando factores físicos del canal se mantiene constantes. Al tramo cuando el flujo entra aguas arriba y se acelera hasta llegar a la condición de flujo uniforme se le conoce como zona transitoria, y esta zona debe constituir una pequeña parte comparado con la longitud del canal. Cabe aclarar que en la zona transitoria el flujo es acelerado y variado. La longitud del canal depende del caudal y las condiciones físicas del canal, la pendiente, y la rugosidad.

La profundidad del flujo uniforme se le conoce como profundidad normal, esta se representa en la figura 20 como LPN y por una línea continua y LPC como una línea punteada representa la línea de profundidad crítica. A continuación veremos un canal largo con tres tipos de pendientes diferentes: sub-crítica, crítica y supercrítica. En zona sub-crítica el flujo en zona de transición es ondulante, este es uniforme solo en sus extremos, pero en lo demás es uniforme. En la zona crítica se observa un comportamiento de flujo inestable, es posible que en el tramo intermedio existan ondulaciones pero en promedio la profundidad es constante y se puede considerar como uniforme. En la zona supercrítica hay una caída de agua hidráulica gradual pasando la superficie de agua transitoria de supercrítico a sub-crítico. (op. Cit., p.33).

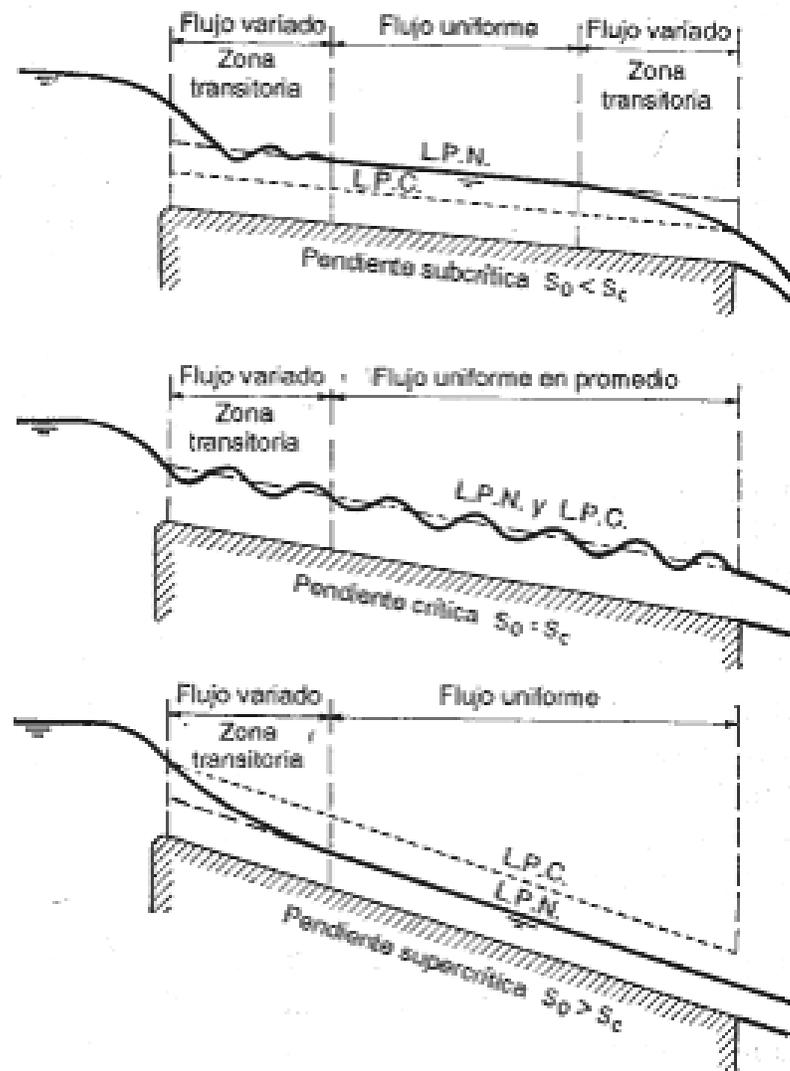


Figura 21. Establecimiento de flujo uniforme en un canal largo. Fuente: Chow (2004)

### 2.2.9.2 Expresión de la velocidad en flujo uniforme

Para cálculos hidráulicos la mayor parte de ecuaciones prácticas de flujo uniforme pueden expresarse con la ecuación de flujo uniforme:

$$V = RC^x S^y$$

Donde “V” es la velocidad media en ft/s, “C” es un factor de resistencia al flujo, “R” es el radio hidráulico en ft, “S” es la pendiente de la energía y “x” y “y” son exponentes.

El factor “C” varía con la velocidad media, Radio hidráulico, y con la rugosidad de la superficie del canal, viscosidad y muchos otros factores. Para hacerlo más práctico se supone que el flujo en un canal natural es uniforme bajo condiciones normales. Algunas variables que se deben de tomar en cuenta para una buena ecuación de flujo uniforme, para canales con transporte de sedimentos y flujo turbulento son:

*A*: Área mojada

*V*: la velocidad media

*V<sub>ms</sub>*: la velocidad máxima en la superficie

*P*: el perímetro mojado

*R*: radio hidráulico

*y*: la máxima profundidad del área mojada

*S<sub>w</sub>*: la pendiente de la superficie del agua

$\eta$ : coeficiente de rugosidad del canal

*Q<sub>s</sub>*: la carga de sedimentos en suspensión

*Q<sub>b</sub>*: la carga de lecho

$\mu$ : viscosidad dinámica del agua

*T*: temperatura del agua

Hay muchas ecuaciones de flujo, pero no todas cumplen con las variables antes mencionadas, pero las ecuaciones que son más utilizadas son las de Chezy y Manning. También se han deducido ecuaciones teóricas de flujo uniforme en base a distribución de velocidad teórica a través de la sección del canal.

### 2.2.9.3 Ecuación de Chezy

Se dice que probablemente la primera ecuación de flujo uniforme fue desarrollada por AntoniChezy, y tal famosa ecuación es:

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

Dónde:

V: Velocidad media en pies/s

R: radio hidráulico en pies

S: pendiente de la línea de energía

C: Factor de resistencia al flujo, conocido como C de Chezy.

Esta ecuación se deduce matemáticamente de dos suposiciones:

1. La primera establece que la fuerza que resiste el 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 perímetro del producto mojado y la longitud del tramo del canal o PL y la fuerza total que resiste al flujo es:

$$KV^2PL$$

Como se muestra en la ecuación, solo se agrega la longitud del canal, para saber la resistencia que opone a ese movimiento.

2. La segunda suposición es el principio básico del flujo uniforme, y que establece que en el flujo uniforme la componente efectiva de la fuerza gravitacional que causa el flujo debe de ser igual a la fuerza total de resistencia.

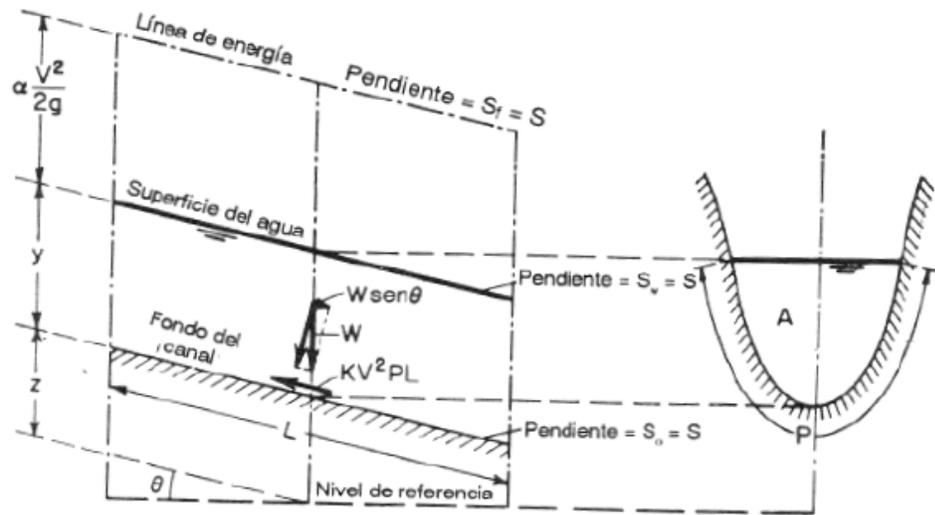


Figura 22. Deducción de la ecuación de Chezy. Fuente: Chow (2004)

Esto quiere decir que la componente efectiva de la fuerza gravitacional es paralela al fondo del canal e igual a  $WALS \sin \theta = WALS$  es el peso unitario del agua y  $A$  es el área mojada,  $\theta$  es el ángulo de la pendiente del canal y  $S$  es la pendiente del canal. Lo anterior indica que  $WALS = KV^2 PL$ , esto si  $\frac{A}{P} = R$  y  $\frac{W}{K}$  se reemplaza para un factor "C", y esto se reduce a la ecuación de Chezy

$$V = \frac{w}{k} A P S = C \overline{RS}$$

Se han establecido tres ecuaciones básicas para calcular el factor de resistencia de Chezy (C).

- Ecuación de Ganguillet-Kutter

$$c = \frac{41.65 + \frac{0.00281}{s} + \frac{1.811}{n}}{1 + 41.65 + \frac{0.00281}{s} \frac{n}{\sqrt{R}}}$$

- Ecuación de Powell

$$c = -42 \log \frac{c}{4R} + \frac{e}{R}$$

- Ecuación de Bazin

$$c = \frac{157.6}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}}$$

#### 2.2.9.4 Ecuación de Manning

Esta ecuación que en un principio fue dada en forma complicada por Manning y luego simplificada por otros, quedando dicha ecuación de la siguiente manera:

$$V = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

Dónde:

V: velocidad media en pies/s

R: radio hidráulico en pies

S: pendiente de la línea de energía

n: es el coeficiente de rugosidad de Manning

Esta ecuación fue deducida a partir de siete ecuaciones diferentes, basada en datos experimentales de Bazin y además verificada mediante 17 observaciones. Ya que esta ecuación da resultados satisfactorios en aplicaciones prácticas y debido a su simplicidad, es la más utilizada en la práctica de cálculos de flujos de canales abiertos. Como clave para la

determinación correcta del factor de rugosidad de Manning se tiene que estudiar cuatro enfoques generales, estos son:

1. Entender los factores que afectan el valor de “n”, para conocer el problema y disminuir el rasgo de incertidumbre.
2. Consultar una tabla de valores comunes “n” para canales de diferentes tipos.
3. Examinar y familiarizarse con canales comunes y sus coeficientes de rugosidad.

Determinar “n” mediante un proceso analítico que se basa en la distribución de la velocidad teórica de la sección transversal y en los datos de medición de velocidad o rugosidad.

#### **2.2.9.5 Factores que afectan el coeficiente de rugosidad de manning.**

- “R” rugosidad artificial: Esta se representa por el tamaño, y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y provocan un efecto retardador del flujo., granos fijos darán un valor pequeño de n.

- Vegetación: la vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, además la vegetación, además esta puede reducir la capacidad del canal.

- Irregularidad del canal: esto incluye irregularidades en el perímetro mojado y variaciones en la sección transversal. En canales naturales estas irregularidades son producidas por ejemplo es presencia de barras de arena, ondas de arena; también si hay cambios abruptos de secciones pequeñas y grandes es necesario un n grande. Si el cambio de sección transversal fuera gradual no hay efectos apreciables en n .

- Alineamiento del canal: curvas suaves con radios grandes producirán valores de “n” relativamente bajos, pero en tantos sean curvas bruscas, su n aumentara.

- Sedimentación y socavación: la sedimentación puede cambiar un canal irregular en un canal relativamente uniforme y disminuir el  $n$ , en tanto la socavación hace lo contrario e incrementa el “ $n$ ”. Sin embargo el efecto dominante de la socavación dependerá de la naturaleza del material depositado. En tanto la socavación dependerá del material que conforme el perímetro mojado. Es de notar que el efecto de la socavación no es importante siempre y cuando la erosión en el lecho del canal causado por velocidades altas progrese igual e uniformemente.

- Obstrucción: la presencia de obstrucciones de troncos, pilas de puente y estructuras similares tienden a incrementar en “ $n$ ”, la magnitud de este aumento dependerá de la naturaleza de las obstrucciones, de su tamaño, forma, número y distribución.

- Tamaño y forma del canal: un incremento en el radio hidráulico puede aumentar y disminuir el “ $n$ ”.

- Nivel y caudal: en la mayor parte de las corrientes el valor de  $n$  disminuye con el aumento en el nivel y el caudal. Si el lecho y las bancas de un canal son igualmente suaves y regulares y la pendiente del fondo es uniforme, entonces el valor de  $n$  permanece constante para el cálculo de flujo. Esto ocurre principalmente en los canales artificiales. Cuando hay planicies de inundación “ $n$ ” depende de la cubierta vegetal

- Cambio estacional: esto se toma en cuenta cuando en el canal hay un crecimiento estacional de plantas acuáticas, hierbas, maleza, etc. El valor de “ $n$ ” puede aumentar en estación de crecimiento, y disminuir en la estación inactiva. Además este cambio puede afectar otros factores ya antes mencionado.

- Material en suspensión y carga del lecho: el material en suspensión y la carga del lecho, ya sea en movimiento o no, consumirá energía y causara una pérdida de altura e incrementara la rugosidad aparente del canal.

### **2.2.10 Diseño de canales con flujo uniforme.**

“La mayor parte de los canales artificiales revestidos y construidos pueden resistir la erosión de manera satisfactoria y por consiguiente se consideran canales no erosionables”.(p.155). (op. Cit., p.33).

En el diseño de canales no erosionables, factores como la velocidad permisible máxima y la fuerza atractiva permisible no son parte del criterio que debe ser considerado. Es por ello que no será tomado en cuenta en el presente trabajo de grado.

#### **2.2.10.1 Materiales y revestimientos no erosionables.**

Los materiales no erosionables para formar el revestimiento de un canal, ya sea este fijo o desarmable, incluyen concreto, mampostería, acero, hierro fundido, madera, vidrio, y plástico entre otros. Más que todo, la selección del material dependerá la disponibilidad de este material, su costo, el método de construcción del canal y el propósito de este.

#### **2.2.10.2 Velocidad mínima permisible.**

Esta es la menor velocidad que no permite el inicio de sedimentos y que impide el crecimiento de musgo o de plantas acuáticas. Este valor es no es encontrado con facilidad, además de ser un valor incierto. Para aguas que no tengan limos o para flujos previamente decantados, este factor es prácticamente despreciable, excepto por su efecto en el crecimiento de plantas.

#### **2.2.10.3 Pendientes de canal.**

La pendiente longitudinal del fondo de un canal está dada por la topografía o por la altura de energía requerida para el flujo de agua. La pendiente también depende en muchos casos del propósito del canal. Si por ejemplo los Canales para presas hidroeléctricas requiere un alto nivel en el

punto de entrega, entonces para este caso es recomendable una pendiente pequeña, para mantener en el mínimo posible las pérdidas en elevación. Las pendientes laterales dependen principalmente de la clase de material.

#### **2.2.10.4 Borde libre.**

El borde libre de un canal es la distancia vertical desde la parte superior del canal hasta la superficie de agua en la condición de diseño. Esta distancia debe de ser lo suficientemente grande para prevenir que ondas o fluctuaciones en la superficie del agua causen rebose por encima de los bordes. (op. Cit., p.33).

#### **2.2.10.5 Sección hidráulica óptima.**

La conductividad de una sección de canal se incrementa con el aumento en el radio hidráulico con la disminución en el perímetro mojado. Desde el punto de vista hidráulico, la sección de canal que tenga el menor perímetro mojado para un área determinada tiene la máxima conductividad, esta sección se le conoce como sección hidráulica óptima. Dentro de todas las secciones hidráulicas, la que tiene el menor perímetro mojado para un área determinada es el semicírculo, por lo cual es la sección hidráulica más eficiente. Los elementos geométricos para seis secciones hidráulicas óptimas se muestran en la tabla 2, estas secciones no siempre son prácticas, debido a dificultades de construcción y en el uso de material. Una sección de canal debe diseñarse para cumplir con una eficiencia hidráulica optima, pero debe modificarse para tener en cuenta aspectos constructivos. Desde un punto de vista práctico, nótese que la sección hidráulica óptima es la sección que da el área mínima para un caudal determinado pero no necesariamente la mínima excavación. La sección con mínima excavación ocurre solo si el nivel del agua llega hasta el tope de las bancas. En los casos en los que la superficie

del agua se encuentre por debajo del tope de las bancas, como ocurre a menudo, los canales más angostos que aquellos con la sección hidráulica óptima darán una excavación mínima. (op. Cit., p.33).

Sección transversal	Área $A$	Perímetro mojado $P$	Radio hidráulico $R$	Ancho superficial $T$	Profundidad hidráulica $D$	Factor de sección $Z$
Trapezio, medio hexágono	$\sqrt{3} y^2$	$2 \sqrt{3} y$	$\frac{1}{2} y$	$\frac{4}{3} \sqrt{3} y$	$\frac{3}{4} y$	$\frac{3}{2} y^{2.5}$
Rectángulo, medio cuadrado	$2y^2$	$4y$	$\frac{1}{2} y$	$2y$	$y$	$2y^{2.5}$
Triángulo, medio cuadrado	$y^2$	$2 \sqrt{2} y$	$\frac{1}{4} \sqrt{2} y$	$2y$	$\frac{1}{2} y$	$\frac{\sqrt{2}}{2} y^{2.5}$
Semicírculo	$\frac{\pi}{2} y^2$	$\pi y$	$\frac{1}{2} y$	$2y$	$\frac{\pi}{4} y$	$\frac{\pi}{4} y^{2.5}$
Parábola $T = 2 \sqrt{2} y$	$\frac{4}{3} \sqrt{2} y^2$	$\frac{8}{3} \sqrt{2} y$	$\frac{1}{2} y$	$2 \sqrt{2} y$	$\frac{2}{3} y$	$\frac{8}{9} \sqrt{3} y^{2.5}$
Catenaria hidrostática	$1.39586y^2$	$2.9836y$	$0.46784y$	$1.917532y$	$0.72795y$	$1.19093y^{2.5}$

Tabla 3. Secciones hidráulicas óptimas. Fuente: Chow (2004)

## 2.2.11 Flujo gradualmente variado

### 2.2.11.1 Suposiciones básicas.

El flujo gradualmente variado es un flujo permanente cuya profundidad varía de manera gradual a lo largo de la longitud del canal, para esta definición se establecen dos condiciones:

1. Que el flujo sea permanente; es decir, las características hidráulicas de flujo permanecen constantes para el intervalo del tiempo bajo consideración.
2. Las líneas de corrientes son paralelas; es decir, prevalece la distribución hidrostática de presiones sobre la sección del canal.

El desarrollo de la teoría del flujo gradualmente variado se remonta al siglo XVIII.

Fueron los primeros ingenieros hidráulicos los que contribuyeron a este desarrollo y todas las teorías que se aportaron giran alrededor de las siguientes suposiciones:

- A. la pérdida de altura en una sección es la misma que para un flujo uniforme que tiene la velocidad y el radio hidráulico de la sección. De acuerdo con esta suposición, la ecuación de flujo uniforme puede utilizarse para evaluar la pendiente de energía de un flujo gradualmente variado en una sección de canal determinada, y el correspondiente coeficiente de rugosidad desarrollado en principio para flujo uniforme se aplica al flujo variado. Esta suposición nunca ha sido confirmada de manera precisa por experimentos<sup>43</sup> o por teoría, pero los errores que surgen de ella se creen que son pequeños comparados con aquellos en los cuales se incurre comúnmente durante el uso de una ecuación de flujo uniforme y en la selección del coeficiente de la rugosidad. Con el paso de los años esta suposición ha demostrado ser una base confiable para el diseño. Esta suposición es más aplicada para flujos variados donde la velocidad aumenta que para los flujos variados en los que la velocidad disminuye, debido a que en un flujo con velocidad que se incrementa la pérdida de altura es causada casi en su totalidad por efectos friccionales, en tanto que los flujos con velocidades decrecientes pueden existir pérdidas por remolinos de gran escala
  
- B. Si la pendiente del canal es baja; esto significa que: 1. La profundidad de flujo es la misma sin importar si se utiliza la dirección vertical o normal(al fondo del canal). 2. El factor de corrección de presiones

$\cos\theta$  (que es aplicado a la profundidad de la sección de flujo, ecuación  $h = d \cos\theta$ ) es igual a la unidad. 3. No ocurre atrapamiento de aire. En caso de que exista un notable atrapamiento de aire, los cálculos deben llevarse a cabo, suponiendo que no existe atrapamiento y luego corregirse utilizando la ecuación de Douma

$$u = 10 \frac{\overline{0.2V^2}}{gR} - 1$$

- C. El canal es prismático; es decir el canal tiene alineamiento y forma constantes.
- D. La distribución de velocidad en la sección de canal es fija, luego los coeficientes de distribución de velocidades son constantes.
- E. La conductividad  $k$  y el factor de sección  $z$  son funciones exponenciales de la profundidad del flujo.
- F. El coeficiente de rugosidad es independiente de la profundidad de flujo y constante a través del tramo del canal bajo consideración.

### 2.2.11.2 Ecuación dinámica de flujo gradualmente variado

Para el análisis de la ecuación del flujo gradualmente variado, hemos de considerar el perfil de la figura 2.2.11.2 donde la altura total de energía por encima del nivel de referencia en la sección I aguas arriba es:

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

Donde

H: es la altura total de energía en pies

$z$ : es la distancia vertical del fondo del canal por encima del nivel de referencia en pies

$d$ : es la profundidad de la sección de flujo en pies

$\theta$ : es el ángulo de la pendiente del fondo

$\alpha$ : es el coeficiente de energía  $V$ : es la velocidad media del flujo a través de la sección en pies/s.

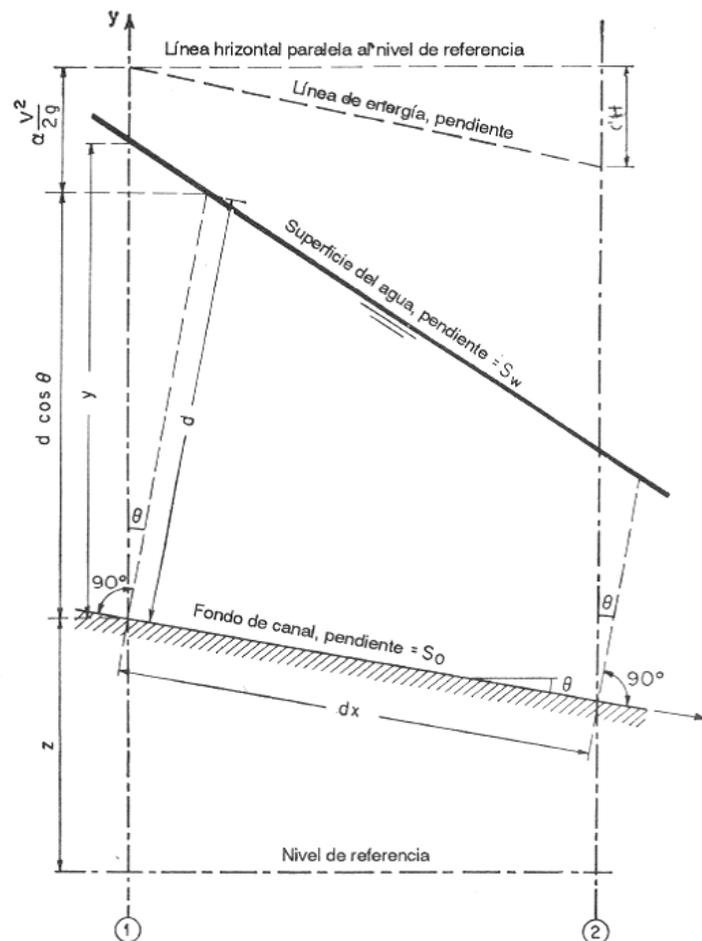


Figura 23. Deducción de la ecuación de flujo gradualmente variado.

Se supone que  $\theta$  y  $\alpha$  son constantes a través del tramo del canal bajo consideración. Al tomar el fondo del canal como el eje  $x$  y al derivar la ecuación con respecto a la longitud  $x$  del perfil de la superficie del agua, el cual se mide a lo largo del eje  $x$ , y se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \cos\theta \frac{dd}{dx} + \alpha \frac{d}{dx} \frac{V^2}{2g}$$

Nótese que la pendiente se define como el seno del ángulo de la pendiente y se supone que es positivo si desciende en la dirección del flujo y negativa si asciende. Por consiguiente en la figura 3945, la pendiente de energía es  $S_f = dH/dx$  y la pendiente del fondo del canal es

$S_o = \sin\theta = - dz/dx$ . Al sustituir estas pendientes en la ecuación anterior y resolviendo para  $dd/dx$

$$\frac{dd}{dx} = \frac{S_o - S_f}{\cos\theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \frac{d}{dd}}$$

Esta es la ecuación diferencial general para el flujo gradualmente variado, conocida de aquí en adelante como la ecuación dinámica de flujo gradualmente variado, o simplemente como la ecuación de flujo gradualmente variado. Esta ecuación representa la pendiente de la superficie con respecto al fondo del canal.

La profundidad  $d$  se mide desde el fondo del canal, y el fondo del canal se toma como eje  $x$ . luego la pendiente de la superficie del agua es igual a la pendiente  $S_o$  del fondo del canal si  $dd/dx = 0$ , menor que  $S_o$  si  $dd/dx$  es positiva, y mayor que  $S_o$  si  $dd/dx$  es negativa. En otras palabras, la superficie del agua es paralela al fondo del canal cuando  $dd/dx=0$ , aumenta cuando  $dd/dx$  es positivo y disminuye cuando  $dd/dx$  es negativo.

La ecuación diferencial también puede ser representada en muchas otras formas, haciendo diferentes sustituciones de sus términos, pero por el momento nos es más útil de comprender de esta forma.

### 2.2.11.3 Característica y clasificación de los perfiles de flujo.

La ecuación dinámica de flujo gradualmente variado, expresa la pendiente de la superficie longitudinal del flujo con respecto al fondo del canal. Por consiguiente puede utilizarse para escribir características de varios perfiles de flujo o perfiles de la superficie de agua de flujo. Para propósitos de simplicidad se considera el canal como prismático y se utiliza la siguiente ecuación para su respectivo análisis.

$$\frac{dy}{dx} = S_0 \frac{1 - \frac{Kn}{K} \frac{K}{Z^2}}{Zc/Z^2}$$

Los valores de K y Z en esta ecuación se incrementan o se disminuyen continuamente con la profundidad “y”. Esto es cierto para todas las secciones de canales abiertos con excepción de conductos con claves que cierran gradualmente. El perfil del flujo representa la curva de la superficie del flujo. Representará una curva de remanso si la profundidad de flujo se incrementa en la dirección del flujo. Se puede ver que el perfil de flujo es una curva de remanso si  $dy/dx$  es positiva y una curva de caída si  $dy/dx$  es negativa

Para una curva de remanso,  $dy/dx$  es positivo. Luego La ecuación dinámica de flujo gradualmente variado da dos casos posibles:

1.  $1 - (Kn/K)^2 > 0$  y  $1 - (Zc/Z)^2 > 0$
2.  $1 - (Kn/K)^2 < 0$  y  $1 - (Zc/Z)^2 < 0$

Como los valores de “K” y “Z” se incrementan o disminuyen continuamente con la profundidad “y”, el primer caso indica que  $y > y_n$  y  $y > y_c$ . Como  $y > y_c$  entonces el flujo deberá ser subcrítico. Si  $y > y_n > y_c$ , el flujo

subcrítico debe ocurrir en un canal suave, es decir en un canal con pendiente subcrítico. El segundo caso indica que  $y_c > y_n > y$  y ocurrirá en un canal empinado si  $y_c > y_n > y$ . Para una curva de caída,  $dy/dx$  es negativo y la ecuación dinámica de flujo gradualmente variado nos da dos casos posibles:

1.  $1 - (K_n/K)^2 < 0$  y  $1 - (Z_c/Z)^2 < 0$
2.  $1 - (K_n/K)^2 > 0$  y  $1 - (Z_c/Z)^2 > 0$

- El primer caso indica que  $y_c > y > y_n$ , por consiguiente el flujo es supercrítico en un canal empinado.
- El segundo caso indica que  $y_n > y > y_c$ , dando como resultado un flujo supercrítico en un canal suave.
- Cuando la superficie del agua es paralela al fondo del canal  $dy/dx = 0$ , lo cual indica un flujo uniforme. El flujo es uniforme crítico cuando  $y = y_n = y_c$ ; uniforme crítico si  $y = y_n > y_c$  y uniforme supercrítico si  $y_c > y_n = y$ . Para aspectos de análisis, la pendiente del canal puede clasificarse como: pendiente favorable y pendiente no favorable
- Una pendiente favorable es una pendiente del canal que cae en dirección del flujo, una pendiente favorable es siempre positiva, y esta puede ser crítica, suave (subcrítica) o inclinada (supercrítica).
- Una pendiente no favorable puede ser horizontal o adversa.
  - Una pendiente horizontal es una pendiente cero o  $S_0 = 0$ .
  - Una pendiente adversa es una pendiente negativa que aumenta en dirección del flujo. Lo anterior se resume en la tabla. 3 y figura 24

Pendiente del canal	Designación			Relación de $y$ con $y_n$ y $y_c$			Tipo general de curva	Tipo de flujo
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3		
Horizontal $S_0 = 0$	Ninguno			$y > y_n > y_c$			Ninguno	Ninguno
		H2		$y_n > y > y_c$			Caída	Subcrítico
			H3	$y_n > y_c > y$			Remanso	Supercrítico
Suave $0 < S_0 < S_c$	M1			$y > y_n > y_c$			Remanso	Subcrítico
		M2		$y_n > y > y_c$			Caída	Subcrítico
			M3	$y_n > y_c > y$			Remanso	Supercrítico
Crítica $S_0 = S_c > 0$	C1			$y > y_c = y_n$			Remanso	Subcrítico
		C2		$y_c = y = y_n$			Paralelo al fondo del canal	Uniforme-crítico
			C3	$y_c = y_n > y$			Remanso	Supercrítico
Empinada $S_0 > S_c > 0$	S1			$y > y_c > y_n$			Remanso	Subcrítico
		S2		$y_c > y > y_n$			Caída	Supercrítico
			S3	$y_c > y_n > y$			Remanso	Supercrítico
Adversa $S_0 < 0$	Ninguno			$y > (y_n)^* > y_c$			Ninguno	Ninguno
		A2		$(y_n)^* > y > y_c$			Caída	Subcrítico
			A3	$(y_n)^* > y_c > y$			Remanso	Supercrítico

Tabla 4. Tipos de perfiles de flujo en canales prismáticos. Fuente: Chow (2004)

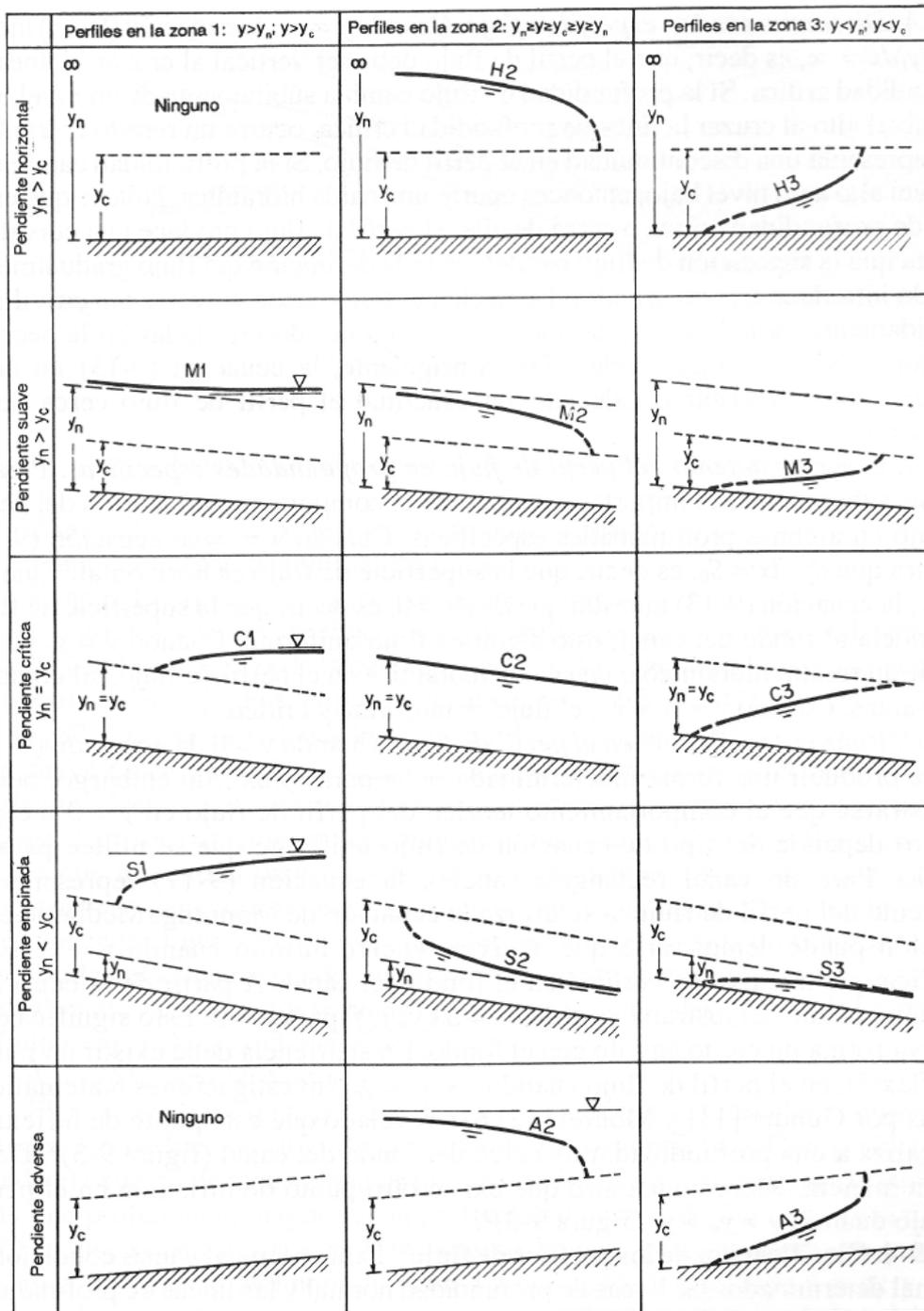


Figura 24. Clasificación de los perfiles de flujo en flujo gradualmente variado.  
Fuente: Chow (2004)

Algunos aspectos más importantes de los perfiles de flujo teórico son los siguientes:

A. Discontinuidad en el perfil de flujo. Si la profundidad de flujo cambia súbitamente de un nivel bajo a un nivel alto al cruzar la línea de profundidad crítica, ocurrirá un resalto hidráulico que presenta una discontinuidad en el perfil del flujo. Si la profundidad cambia de un nivel alto a un nivel bajo, ocurrirá una caída hidráulica, entonces cerca de la línea de profundidad crítica o en ella, el perfil de flujo produce una curvatura tan alta que no aplica la suposición de flujo paralelo para la definición de flujo gradualmente variado ya que arroja resultados con grandes errores que no son para nada aceptables. Tampoco sería bueno en estas condiciones aplicar la ecuación dinámica de flujo gradualmente variado.

B. Comportamiento del perfil de flujo en profundidades específicas. Es importante conocer el comportamiento teórico del perfil en algunas profundidades específicas. Cuando la superficie de flujo es horizontal, es decir que la superficie de flujo es paralela al fondo del canal, es porque hay flujo uniforme. Pero cuando  $y = y_c$  puede ocurrir un resalto hidráulico o caída hidráulica en el perfil de flujo.

C. Puntos de inflexión en el perfil del flujo. Cuando se forman líneas de curvaturas en los canales, estas curvaturas forman cierto ángulo con el fondo del canal, entonces se supone que debe de existir un punto de inflexión en el perfil de flujo cuando  $y < y_c < y_n$ . Según investigaciones matemáticas se revelo que este punto de inflexión se localiza a una profundidad muy cerca del fondo del canal.

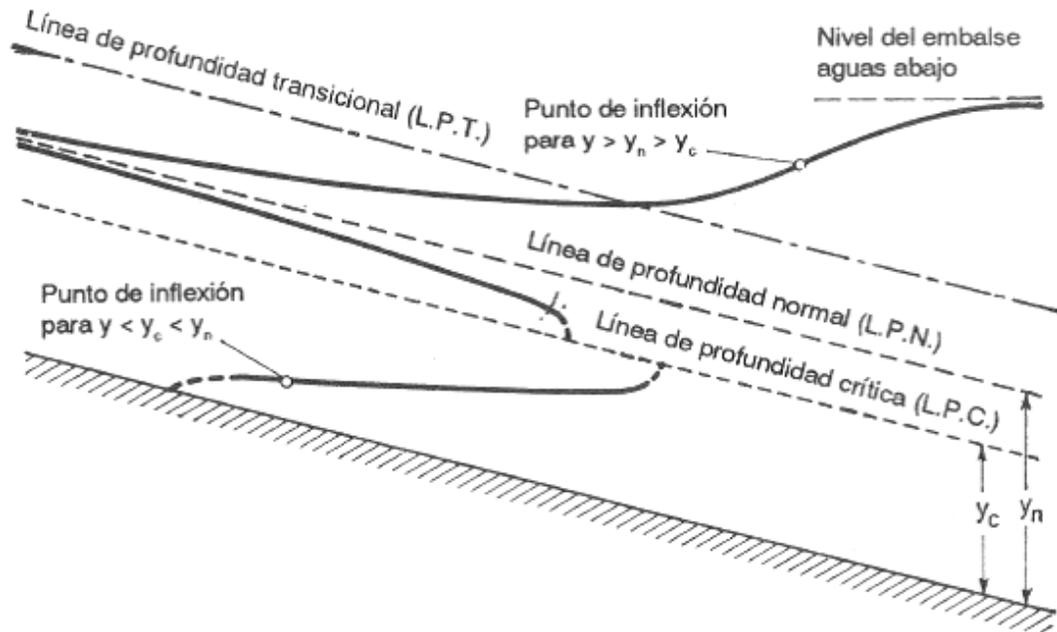


Figura 25. Puntos teóricos de inflexión en perfiles de flujo. Fuente: Chow (2004)

#### 2.2.11.4 Clasificación de los perfiles de flujo.

Para un caudal y unas condiciones de canal determinados las líneas de profundidad normal y las líneas de profundidad crítica dividen el espacio de un canal en tres zonas:

- Zona 1. El espacio por encima de la línea superior.
- Zona 2. El espacio entre las dos líneas.
- Zona 3. El espacio por debajo de la línea inferior.

Los perfiles de flujo se pueden clasificar en trece tipos diferentes de acuerdo con la naturaleza de la pendiente del canal y la zona en la cual se encuentra la superficie del flujo

Estos tipos se designan como H2,H3;M1,M2,M3;C1,C2,C3;S1,S2,S3; y A2,A3; donde la letra describe a la pendiente: H para horizontal, M para suave(subcritica), C para critica, S para empinada(Supercritica), y A para pendiente adversa; 76 el número indica la zona. De los trece perfiles doce son para flujo gradualmente variado, y uno, C2, es para flujo uniforme.

A continuación se mencionan varios perfiles de flujo:

- El perfil M1 representa la curva de remanso más conocida y es el más importante de todos los perfiles de flujo, en lo que se refiere a practicidad. Este perfil ocurre cuando el extremo de aguas abajo de un canal suave largo se sumerge en un embalse de mayor profundidad que la normal de flujo en el canal. Esto se puede ver en casos comunes como el perfil por detrás de una presa en un río natural (figura 26- a) y el perfil de un canal que une a dos embalses (figura 26- b).

- Un perfil M2 ocurre cuando el fondo del canal en el extremo de aguas abajo se sumerge en un embalse con una profundidad menor que la normal. Es decir que si la cantidad de sumergencia en el extremo de aguas abajo es menor que la profundidad critica, el perfil terminara abruptamente, esto implica la formación de una caída hidráulica, y si la profundidad de sumergencia en el extremo de aguas abajo es mayor que la profundidad critica, entonces se formara tanto perfil como agua haya por encima de la superficie del embalse. Son ejemplos el perfil en el lado aguas arriba de un ensanchamiento abrupto en la sección transversal de un canal (26-c y 26-d).

- El perfil M3 empieza desde el fondo del canal aguas arriba, con ángulo de pendiente vertical o con ángulo agudo, dependiendo del tipo de ecuación de flujo uniforme que se utilice, y termina con un resalto hidráulico en el extremo de aguas abajo. Generalmente ocurre cuando un flujo supercrítico entra en un canal suave. Esto también depende de la velocidad inicial del agua entrante, ya que a mayor velocidad, más distante aguas abajo empezara el perfil. Son ejemplos el perfil de una corriente por debajo de una compuerta deslizante (figura 26-e) y el perfil después de un cambio en la pendiente del fondo del canal más suave (figura 26-f)

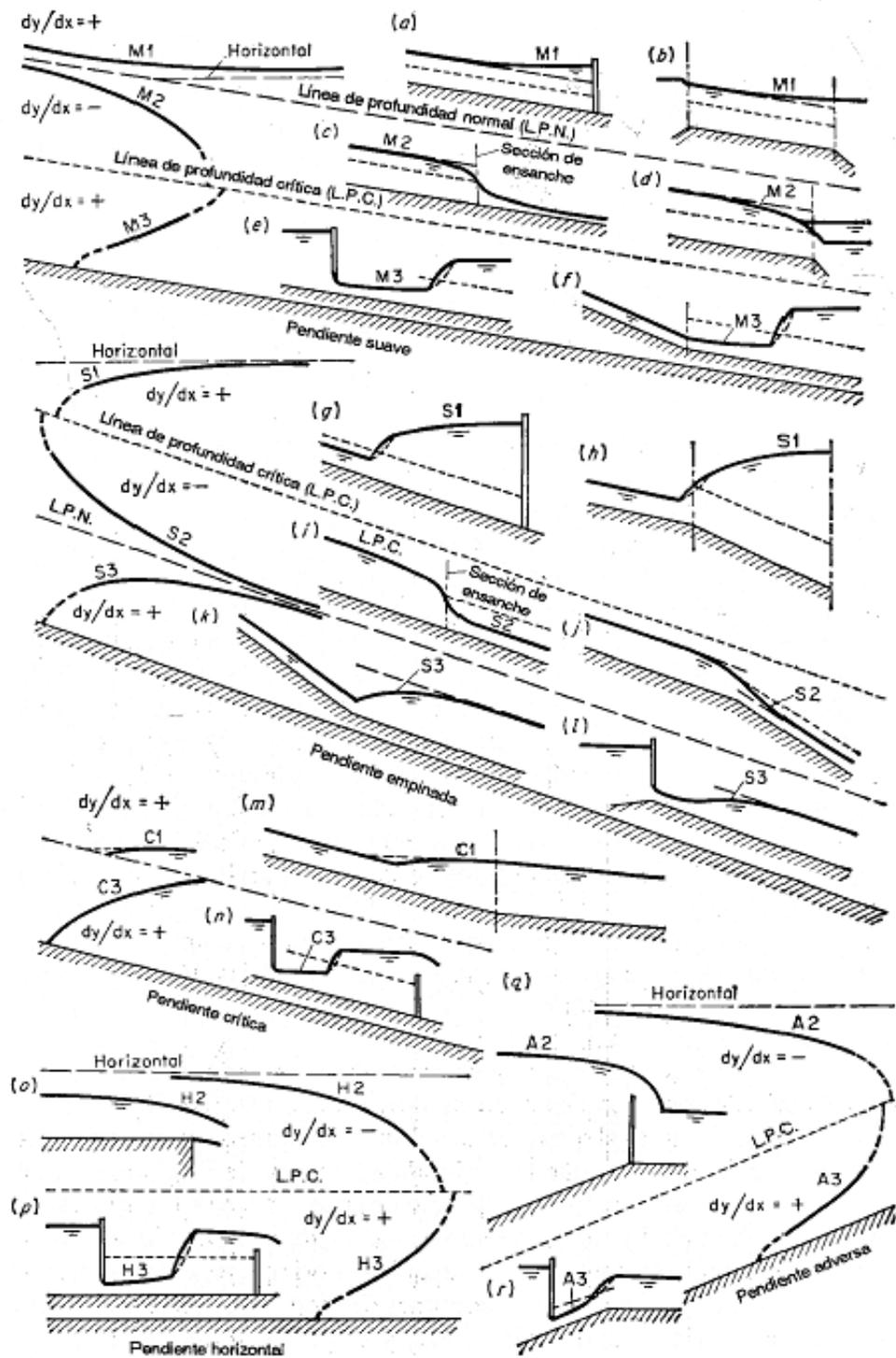


Figura 26. Ejemplo de tipos de perfiles de flujo. Fuente: Chow (2004).

A. Perfil tipo  $S_o > S_c$  y  $y_n < y_c$

- El perfil S1 empieza con un resalto en el extremo aguas arriba y se vuelve tangente a la horizontal en el extremo de aguas abajo. Son ejemplos los perfiles de flujo por detrás de una presa en un canal inclinado (figura 26-g) y un canal inclinado llegando a un embalse con alta elevación (figura 26-h).

- El perfil S2 es una curva de caída. A menudo es muy corto y semeja una transición entre una caída hidráulica y un flujo uniforme, esto debido a que empieza aguas arriba con una pendiente vertical en la profundidad crítica y es tangente a la línea de profundidad normal en el extremo de aguas abajo; ejemplos son los perfiles formados en el lado aguas debajo de un ensanchamiento de un canal (figura 26-i) y en el lado empinado de un canal que cambia su pendiente de empinada a más empinada (figura 26-j).

- El perfil S3 es también de tipo transicional, y está conformado entre un flujo supercrítico entrante y la línea de profundidad normal a la cual el perfil es tangente. Son ejemplos de perfiles que cambian de pendientes empinadas a menos empinadas (figura 26-k) y debajo de una compuerta con profundidad de flujo entrante menor que la profundidad normal en un canal de pendiente empinada (figura 26-l)

B. Perfiles tipo C.  $S_o = S_c$  y  $y_n = y_c$

Estos perfiles representan las condiciones de transición entre los perfiles M y S. suponiendo un canal rectangular ancho, los perfiles C1 y C3 son curvos y el perfil C1 es asintótico a una línea horizontal. Cuando se utiliza la ecuación de Chezy, se muestra que los dos perfiles son también líneas horizontales.

C. Perfiles tipo H.  $S_o = 0$  y  $y_n = \infty$

Estos son los casos limitantes de perfiles M cuando el fondo del canal se vuelve horizontal. Los perfiles H2 y H3 corresponden a los perfiles M2 y M3, pero un perfil H1 no se puede establecerse en realidad, ya que  $yn$  es infinito, para el caso. Ejemplos son los perfiles mostrados en la figura 26-o y 26-p.

#### D. Perfiles tipo A. $S_o < 0$

- El perfil A1 es imposible debido a que el valor de  $yn$  no es real. Los perfiles A2 y A3 son similares a los perfiles H2 y H3, respectivamente y se muestran en la figura 26-q y 26-r.

### **2.2.12 Medición de flujos en canales.**

#### **2.2.12.1 Objetivo de los vertederos.**

“Un vertedero es un dique o pared que intercepta la corriente, causando una elevación de nivel aguas arriba, y que se emplea para control de nivel o para medir caudales”. (p.291). (op. Cit., p.38). Son dos, las aplicaciones de los vertederos una control de nivel, por ejemplo, de un embalse como vertederos de presas; y otra medición de caudales como los vertederos de medidas.

#### **2.2.12.2 Tipos de vertederos.**

“Existen diferentes tipos de vertederos y se pueden clasificar por el tipo de cresta, por los niveles de agua abajo, por su forma, por las condiciones laterales, por su inclinación con respecto a la corriente y por otras circunstancias.”(p.455). (*Ibíd*em)

### 2.2.12.2.1 Clasificación de los vertederos por el tipo de cresta.

Por el tipo de cresta se distinguen dos tipos: vertederos de pared delgada y vertederos de pared gruesa. La diferencia está en el tipo de contacto entre la napa vertiente y el paramento.

“En los vertederos de pared delgada el contacto entre el agua y la cresta es solo una línea, es decir, una arista. En cambio en los vertederos de pared gruesa el contacto es un plano. El flujo se adhiere a la cresta.” (p.460). (op. Cit., p.38).

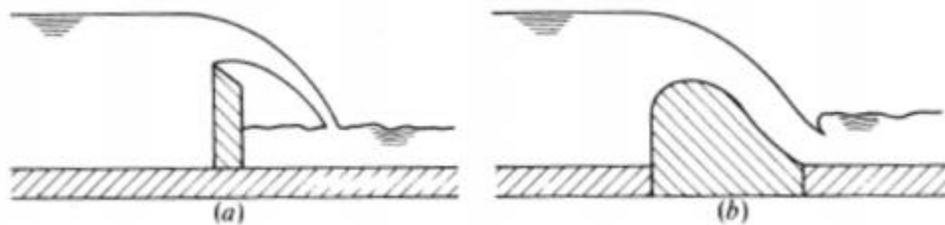


Figura 27. Vertederos de pared delgada (a) y vertedero de pared gruesa (b). Fuente: Rocha (2007).

### 2.2.12.2.2 Clasificación de los vertederos por los niveles de agua abajo.

En el vertedero libre, el nivel de aguas abajo es inferior a la cresta. En vertederos sumergidos o incompletos se caracteriza porque el nivel de aguas abajo es superior al de la cresta.

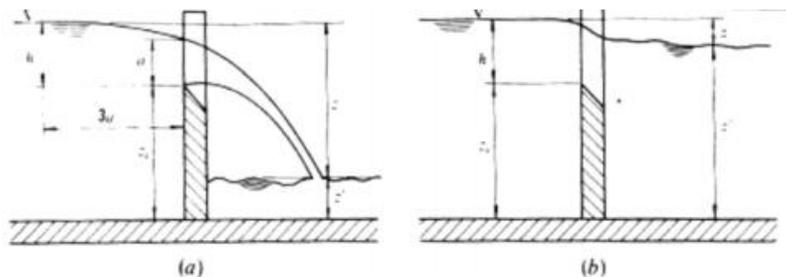


Figura 28. Vertedero libre (a) y vertedero sumergido (b). Fuente: Rocha (2007).

### 2.2.12.2.3 Clasificación por las condiciones laterales de descarga.

Pueden ser con contracciones laterales o sin ellas.

Los vertederos con contracciones laterales son aquellos que la longitud  $L$  del vertedero es menor que el ancho  $B$  del canal de aproximación. Para que se produzca contracciones laterales completas es necesario que la distancia entre cada extremo del vertedero y la pared del canal sea por lo menos de  $3H$ . Es recomendable también que la altura  $P$  del umbral sea por lo menos igual a  $3H$ . Naturalmente que sí  $B = L$  es un vertedero sin contracciones laterales. (op. Cit., p.38).

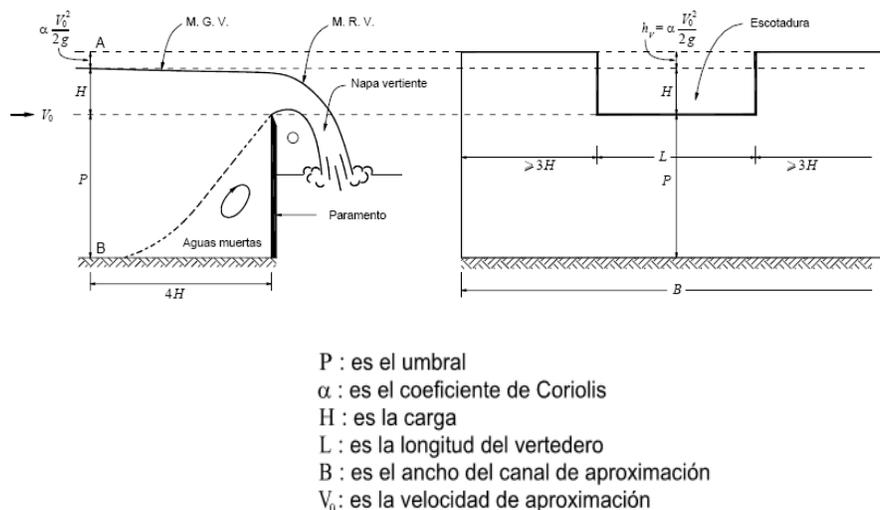


Figura 29. Clasificación por las condiciones laterales de descarga. Fuente: Rocha (2007).

### 2.2.12.2.4 Clasificación de los vertederos según su forma.

“Según su forma hay diferentes tipos de vertederos: rectangulares, triangulares, trapeciales, circulares, parabólicos, poligonales y muchas otras posibilidades geométricas”. (p.462). (Ibídem)

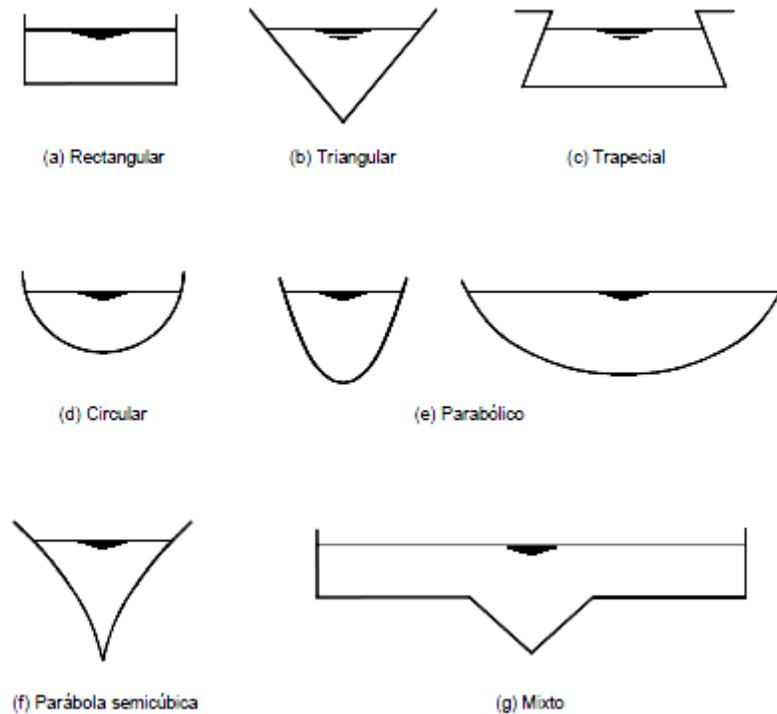


Figura 30. Vertederos según su forma. Fuente: Rocha (2007)

#### 2.2.12.2.5 Clasificación de los vertederos por la inclinación del paramento.

“El paramento de los vertederos suele ser vertical, pero puede estar inclinado hacia aguas arriba o hacia aguas abajo. El vertedero hacia aguas abajo disminuye la contracción”. (op. Cit., p.38).

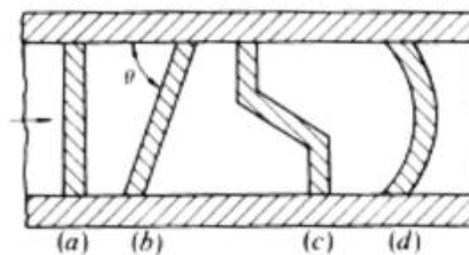


Figura 31. Vertederos con inclinación con respecto a la corriente. (a) vertedero normal. (b) inclinado, (c) quebrado, (d) curvilíneo. Fuente: Rocha (2007)

### 2.2.12.2.6 Vertederos según su geometría.

Los vertederos de pared delgada son los más utilizados para la medición de caudales, ya que se pueden construir diversas formas. Para considerar un vertedero como de pared delgada se debe cumplir que el espesor de la pared no debe ser mayor de  $2H/3$  esto se puede observar en Figura 32 y 33.

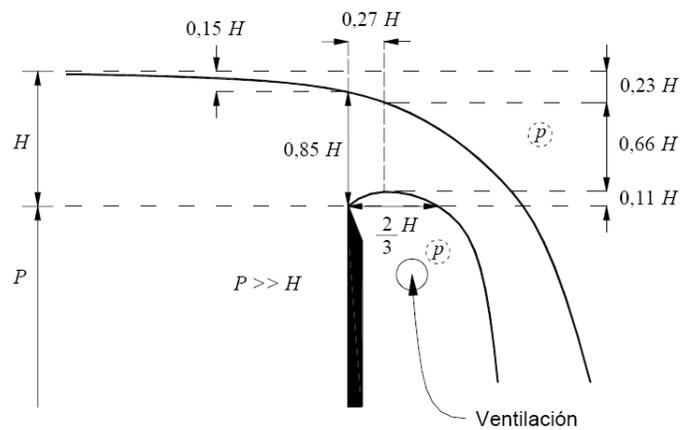


Figura 32. Vertedero de pared delgada. Fuente: Rocha (2007)

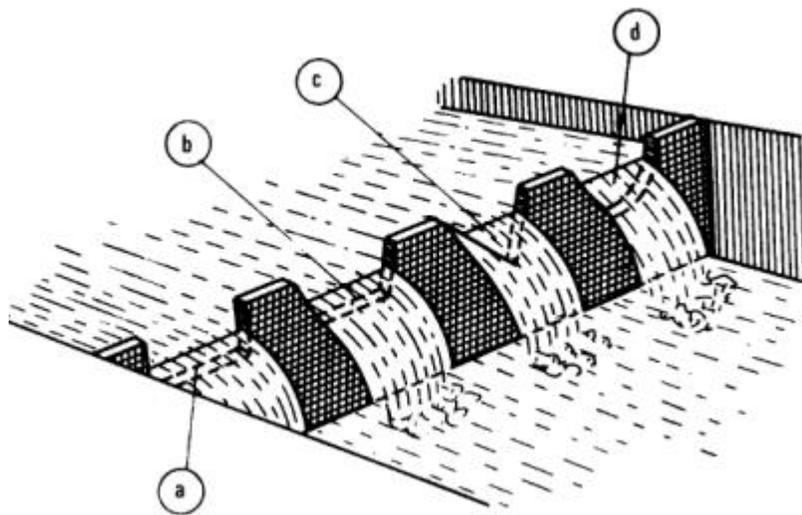


Figura 33. Perfiles de rebose de vertederos. Fuente: Rocha (2007)

De la figura anterior se pueden notar las siguientes formas de vertederos

- a: Vertedero rectangular
- b: Vertedero trapecial
- c: Vertedero triangular
- d: Vertedero circular

### A.) Vertederos rectangulares.

Formula teórica de descarga. Se plantea la deducción de la formula general de descarga de un vertedero rectangular. Considere un estanque en donde una de sus paredes tiene un orificio rectangular de ancho  $L$  y cuyo espesor es un diferencial de altura  $dy$  por donde fluye un caudal y por el principio de continuidad se puede expresar matemáticamente. La variación de caudal es igual a la variación de la altura multiplicada por el área del orificio que es una constante como se puede apreciar en la figura 34.

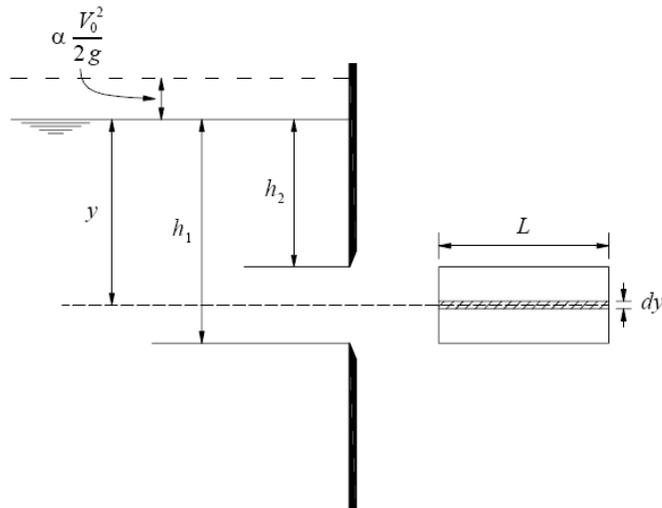


Figura 34. Esquema para la reducción de la formula de descarga en un vertedero rectangular. Fuente: Rocha (2007).

1. Esquema para la reducción de la fórmula de descarga en un vertedero rectangular.

Tome en cuenta que esta fórmula es teórica por tanto solo se consideran la matemática y no los aspectos físicos, como la fricción y las contracciones verticales de la napa.

$$dQ = VdA = VLdY$$

Donde V: Es la velocidad y se expresa de la siguiente manera

$$V = \sqrt{2g \left( Y + a \frac{V_0^2}{2g} \right)}$$

Al resolver para el caudal se obtiene la expresión siguiente.

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left( H + a \frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} - a \frac{V_0^2}{2g} \left( H + a \frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} L$$

Recuérdese que esta es una solución matemática donde no se consideraron condiciones físicas como la fricción y la contracción de la napa por tanto es preciso incorporar un término donde se refleje de alguna medida este efecto, es por eso que se considera un término adicional para establecer un caudal real.

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \left( H + a \frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} - a \frac{V_0^2}{2g} \left( H + a \frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} Lc$$

Donde este valor de C se le conoce como coeficiente de descarga y se determina experimentalmente. Este coeficiente depende de diversos factores tales como carga H, naturaleza de los bordes, propiedades del fluido. También se debe tomar en cuenta referencias que ayuden a resolver esta ecuación de forma sencilla pues como ya se pudo apreciar la solución de esta ecuación requiere de un proceso de iteraciones ya que el valor de C se puede determinar de muchas maneras, pero se considera que la sección transversal del canal es decir B mayor que 8HL entonces se puede decir que

$V_0 = 0$  En estas condiciones la ecuación para el caudal real se vuelve una expresión sencilla.

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} (LC(H)^{3/2})$$

- a) Formula de Francis James B Francis hizo investigaciones entre los años 1848 y 1852 en vertederos rectangulares sus investigaciones se desarrollaron con los siguientes parámetros longitud del vertedero 10 Ft (3.5 m).

Carga H estuvo en un rango de (0.18m - 0.50 m), altura de lumbral de (0.60m – 1.50m) y una relación de:

$L/H = 3$  esta fórmula considera la posibilidad de contracción y la velocidad de aproximación ( $V_0$ )

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} 0.622 \left( L - \frac{nH}{10} \right) \left( H + a \frac{V_0}{2g} \right)^{3/2} - a \frac{V_0}{2g} \left( \frac{3}{2} \right)$$

Expresando para el sistema internacional y considerando los efectos de la contracción la ecuación para el caudal real es:

$$Q = 1.84 \left( L - \frac{nH}{10} \right) \left( H + a \frac{V_0}{2g} \right)^{3/2} - a \frac{V_0}{2g} \left( \frac{3}{2} \right)$$

Dónde:  $Q = m^3/s$

$L, H = m$

$V_0 = m/s$

$n$  = número de contracciones (0, 1, 2)

Es de tener cuidado con la relación siguiente, si  $L \leq 0.2 H$  diera como resultado un caudal cero o negativo.

Al considerar que la velocidad de aproximación es muy pequeña y no hay contracción lateral, la expresión se reduce.

$$\frac{2}{3} \sqrt{2g} 0.622 = 1.84$$

$$Q = 1.84 L H^3$$

b) Formula de Bazin ampliada por Hegly

Estas fórmulas son aplicables si se cumplen con las siguientes condiciones: carga comprendida entre 0.1m y 0.6m y longitud entre 0.5m y 2.0m, además que la altura del lumbral este comprendida entre 0.2m y 2.0m.

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2gLC} H^3$$

Para un vertedero con contracción lateral, el valor de C se expresa:

$$C = 0.60075 - 0.045 \frac{B-L}{B} + \frac{0.00405}{H} \left( 1 + 0.55 \frac{L}{B} \right)^2 \frac{H}{H+P}$$

Si el vertedero fuera sin contracciones entonces  $B=L$

$$C = 0.60075 + \frac{0.00405}{H} \left( 1 + \frac{H}{H+P} \right)^2$$

c) Formula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos

La fórmula fundamental es la misma, los cambios son el valor de C para cada investigador. En este caso el valor C se expresa para un vertedero con contracción:

$$C = 0.578 + 0.037 + \frac{L^2}{B} + \frac{3.615 - 3 \frac{L^2}{B}}{1000H + 1.6} \left( 1 + 0.5 \frac{L}{B} \frac{H}{H + P} \right)^2$$

Los límites de descarga para un vertedero con contracción son los que se plantean

$$\frac{0.025}{4B} < H \leq 0.80m$$

$$P = L \geq 0.30$$

$$\frac{H}{P} \leq 1$$

Sin contracción

$$C = 0.615 \left( 1 + \frac{1}{1000H + 1.6} \right) \left( 1 + 0.5 \frac{H}{H + P} \right)^2$$

Los límites de descarga para un vertedero sin contracción son los que se plantean

$$0.025 < H \leq 0.80m$$

$$P \geq 0.30m$$

$$\frac{H}{P} \leq 1$$

d) Formula de Kindsvater- Carter

Esta fórmula se aplica a los vertederos ya que es muy confiable, no importa que se considere contracción o no

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} (L + K_L) H + K_H \frac{3}{2}$$

Esta fórmula utiliza longitud efectiva que es el valor de  $L + K_L$ , este valor se encuentra a partir de la grafica en la figura 35, en tanto el valor de  $K_H = 0.001m$  y  $C_e$  es el coeficiente de descarga.

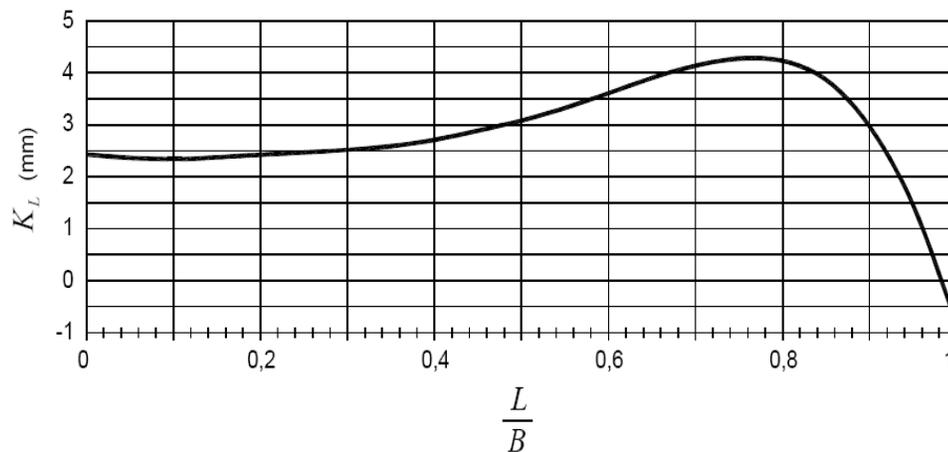


Figura 35. Longitud efectiva. Fuente: Rocha (2007).

Condiciones:

- La carga  $H$  debe medirse a una distancia 4 o 5 la carga máxima
- Vertedero únicamente de pared delgada, cuyo espesor debe ser de 1mm a 2mm
- El nivel de la superficie libre aguas abajo debe estar por lo menos 6 cm por debajo de la cresta del vertedero
- La carga debe ser superior a 3cm. El lumbral debe ser por lo menos de 10cm
- La longitud del vertedero y el ancho del canal deben ser superiores a 15cm

- $\frac{H}{P} = 2.5$
- Si  $B = L$  no existe contracción; pero si se debe cumplir  $B - L \geq 0.2mm$

El coeficiente de descarga se determina a partir de la grafica de la figura 36.

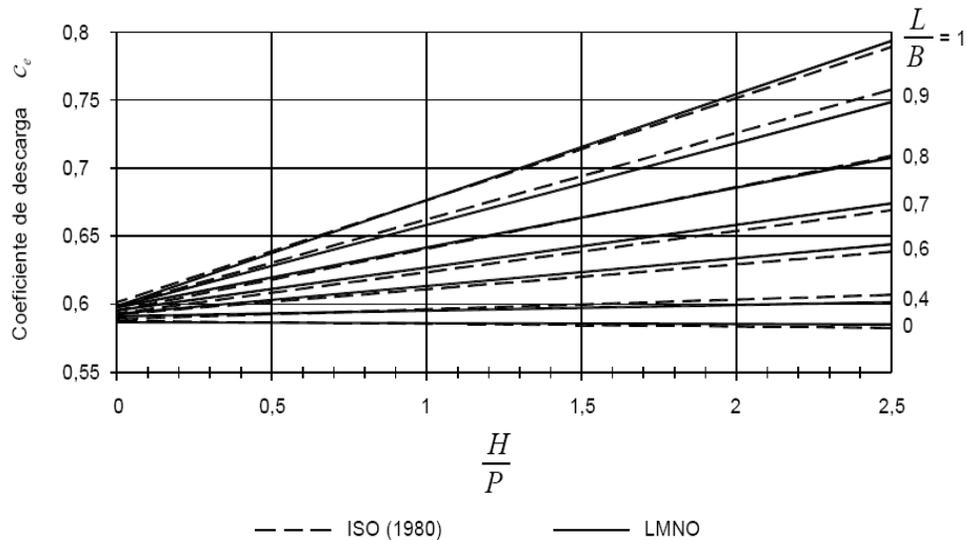


Figura 36. Grafica para determinar el coeficiente de descarga.

### B.) Vertedero triangular

Ya que se trata de un vertedero triangular es preciso establecer un elemento diferencial imaginario que cambia de dimensiones a medida, se desplaza por la altura del vertedero, esto se muestra en la figura.

Las consideraciones para establecer esta expresión matemática son las siguientes, el triángulo es simétrico y no se considera el efecto de contracción ni las pérdidas por fricción

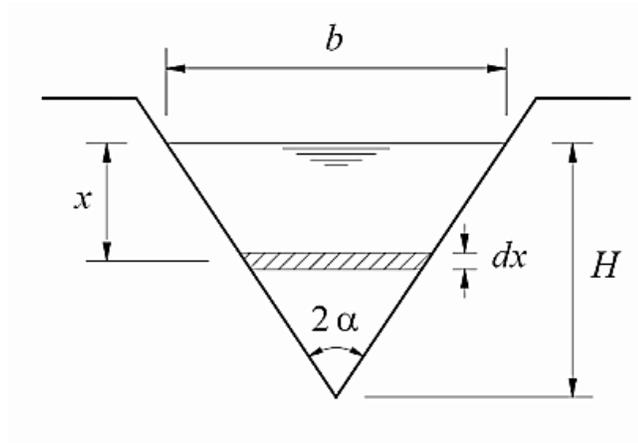


Figura 37. Análisis del vertedero triangular. Rocha (2007).

Longitud de la franja  $b \frac{H-x}{H}$

Área de franja es entonces  $b \frac{H-x}{H} dx$

Para establecer la expresión matemática de caudal para un vertedero triangular es necesario integrar la relación de área del triángulo diferencial, cuyos parámetros son  $V = 0$  y la variación de la altura es desde 0 hasta H, también es necesario establecer una relación para el ancho.  $b = 2H \tan \alpha$

La expresión teórica para el caudal se plantea de la manera siguiente:

$$Q = \frac{8}{15} \tan \alpha \sqrt{2g} H^{5/2}$$

La expresión para el caudal real se plantea de la manera siguiente.

$$Q = C \frac{8}{15} \tan \alpha \sqrt{2g} H^{5/2}$$

En el caso que los ángulos con respecto a la vertical no proporcionen simetría se puede considerar el promedio de ambos ángulos para facilitar el cálculo se muestra en la tabla 4 y tabla 5.

Angulo $2\alpha$	15°	30°	45°	60°	90°	120°
H>	0.25	0.21	0.19	0.17	0.14	0.12
m	0.34	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32
c	0.64	0.62	0.61	0.6	0.59	0.6
k	0.2	0.39	0.6	0.82	1.39	2.47

**Tabla 5. Coeficientes de descarga, típicos para distintos valores de  $\alpha$**

15°	$Q = 0.2H^{\frac{5}{2}}$	$H \geq 0.25m$
30°	$Q = 0.392H^{\frac{5}{2}}$	$H \geq 0.205m$
45°	$Q = 0.596H^{\frac{5}{2}}$	$H \geq 0.185m$
60°	$Q = 0.818H^{\frac{5}{2}}$	$H \geq 0.17m$
90°	$Q = 1.386H^{\frac{5}{2}}$	$H \geq 0.14m$
120°	$Q = 2.471H^{\frac{5}{2}}$	$H \geq 0.12m$

**Tabla 6. Formula simplificada de vertederos para distintos valores de ángulos. Fuente: Rocha (2007).**

Para el caso particular de  $2\alpha = 90^\circ$  y para  $H \leq 30$  cm

$$Q = 1.4H^{\frac{5}{2}}$$

Esta es conocida como fórmula de Thompson donde  $H$  esta en m y  $Q$  esta en  $m^3/s$ . Ya que la descarga depende de la potencia  $\frac{5}{2}$  de la carga da una mayor precisión para caudales pequeños, además es muy pequeña la influencia de la altura del lumbral y la velocidad de llegada.

Esta fórmula también la estudio M.A Barnes y planteo esta otra expresión.

$$Q = 1.37H^{2.48}$$

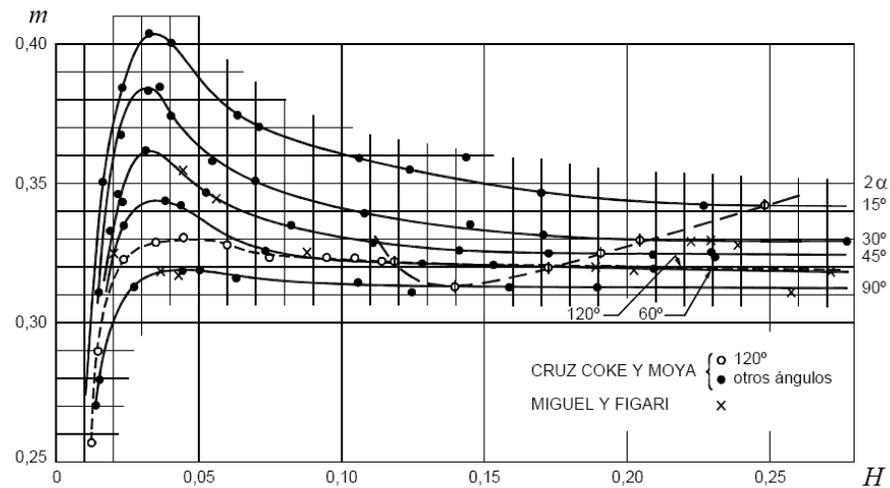


Figura 38. Grafica para determinar el valor del coeficiente de descarga para un vertedero triangular. Fuente: Rocha (2007).

### C.)Vertedero de pared gruesa.

Para que un vertedero se considere de cresta ancha es necesario que cumpla con la relación,  $b \geq \frac{2}{3}H$  esto nos indica que el flujo se adhiere a un

plano de descarga, que es lo que caracteriza a los vertederos de pared gruesa. A continuación se muestran algunas formas regulares. Figura 39.

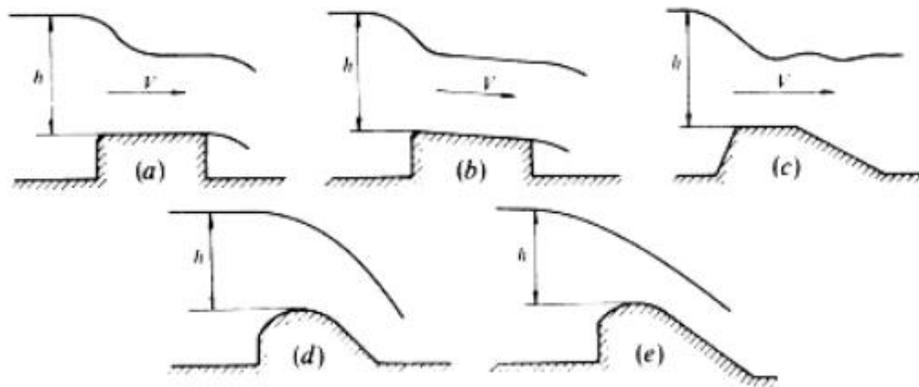


Figura 39. Distintos tipos de vertederos de pared gruesa regularmente utilizados como estructuras de control.

En cuanto que la longitud máxima es de  $15H$ , si se considera que la energía específica aguas arriba es igual a la energía sobre la cresta y tampoco exista fricción ni pérdidas de carga y el coeficiente de Coriolis es igual a 1. Se puede considerar que el flujo aguas arriba del vertedero es sub crítico ( $F < 1$ ), al final de la corriente se considera un flujo súper crítico ( $F > 1$ ).

Por tanto después de desarrollar la correspondiente matemática, se obtiene la siguiente expresión para el flujo teórico.

$$Q = B y_c V = L \frac{2}{3} \sqrt{H + \frac{V_0^2}{2g}} \sqrt{2g \left( H + \frac{V_0^2}{2g} - y_c \right)}$$

Para unidades métricas el caudal real se expresa de forma sencilla

$$Q = 1.7CLH^{3/2}$$

Mientras que para el perfil Creager es:  $Q = 2LH^{3/2}$

## **CAPITULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Tipo de investigación**

Es de tipo proyecto factible debido a que permite la aplicación de una solución viable, cuyo propósito es satisfacer una necesidad o solucionar un problema siguiendo una metodología. En este caso la construcción un equipo hidráulico para el estudio de descarga por vertederos y resalto hidráulico en el laboratorio de hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Oriente Extensión Cantaura Estado Anzoátegui.

Arias, (2006), señala: "Que se trata de una propuesta de acción para resolver un problema práctico o satisfacer una necesidad. Es indispensable que dicha propuesta se acompañe de una investigación, que demuestre su factibilidad o posibilidad de realización" (p.134).

De lo antes planteado, para llevar a cabo un proyecto factible, lo primero que debe realizarse es un diagnóstico de la situación planteada, en segundo lugar, es plantear fundamentar con basamentos teóricos la propuesta a elaborar y establecer, tanto los procedimientos metodológicos como las actividades y los recursos. Aunado a esto se realizara el estudio de factibilidad del proyecto y, por último, la ejecución de la propuesta con su respectiva evaluación.

### 3.2 Nivel de investigación

Arias, (2012), sobre la investigación explicativa expresa que:

Consiste en buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como de los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos. (p. 26).

Este proyecto asumió el nivel de investigación anteriormente explicado ya que durante el desarrollo de la investigación se realizaran ensayos donde se establecerán diversas variables y parámetros; estas variables estarán relacionadas con las pruebas que se ejecutaran con el equipo hidráulico.

### 3.3 Técnicas a utilizar

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, en el desarrollo o proceso de ejecución del proyecto se aplicarán las siguientes técnicas:

✓ **Revisión documental**

Se obtendrá información de importancia sobre las características y puntos relevantes en el proyecto de estudio. Se consultarán distintas referencias bibliográficas, manuales, normas y proyectos anteriores.

✓ **Observación directa**

Se utilizará esta técnica para realizar un examen general de las características de los diferentes materiales con los cuales se va a construir el equipo.

✓ **Herramientas computacionales**

Computadores, calculadoras, programas de dibujo y cálculo (AutoCAD 2015, Microsoft Excel. 2010, Sap 2000), dispositivos de almacenamiento masivo, todos estos se utilizarán con el fin de agilizar los procedimientos de cálculo inherentes a la construcción del equipo.

✓ **Herramientas de oficina**

Papel de plotter para la impresión de planos del equipo hidráulico, papel bond para la impresión de documentos, lápices, bolígrafos, entre otros.

✓ **Diagrama de Gantt**

Se implementará para la elaboración del cronograma de actividades, en base a éste se ejecutarán las labores de construcción del equipo.

✓ **Procesamiento de datos**

Mediante la utilización esta técnica se lograra el procesamiento de los datos obtenidos en los ensayos de calibración del equipo hidráulico a fin de analizarlos y realizar los ajustes correspondientes. Estos datos serán presentados en forma tabulada y grafica en función a los parámetros o variables inherentes a los ensayos

✓ **Maquinarias, equipos e instrumentos de medición**

Con el objeto de ejecutar los trabajos constructivos se utilizarán cintas métricas, cortadora, máquina de soldar, pintura, pegamento.

### **3.4. Etapas del proyecto**

La metodología que se utilizara para desarrollar este proyecto se lograra mediante varias etapas descritas a continuación:

✓ **Etapa I: Revisión bibliográfica.**

Involucra la recopilación de la información necesaria para el desarrollo del proyecto. Esto se logrará mediante la revisión de libros, documentos, textos, revistas, manuales, fuentes electrónicas y cualquier otra referencia que se relacione con el tema del proyecto en cuestión.

Duración estimada de la etapa 8 semanas

✓ **Etapa II: Descripción de las Características Físicas y Técnicas del Equipo.**

En esta etapa se definirán las características físicas y técnicas, así como también las dimensiones del equipo que se construirá en base a la bibliografía técnica especializada. Además de esto, se realizará la representación esquemática del equipo considerando cada una de las partes que lo conforman. Cabe destacar, que antes de realizar lo anteriormente mencionado, y luego de haber recopilado cualquier información de interés, se ejecutará un estudio en el mercado de los posibles materiales, para la construcción del equipo tomando en cuenta distintas alternativas, desde el punto de vista presupuestario, de la calidad de los materiales, entre otros factores.

Duración estimada de la etapa 4 semanas

✓ **Etapa III: Elaboración de los cálculos hidráulicos, estructurales y planos de ingeniería del equipo.**

En esta etapa se elaborarán los cálculos métricos para obtener las cantidades de materiales necesarios para la construcción del equipo, considerando cada una de las opciones de diseño usando los programas

HICALC 2.0.2 Y SAP 2000, de acuerdo a lo establecido en la etapa anterior. A su vez, considerando la solución obtenida se procederá a diseñar sobre un plano, y con la ayuda del Software Auto Cad 2015, los detalles preliminares para ser revisados y establecer los definitivos.

Duración estimada de la etapa 4 semanas

✓ **Etapa IV Confeccionar el equipo hidráulico teniendo en cuenta los materiales de la zona.**

Se procederá con el diseño del equipo hidráulico basado en los diferentes materiales existentes en la zona, teniendo en cuenta distintas alternativas de estos, además de la bibliografía técnica especializada. Con la información que se obtuvo en las etapas anteriores de los posibles materiales presentes en el mercado actual, se procederá a realizar el diseño del equipo teniendo en cuenta todas las opciones. Luego de esto, se escogerá la mejor opción desde el punto de vista de su facilidad de construcción en cuanto a los materiales, el factor económico, y la calidad de los materiales. Se tendrá en cuenta las pérdidas generadas por la tubería y sus accesorios en el diseño establecido. Por otra parte, se determinará qué tipo de bomba hidráulica es adecuada para el correcto funcionamiento del equipo.

Duración estimada de la etapa 5 semanas

✓ **Etapa V: Calibración del Equipo.**

Una vez finalizada la construcción del equipo hidráulico, se procederá a realizar la calibración del mismo y el ajuste necesario para su correcto funcionamiento. Los procedimientos de calibración y ajuste se ejecutarán

mediante ensayos, de los cuales se obtendrán resultados en función al estudio hidráulico que se realice. En base a fuentes documentales y bibliografía especializada en los ensayos en cuestión se realizará el análisis y procesamiento de los resultados obtenidos en los ensayos con la ayuda del programa HICALC 2.0.2 NUMERIC MODELLING OF OPEN SURFACE CHANNELS, para posteriormente ajustar el equipo hasta que se obtengan los resultados esperados.

Duración estimada de la etapa 3 semanas

✓ **Etapa VI: Seleccionar la guía de operación del equipo.**

En este punto de la investigación, se desarrollará una guía en la cual se explicará de forma clara y metódica los pasos necesarios para la ejecución de los estudios hidráulicos que podrán realizarse con el equipo a construir. Cabe destacar que esta guía o manual se elaborará en base a documentos previos relacionados con la ejecución de los estudios hidráulicos inherentes al proyecto presentado.

Duración estimada de la etapa 2 semanas

✓ **Etapa VII: Redacción y presentación del trabajo de grado.**

En esta etapa se ejecutará la redacción total del trabajo de grado, verificando el cumplimiento de los objetivos propuestos, y dando a conocer los diferentes resultados obtenidos en la investigación. Se establecerán las conclusiones pertinentes y las recomendaciones al respecto. La redacción se efectuará bajo la supervisión y guía del tutor académico. Finalmente, se someterá a la comisión representativa de grado del departamento de ingeniería civil, posteriormente se presentará y defenderá el trabajo final a las autoridades de la Universidad de Oriente.

Duración estimada de la etapa 10 semanas

### **3.5.- Recursos necesarios**

#### **3.5.1. Equipos**

- Computadora de mesa Hp L1710
- Computadora Tipo Laptop Siragon NB-3100
- Calculadora HP 49G+
- Impresora HP serie F380
- Cámara Digital.

#### **3.5.2. Materiales**

- Documentos bibliográficos.
- Artículos de oficina (bolígrafos, lápiz, carpetas, engrapadoras, clips, entre otros).

#### **3.5.3 Herramientas**

- Microsoft Word.
- Microsoft Excel.
- Microsoft Power Point.
- Microsoft Internet Explorer.
- Autocad 2010.
- HiCal 2.0.2
- SAP 2000

## **CAPITULO IV**

### **DISEÑO**

#### **4.1 Propósitos de diseño.**

El propósito del equipo es para realizar pruebas en los fluidos, es decir, experimentación, lo cual significa que el equipo estará sujeto constantemente al uso de estudiantes e investigadores, por lo que se ha optado por un diseño versátil, el cual permite la fácil manipulación de los instrumentos de pruebas, dando al mismo tiempo la oportunidad de realizar diferentes tipos de pruebas, como por ejemplo: resalto hidráulico y descarga por vertedero, sin olvidar una parte muy importante la seguridad.

#### **4.2 Alternativas de Diseño**

Se procedió al estudio de las distintas alternativas de diseño basados en lo equipos existentes en la Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui ubicada en la ciudad de Barcelona.

En esta etapa del proyecto se estudiaron dos diseños, a continuación se explican los detalles de cada uno de ellos y se realizan comparaciones de los mismos para establecer cuál es el más adecuado para su selección. Las alternativas a tomar en cuenta para el diseño final son:

- Para el estudio de descarga por vertedero el sistema está constituido por un equipo de bombeo, tuberías y accesorios de hierro galvanizado y PVC ambos de 1" para la succión y descarga. Un depósito de acrílico que acumula el agua necesaria para que el sistema funcione sin que sea necesario alimentarlo externamente, durante el proceso, también consta de una llave de paso que regula el flujo para obtener un valor aproximado de la presión existente en una tubería. Se utiliza

un vertedero triangular para la medición de caudal suministrado por la bomba, además de una rejilla que disminuye la turbulencia en la zona de descarga dentro del tanque.

- El equipo para el estudio de resalto hidráulico consta de un tanque de alimentación hecho con láminas de acero que mediante una motobomba impulsa el agua hasta el tanque de descarga, elaborado en láminas de acrílico, provisto de una compuerta de cola en la salida para formar el resalto hidráulico. Posee un soporte o mesa constituido por perfiles de 1"x1"

Luego del estudio de los equipos ya existentes se tomaron ciertas características para la elaboración de este nuevo equipo que será de gran ayuda para la Universidad de Oriente Extensión-Cantaura, permitiendo el estudio de descarga por vertedero y resalto hidráulico

#### **4.3 Geometría del canal.**

Un canal hidráulico puede tener varias formas, tales como circulares, trapezoidales, rectangulares, etc. En este caso el canal se catalogó como un canal artificial y se aplicó una geometría rectangular, pues de ella se derivan una serie de fórmulas que brindan información teórica muy importante para el desarrollo de diseño.

#### **4.4 Selección de las partes.**

El sistema contará con las siguientes partes:

- Un tanque de alimentación hecho con láminas de hierro.
- Un tanque principal hecho con láminas de hierro.
- Canal artificial hecho con láminas de vidrio
- Accesorios en acrílico (vertederos)

- Un tanque de descarga hecho con láminas vidrio.
- Una motobomba.
- Una válvula que regulará la compuerta.
- Tuberías PVC de diámetro 1".
- Soporte de barras de hierro de  $5 \frac{5}{8}$  "
- Accesorios de PVC 1"

#### **4.5 Descripción del equipo hidráulico.**

La forma geométrica del canal es rectangular, construido de material de vidrio y montado en una estructura metálica, el canal estará soportado en una mesa rectangular con soportes de barra maciza. No permite ninguna inclinación, está totalmente en plano horizontal.

##### **El equipo constara de tres tanques:**

- El primero es el tanque de alimentación, el cual es capaz de contener la cantidad de agua necesaria para realizar las pruebas de laboratorio como también el flujo de seguridad el cual permite mantener la bomba funcionando, es decir, no permite que esta se quede sin agua, evitando problemas de cavitación, y cebado de la bomba.

- El segundo tanque es el tanque principal, este tanque permite la entrada del agua al canal en una forma tranquila, evitando el rebalse del agua por los bordes del tanque, el agua retornara al tanque de alimentación por medio de una tubería de 1 pulgada, además poseerá un drenó para evacuar el agua al finalización de cada una de las prácticas de laboratorio.

- El tercer tanque de descarga, el cual permite retornar el agua en una forma repetitiva para la realización de la pruebas de laboratorio

El equipo hidráulico es un circuito cerrado, dicho circuito da inicio con una bomba que toma el fluido del tanque de alimentación, que a su vez, es enviado por una tubería al tanque primario, luego recorre el canal, es importante mencionar que en el canal se pueden montar diferentes equipos de medición, o mantenerse libre sin ningún tipo de obstrucción, luego el agua es recolectada en el tanque de descarga, y luego descargada al tanque de alimentación, manteniendo de esta manera el ciclo de pruebas.

#### **4.6 Diseño del sistema**

Para la realización del diseño del sistema se dimensionó el equipo. Se tomaron medidas tentativas tanto del tanque de descarga como el tanque de alimentación, el soporte del equipo se diseñó en base a las medidas anteriores. Utilizando el programa SAP 2000 se diseñó toda la estructura metálica.

##### **4.6.1 Canal artificial**

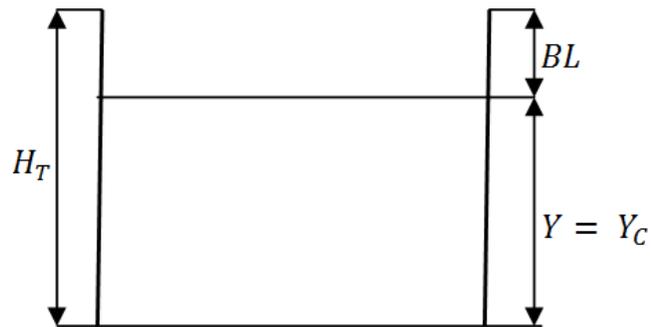
Canal hecho con vidrio con un espesor de 6 mm, con las siguientes dimensiones: Largo: 2,40m; ancho: 0,14m y alto: 0,42m. En este canal se realizaran las prácticas correspondientes a descarga por vertedero y resalto hidráulico con la ayuda de accesorios (vertederos) hechos láminas de acrílico.

##### **4.6.2 Diseño de borde libre.**

El borde libre es la distancia vertical desde la parte superior del canal hasta la superficie del agua en la condición de diseño. Esta distancia debe de ser lo suficiente para prevenir que ondas o fluctuaciones en la superficie del agua causen rebose por encima de los lados. No existe una regla que universalmente sea aceptada para el cálculo del borde libre, debido a que la acción de las ondas o fluctuaciones en la superficie del agua se puedan

recrear por muchas causas incontrolables. En el diseño es común el uso de bordes libres que varían desde menos del 5% o más del 30% de la profundidad de flujo. El borde libre en un canal no revestido o lateral por lo general está gobernado por consideraciones de tamaño, caudal, fluctuaciones del nivel (si hay olas), la corriente del viento, el tipo de suelo, resaltos, etc.

De acuerdo con el criterio recomendado por Ven Te Chow, el cual dice que el borde libre varía de un 30 % arriba de la altura total del canal, ver siguiente figura.



**Figura. 62. Representación del borde libre.**

**Dónde:**

HT: Altura total del canal.

BL: borde libre.

Y: profundidad hidráulica.

De la figura anterior se puede deducir lo siguiente:

Si el 100 % = 0.40 m

Entonces el 30% →  **$BL = 0.12m$**

Entonces la profundidad de flujo, en el canal será de:

$$HT = B + Y \rightarrow Y = HT - B \rightarrow Y = 0.40m - 0.12m$$

$$Y = 0.28m$$

#### 4.7 Determinación de características de flujo y físicas del canal.

En lo siguiente se determinaron todas las variables hidráulicas como lo son la geometría del canal en donde se establecieron sus dimensiones de área, profundidad, radio hidráulico, caudal de operación, velocidad de flujo, etc., además como parte muy importante en el diseño de canales hidráulicos es la determinación de los diferentes tipos de flujo del canal. El fin principal de los cálculos son los resultados obtenidos de la curva de la pendiente crítica, el cual nos da el límite entre flujo suscritico y flujo supercrítico, y el caudal de operación del canal. Para la ayuda de los cálculos hidráulicos se utilizó el programa Hical 2.02 el cual arrojó los siguientes datos

##### 4.7.1 Dimensión del canal.

Las dimensiones del canal experimental fueron adoptadas de acuerdo a los materiales de construcción, facilidad de ensamble, presupuesto, y funcionalidad. Las dimensiones del canal son:

Longitud del canal (L)=2.40m

Altura del canal (h)=0.40 m

Ancho del canal (b)=0.14 m

Ya que el canal experimental tiene una forma regular, en tabla 1 “Elementos Geométricos de secciones de canal”, se muestran 7 formas geométricas utilizadas comúnmente, de ella obtenemos lo siguiente:

Canal de sección rectangular

Ancho superior:  $T = b$

Perímetro mojado:  $P = b + 2Y$

Área:  $A = b * Y$

$$\text{Radio hidráulico: } R = \frac{bY}{b+2Y}$$

- **Área(A):**

$$A = b * Y$$

$$A = 0.14m * 0.28m$$

$$A = 0.0392m^2$$

- **Perímetro mojado (P)**

$$P = b + 2Y$$

$$P = 0.14m + 2(0.28m)$$

$$P = 0.70m$$

- **Radio hidráulico (R)**

$$R = \frac{bY}{b + 2Y}$$

$$R = \frac{0.14m * 0.28m}{0.14m + 2 * 0.28m} = 0.050$$

$$R = 0.56m$$

- **Factor de sección (z)**

$$z = bY^{1.5}$$

$$z = 0.14 * 0.28^{1.5}$$

$$z = 0.021m$$

Estos cálculos son necesarios para la determinación de la curva de pendiente crítica en la cual se requiere hacer iteraciones. Las ecuaciones que se toman en cuenta para graficar la curva son: La ecuación de Manning.

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

En función del caudal la formula anterior queda:  $Q = VA$

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

Dónde:

Q: Caudal  $m^3 s$

A: Área transversal del canal ( $m^2$ )

R: Radio hidráulico ( $m$ )

S: Pendiente del canal.

$n$ : Coeficiente de rugosidad.

También es necesario utilizar el factor de sección, como:

$$Z = \frac{Q}{g}$$

Esta se iguala con la formula tomada de la tabla de elementos de secciones geométrica  $z = by^{1.5}$  y se obtiene:

$$Z = Z$$

$$Q = bY^{1.5} \bar{g}$$

Sustituyendo valores con dimensiones del canal se tiene que:

$$Q = 0.14 * Y^{1.5} \overline{9.81} = 0.438Y^{1.5}$$

$$Q = 0.44Y^{1.5}$$

#### 4.7.2 Determinación de la pendiente crítica.

Para la determinar la curva de la pendiente crítica del canal de experimentación se tiene el siguiente procedimiento:

### 4.7.3 Iteraciones para puntos de pendiente crítica

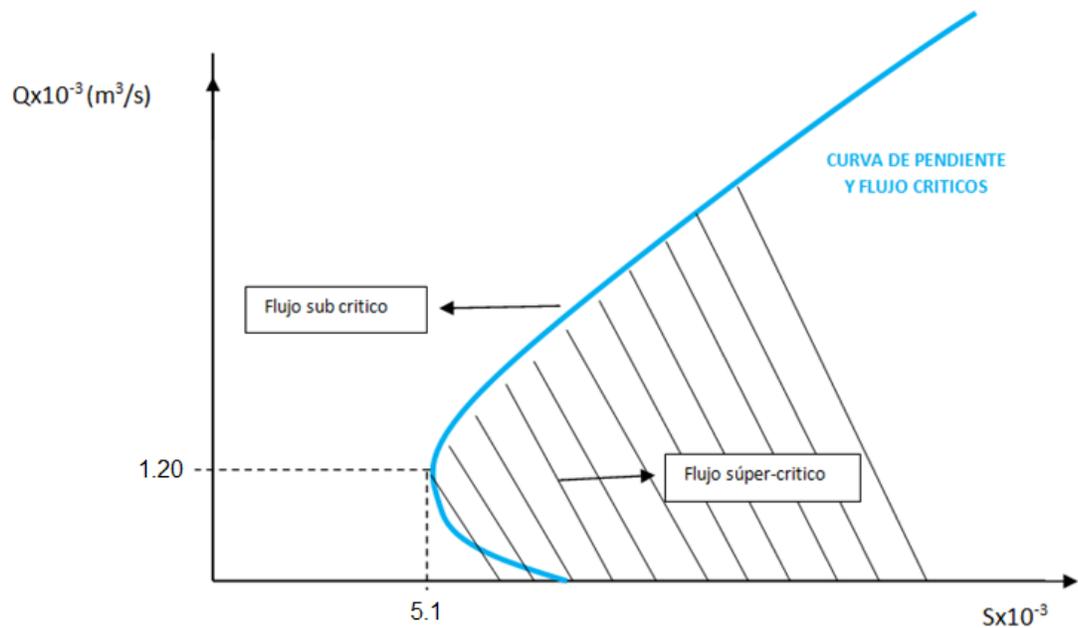
1. En la ecuación A3 se evaluarán las profundidades de flujo. Comprendidas entre 0-0.30m.
2. Luego los datos obtenidos de profundidad de flujo y caudal se introducen en la ecuación siguiente:

$$Q = \frac{1}{n} b * Y \frac{b * Y}{b + 2Y}^{2/3} * S^{1/2}$$

3. Graficar Yc vrs Qc

Rango de altura crítica "Yc"	Caudal crítico		Pendiente crítica Sc	
	$Q = 0.44Y^{1.5}$		$Q = \frac{1}{n} b * Y \frac{b * Y}{b + 2Y}^{2/3} * S^{1/2}$ <b>b=0.14 n=0.01</b>	
(m)	(m)	x10 <sup>-3</sup>	Sc	Scx10 <sup>-3</sup>
0	0	0	0	0,0
0,01	0,0004	0,4	0,0055	5,5
<b>0,02</b>	<b>0,0012</b>	<b>1,2</b>	<b>0,0051</b>	<b>5,1</b>
0,03	0,0023	2,3	0,0051	5,1
0,04	0,0035	3,5	0,0053	5,3
0,05	0,0049	4,9	0,0055	5,5
0,06	0,0065	6,5	0,0058	5,8
0,07	0,0081	8,1	0,0060	6,0
0,08	0,0100	10,0	0,0063	6,3
0,09	0,0119	11,9	0,0066	6,6
0,1	0,014	13,9	0,0069	6,9
0,11	0,016	16,1	0,0073	7,3
0,12	0,018	18,3	0,0076	7,6
0,13	0,021	20,6	0,0079	7,9

0,14	0,023	23,0	0,0082	8,2
0,15	0,026	25,6	0,0086	8,6
0,16	0,028	28,2	0,0089	8,9
0,17	0,031	30,8	0,0092	9,2
0,18	0,034	33,6	0,0096	9,6
0,19	0,036	36,4	0,0099	9,9
0,2	0,039	39,4	0,0102	10,2
0,21	0,042	42,3	0,0106	10,6
0,22	0,045	45,4	0,0109	10,9
0,23	0,049	48,5	0,0112	11,2
0,24	0,052	51,7	0,0116	11,6
0,25	0,055	55,0	0,0119	11,9
0,26	0,058	58,3	0,0122	12,2
0,27	0,062	61,7	0,0126	12,6
0,28	0,065	65,2	0,0129	12,9
0,29	0,069	68,7	0,0132	13,2
0,3	0,072	72,3	0,0136	13,6
0,31	0,076	75,9	0,0139	13,9
0,32	0,080	79,6	0,0143	14,3
0,33	0,083	83,4	0,0146	14,6
0,34	0,087	87,2	0,0149	14,9
0,35	0,091	91,1	0,0153	15,3
0,36	0,095	95,0	0,0156	15,6
0,37	0,099	99,0	0,0160	16,0
0,38	0,103	103,1	0,0163	16,3
0,39	0,107	107,2	0,0166	16,6
0,4	0,111	111,3	0,0170	17,0



**Gráfica  $Y_c$  vs  $Q_c$**

“Al graficar la pendiente crítica ( $S_c$ ) y los caudales ( $Q_c$ ). La nariz de la siguiente grafica tocara el siguiente punto, que será el punto de caudal de operación máxima.”

Para un rango de altura crítico  $Y_c = 0.02$  tenemos una pendiente crítica  $S_c = 0.0051$  y un caudal crítico  $Q = 0.0012 \text{ m}^3/\text{s}$

El caudal de operación para  $Y_{\text{máx}} = 0.28$  es:

$$Q_{op} = \frac{Q_c * Y_{max}}{Y_c}$$

$$Q_{op} = \frac{0.0012 \text{ m}^3/\text{s} * 0.28 \text{ m}}{0.02 \text{ m}} = \frac{0.0168 \text{ m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{op} = 0.0168 \text{ m}^3/\text{s} = 16.8 \text{ Lt/s}$$

Aplicando la Ecuación de continuidad se tiene:

$$V_{op} = \frac{0.0168m^3/s}{0.28m * 0.14m}$$

$$V_{op} = 0.043m/s$$

#### 4.7.4 Comprobación de la profundidad crítica.

Establecido el caudal de operación por medio de las iteraciones anteriores, el siguiente paso es la corrección de la profundidad, caudal y velocidad crítica, usando las siguientes ecuaciones:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g * b^2}} = \sqrt[3]{\frac{0.0168m^3/s^2}{9.81m/s^2 * 0.14m^2}}$$

$$Y_c = 0.114m$$

$$V_c = \frac{Qg}{b} = \frac{0.0168m^3/s * 9.81m^2/s}{0.14m}$$

$$V_c = 1.08m/s$$

$$Q_c = A_c * V_c = 0.14m * 0.12m * 1.08m/s$$

$$Q_c = 0.018m^3/s$$

$$Q_c = 18,1Lt/s$$

#### 4.7.5 Profundidad normal.

El cálculo de la profundidad normal es necesario, puesto que comparando la profundidad crítica con la profundidad normal se pueden obtener conclusiones más certeras. Para ello se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$A = CP^{2/5} = bY_n$$

$$P = b + 2Y$$

$$C = \frac{Q * n^{\frac{3}{5}}}{S^{\frac{1}{2}}}$$

Donde:

**A:** área del canal.

**P:** perímetro mojado.

**Y:** profundidad hidráulica.

**Y<sub>n</sub>:** profundidad normal.

**C:** coeficiente.

**S:** pendiente del canal.

**n :** coeficiente rugosidad.

Sustituyendo:

$$C = \frac{Q * n^{\frac{3}{5}}}{S^{\frac{1}{2}}} = \frac{0.0168m^3/s * 0.010^{\frac{3}{5}}}{0.017^{\frac{1}{2}}} = 0.018$$

Igualando la ecuación de Áreas se tiene que:

$$bY_n = \frac{Q * n^{\frac{3}{5}}}{S^{\frac{1}{2}}} * (b + 2Y_n)$$

$$0.14m * Y_n = 0.018(0.14m + 2Y_n)$$

Resolviendo se tiene que:

$$Y_n = 0.088m$$

Resumiendo los datos anteriores se tiene:

$$Y_n = 0.088m,$$

$$Y_c = 0.114m,$$

$$Y_{max} = 0.28m$$

Donde se puede notar que:

$$Y_n < Y_c$$

Dado que la profundidad crítica es mayor que la profundidad normal, y según la tabla 2: “Tipos de perfiles de flujo en canales” y la figura “clasificaciones de los perfiles de flujo gradualmente variado”, para estas condiciones el perfil de flujo del canal será **perfil de pendiente empinada zona 2**.

No obstante, como se puede notar en las ecuaciones anteriores en perfil de flujo depende del caudal, por lo que se pueden obtener distintas tipos de flujo en un mismo canal, al mismo tiempo se pueden reproducir flujos ya sea subcríticos, críticos y supercríticos, todo depende de las condiciones de operación del canal.

Las dimensiones de construcción del canal superficial son queda de la siguiente manera:

- Longitud:  $L = 2.40$  m
- Ancho:  $b = 0.14$  m
- Alto:  $H = 0.40$  m
- Rango de operación de caudal :  $Q_{op} = 0 \Rightarrow 0.0168m^3/s$
- Variación de velocidad el canal :  $V_{op} = 0 \Rightarrow 0.043m/s$
- Variación del nivel de agua :  $h = 0 \Rightarrow 0.28m$

#### 4.7.6 Medidores de Profundidad y ángulos

Para medir las profundidades requeridas para realizar las prácticas se colocaron reglas graduadas para facilitar este paso, en los laterales del canal se podrá medir las profundidades del fluido gracias a la colocación de una regla, mientras que para medir los ángulos se colocaron transportadores graduados para facilitar la práctica.

#### 4.8 Diseño de tanques.

Para la construcción de los tanques se considero lo siguiente:

- Material disponible.
- Caudal de operación.
- Facilidad de construcción.
- Tiempo de experimentación.
- Área de trabajo.
- Altura del canal.

##### 4.8.1 Tanque de alimentación:

El tanque de alimentación del sistema será de láminas de hierro pulido, calibre 5mm. Las dimensiones del tanque serán: Largo: 1,90m; ancho: 0,45m y alto: 0,40m. Revestido con pintura anticorrosiva para proteger se superficie tanto interna como externa.

El volumen total del tanque será:

$$V = \text{alto} * \text{largo} * \text{ancho}$$

$$V = 0.40m * 1.90m * 0.45m$$

$$V = 0.342 m^3 = 342 \text{ litros}$$

#### 4.8.2 Tanque principal

Tanque de láminas de acero de 5mm de grosor. Dicho tanque tiene como dimensiones: 0,74m de altura y una base de 0,60m x 0,49 m de ancho. Del tanque de alimentación pasa con la ayuda de una bomba el agua a este tanque donde se eliminará toda turbulencia

El volumen total del tanque será:

$$V = \text{alto} * \text{largo} * \text{ancho}$$

$$V = 0.74m * 0.60m * 0.49m$$

$$V = 0.218 m^3 = 218 \text{ litros}$$

#### 4.8.3 Tanque De descarga

El tanque de descarga fue construido con láminas de vidrio transparente de 5mm de espesor. Las dimensiones del tanque son; Largo: 0.70; ancho: 0,30m y su altura será: 0,30m

#### 4.9 Diseño de la estructura de soporte del equipo

El soporte del equipo se construirá con barras de hierro  $5/8$  pulgada, será como se muestra en la figura 40, se soldará y se armará en una sola pieza donde se reforzara tanto la parte de arriba como la de abajo, tendrá de altura 1.15 metros, y largo total de 3.40 metros. La estructura del equipo se sometió a un chequeo con el programa SAP 2000

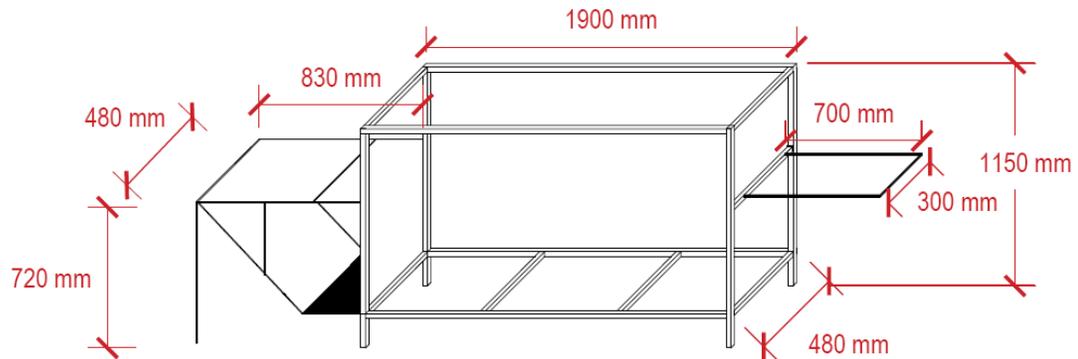


Figura 40. Soporte del equipo. Fuente: Autor

#### 4.9.1 Chequeo de estructura metálica en el software sap2000

Se realizó el chequeo de la estructura del equipo hidráulico para las cargas correspondientes y los materiales previamente indicados. Esta verificación se ejecutó mediante la implementación del programa computacional SAP2000 versión 18. Para ello, se modeló la estructura mostrada en el Anexo, de acuerdo al procedimiento explicado a continuación.

Se inició el programa computacional. Posteriormente, se desplegó el menú *File* y se seleccionó la opción *New Model*. En la ventana *New Model*, se tildó la casilla *Blank* a fin de generar un modelo en blanco (Figura 41).

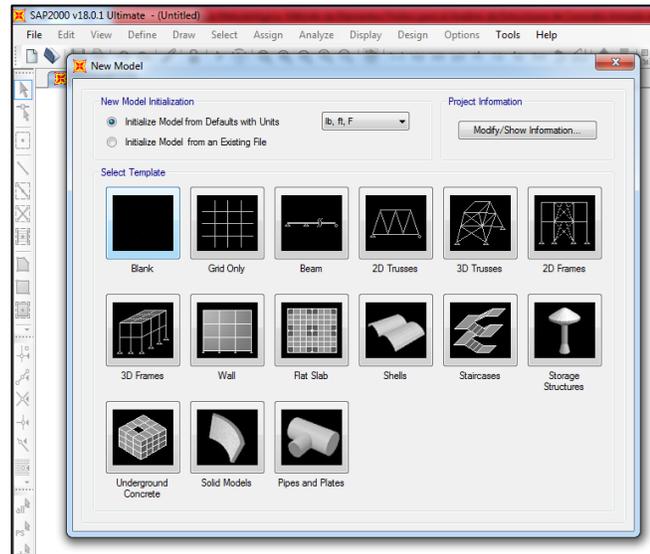


Figura 41. Inicio del programa SAP2000 y selección del modelo. Fuente: Autor. Se verificaron las unidades en las cuales se realizó el procedimiento de análisis. Se seleccionaron unidades Kilogramos, Centímetros, Grados Centígrados (Kg, cm, C).

Se realizó la edición de las líneas de referencia de acuerdo a las dimensiones de la estructura, señaladas en el Anexo. Para ello, se hizo clic en el botón derecho del mouse y se seleccionó la opción *Edit Grid Data* (Figura 42).

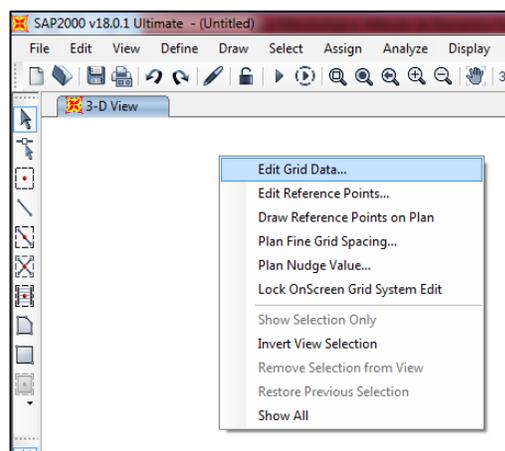


Figura 42. Opción de edición de líneas de referencia. Fuente: Autor.

En la ventana *Define Grid System Data* se modificaron los datos de las líneas de referencia de acuerdo a las dimensiones de la estructura del equipo hidráulico (Figura 3)

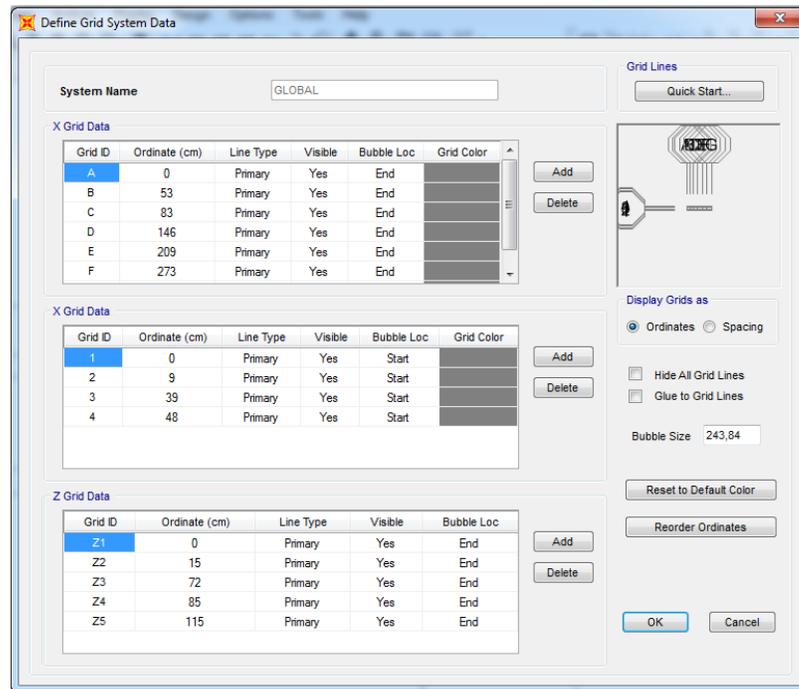


Figura 43. Líneas de referencia de la estructura. Fuente: Autor.

En la Figura 44 se muestra la vista 3D de las líneas de referencia correspondientes a la estructura metálica del equipo hidráulico.

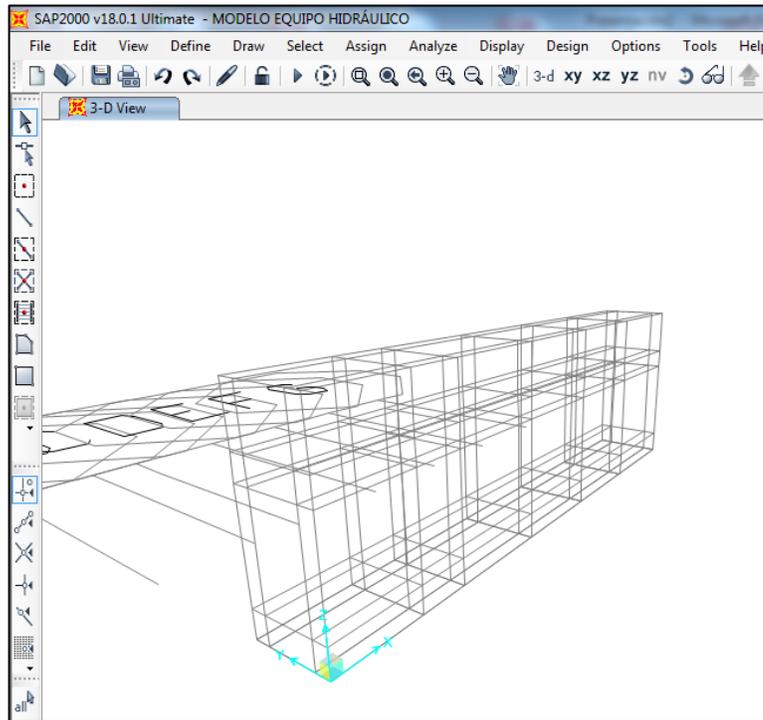


Figura 44. Líneas de referencia de la estructura (vista 3D). Fuente: Autor.

Se procedió a realizar la definición del material de la estructura metálica. Se consideró un acero A36 con valores de  $F_y$  igual a  $2530 \text{ Kg/cm}^2$  y  $F_u$  igual a  $4080 \text{ Kg/cm}^2$ . Se estableció un módulo de elasticidad del acero ( $E_s$ ) igual a  $2100000 \text{ Kg/cm}^2$ .

Se desplegó el menú *Define*, y se seleccionó la opción *Materials* (Figura 45). Se tildó el botón *New Material*, y se estableció el tipo de material (acero). Se definió un acero de grado 36. Se asignó un nombre al nuevo material, en este caso "A36", y se introdujeron las propiedades de módulo de elasticidad,  $F_y$  y  $F_u$  de acuerdo a los datos iniciales, como se muestra en la Figura 46. Una vez ingresados los datos, se presionó el botón *OK*.

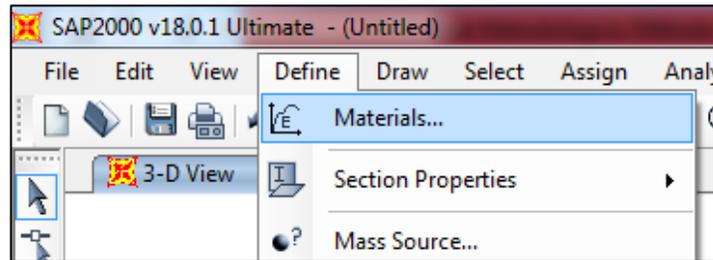


Figura 45. Opción *Materials* en menú *Define*. Fuente: Autor.

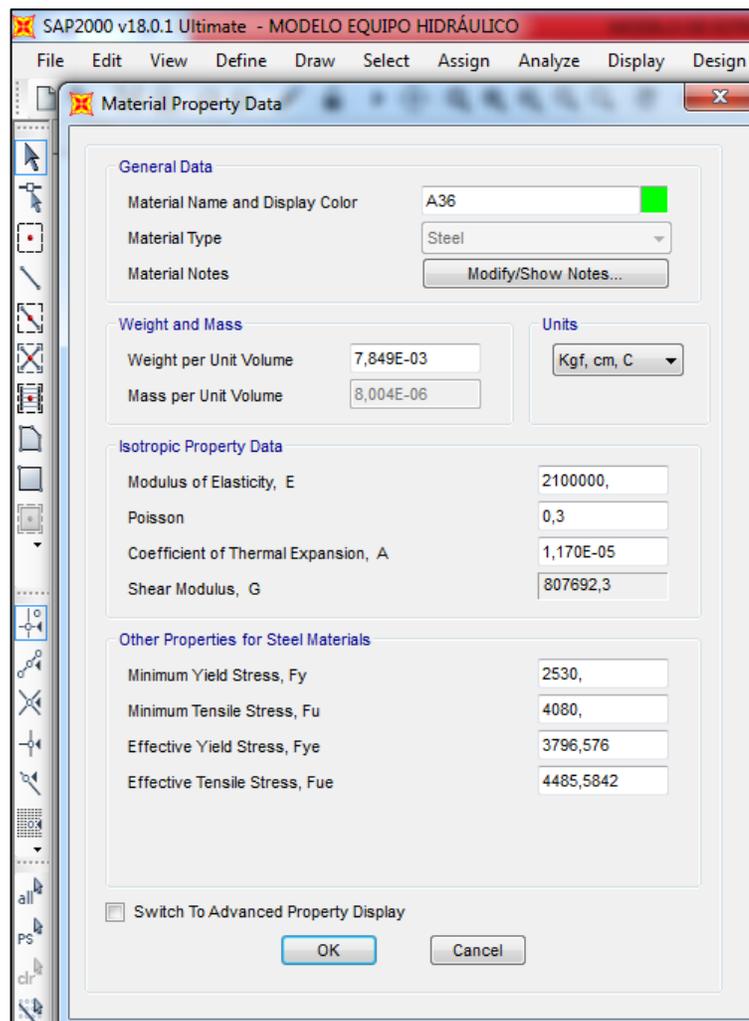


Figura 46. Definición de acero A36. Fuente: Autor.

Luego de definir el material cuyas propiedades se especificaron anteriormente, se procedió a establecer las secciones transversales de los

miembros que conforman la estructura metálica. Cabe destacar que la estructura está conformada por dos tipos de secciones transversales. Se utilizaron barras metálicas de 3/4" de diámetro y ángulos metálicos de 3/4" con un espesor de 3,00 mm.

Se desplegó el menú *Define*, y posteriormente se seleccionó en el submenú *Sections Properties* la opción *Frame Sections* (Figura 47). En la ventana *Add Frame Section Properties* (Figura 48), se tildó la casilla *Angle* para definir la sección de los ángulos metálicos.

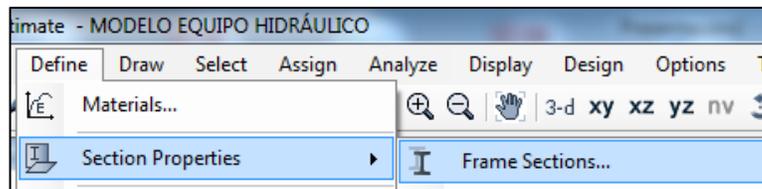


Figura 47. Opción *Frame Sections*. Fuente: Autor.

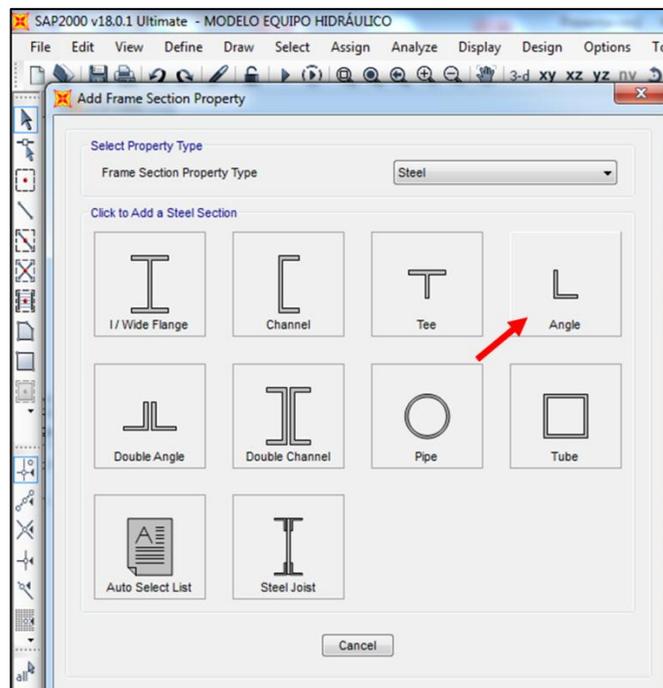


Figura 48. Ventana *Add Frame Section Properties*. Fuente: Autor

En la ventana *Angle Section* (Figura 49), se ingresaron las dimensiones del ángulo metálico (3/4") y el espesor (3,00 mm). Se seleccionó el material previamente definido (A36), y se le asignó el nombre de "ANGULO" a esta sección transversal. Una vez realizado esto se tildó el botón *OK*.

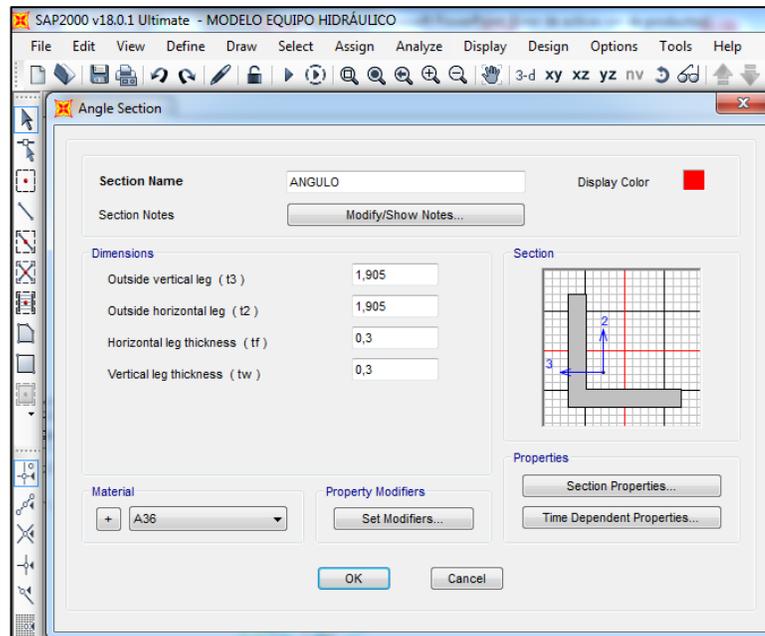


Figura 49. Ventana *Angle Section*. Fuente: Autor

De igual manera se ejecutó la definición de sección transversal correspondientes a las barras metálicas. En la ventana mostrada en la Figura 48, específicamente en la casilla *Frame Section Property Type* se seleccionó la opción *Other*. Posteriormente en la casilla *General* se ingresó el diámetro de la barra metálica (3/4") y se especificó el material correspondiente (A36), como se indica en la Figura 50. Se asignó el nombre de "BARRAS" a los miembros metálicos cuya sección transversal es de este tipo.

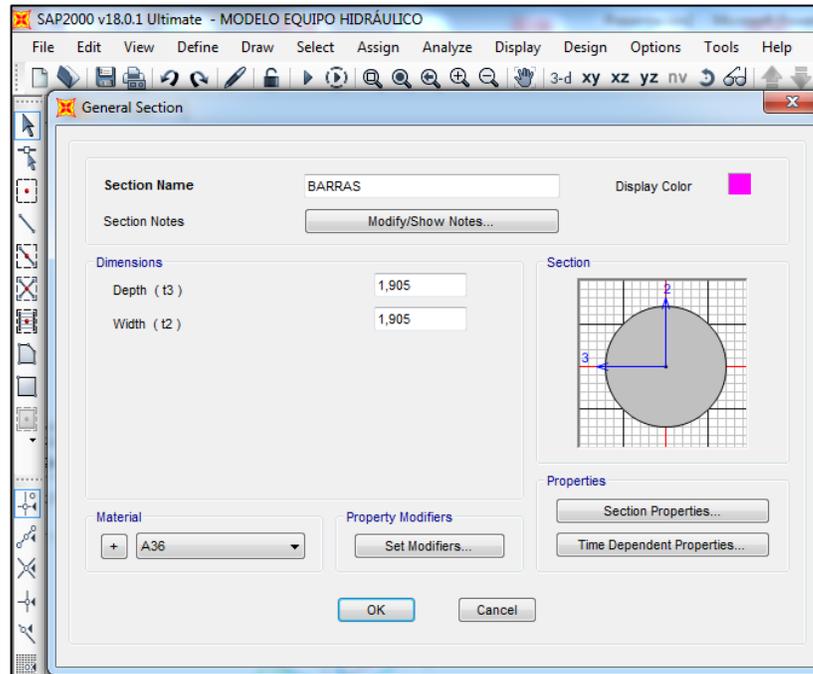


Figura 50. Ventana *General Section*. Fuente: Autor

Una vez definido el material y las secciones transversales, se realizó el trazado de los miembros de la estructura considerando la ubicación de los mismos de acuerdo al tipo de sección transversal. Para ello se tildó la opción *Draw Frame/Cable* (Figura 51) y se trazaron los miembros correspondientes.

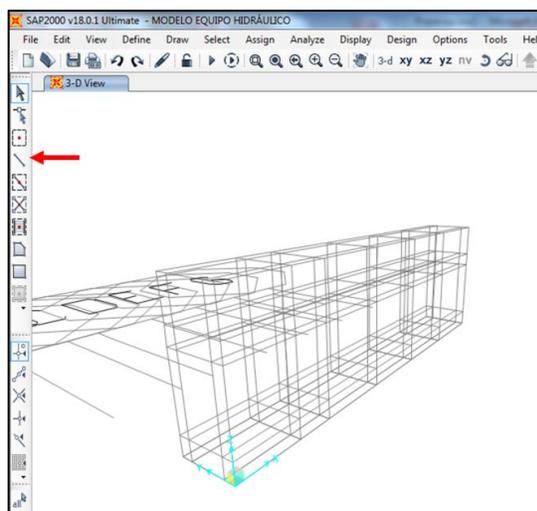


Figura 51. Opción *Draw Frame/Cable*. Fuente: Autor

Luego de trazar los miembros metálicos, se asignaron las restricciones o apoyos correspondientes. Para ello, se seleccionaron los puntos de apoyo. Se desplegó el menú *Assign* y se tildó la opción *Restraints*. En la ventana emergente se seleccionaron articulaciones planas para esta estructura. En la Figura 52 se muestra la vista 3D de la estructura metálica modelada con sus respectivas restricciones.

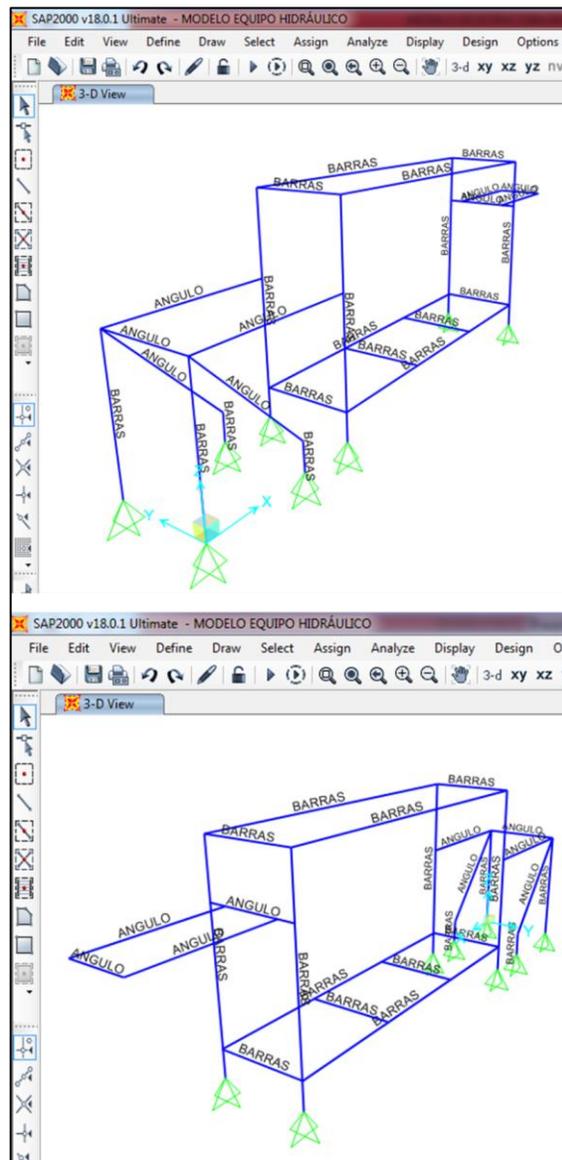


Figura 52. Vista 3D de estructura metálica. Fuente: Autor

Se realizó la asignación de cargas de acuerdo a las especificaciones del plano mostrado en el **Anexo**. Para el análisis en el programa estructural SAP2000 se consideraron las acciones debidas al peso del fluido (agua) que contiene cada tanque, tomando en cuenta la capacidad total de los mismos.

La asignación de cargas se realizó empleando elementos tipo *Shell*, definidos sin propiedad alguna, a los cuales se les asignó una carga por unidad de área correspondiente a cada tanque.

- Para el tanque de alimentación la carga por unidad de área asignada fue igual a:

$$\text{Carga } T1 = \text{Peso específico de agua} \times \text{altura del tanque } 1$$

$$\text{Carga } T1 = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0,40 \text{ m} = 400 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} = \mathbf{0,040} \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

- Para el canal superficial la carga por unidad de área asignada fue igual a:

$$\text{Carga } T2 = \text{Peso específico de agua} \times \text{altura del canal superficial}$$

$$\text{Carga } T2 = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0,42 \text{ m} = 420 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} = \mathbf{0,042} \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

- Para el tanque principal la carga por unidad de área asignada fue igual a:

$$\text{Carga } T3 = \text{Peso específico de agua} \times \text{altura del tanque } 3$$

$$\text{Carga } T3 = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0,74 \text{ m} = 740 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} = \mathbf{0,074} \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Se trazaron los elementos tipo *Shell* considerando la ubicación de los tanques correspondientes. Se asignaron las cargas mediante la opción *Area Loads, Uniform (Shell)* en el menú *Assign*; seleccionando el elemento *Shell* correspondiente.

En la Figura 53 se observa el modelo de la estructura metálica del equipo hidráulico con las cargas asignadas de acuerdo a los datos indicados

anteriormente. Cabe destacar que para la verificación no se considera el comportamiento dinámico del fluido por acción de la bomba.

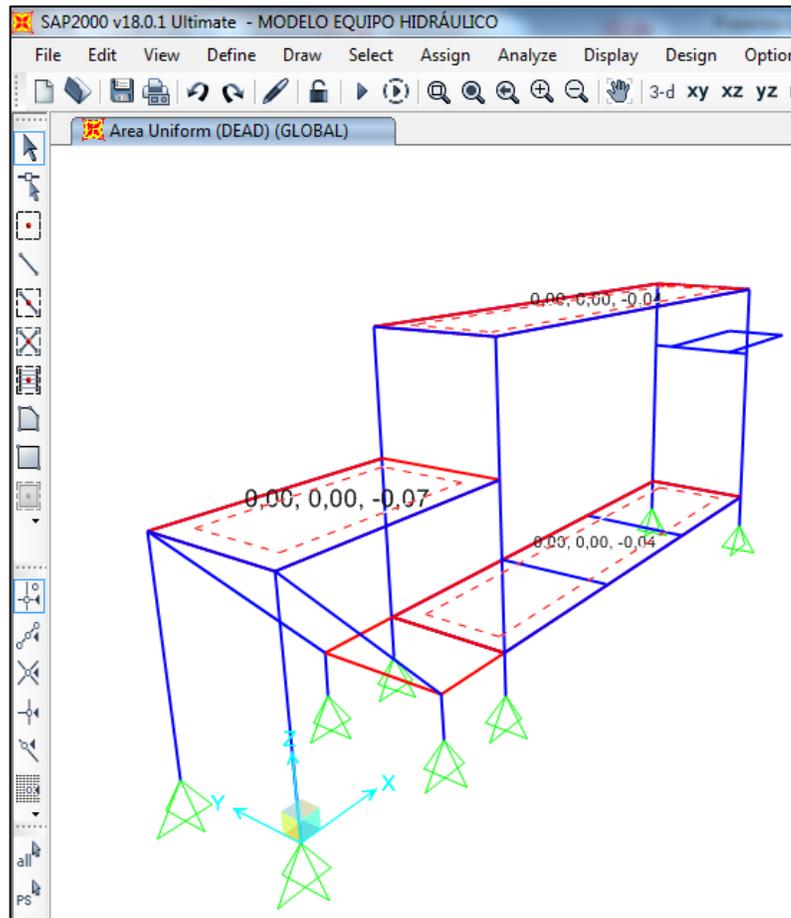


Figura 53. Modelo de estructura metálica con cargas asignadas. Fuente: Autor

Finalmente, se ejecutó la corrida del programa presionando la tecla F5 y seleccionando en la ventana emergente la opción *Run Now*. Una vez realizado esto, se procedió a chequear la estructura mediante la opción *Start Design/Check of Structure*, mostrada en la Figura 54.



#### 4.10 Diseño de vertederos.

Un vertedero es una abertura practicada en la pared de un depósito, o bien una barrera colocada en el contorno de un río y por la cual escurre o rebosa el líquido contenido en el depósito o que circula por el río o canal. En general las funciones que suele tener un vertedero son las siguientes:

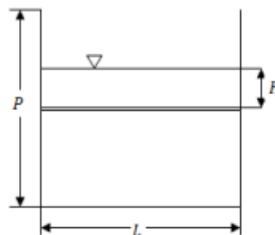
A. Medir caudales (vertederos de pared delgada)

B. Permitir el rebose del líquido contenido en un reservorio o del que circula en un río o canal.

En el actual canal se decidió construir vertederos de pared delgada, específicamente un vertedero rectangular sin contracción, un vertedero rectangular con contracción y finalmente un vertedero triangular, así como también un vertedero de pared gruesa que a su vez servirá para el estudio de resalto hidráulico.

##### 4.10.1 Vertedero rectangular sin contracción.

Los vertederos rectangulares regularmente se presentan con y sin contracción, pues la fórmula para el cálculo del caudal es la misma, la diferencia es el coeficiente de descarga, la ecuación general para el cálculo del caudal en un vertedero rectangular viene dada de la siguiente figura:



**Vertedero rectangular**

La descarga real será dada por la fórmula de caudal:

$$Q_r = \frac{2}{3} \sqrt{2g} CLH^{\frac{3}{2}}$$

$$C = 0.611 \left( 1 + \frac{1}{1000H + 1.6} \right) \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{H}{H + Y} \right)^2$$

Para los límites de:

$$0.025m < H \leq 0.80m$$

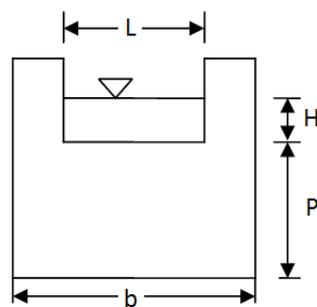
$$P \geq 0.30$$

$$\frac{H}{P} \leq$$

Suponiendo un  $H=0.05$  m, el coeficiente de descarga y el caudal serán:

$$Q_r = \frac{2}{3} \sqrt{2g} CLH^{\frac{3}{2}}$$

#### 4.10.2 Vertedero rectangular con contracción.



Se utiliza la misma fórmula para vertedero rectangular sin contracción.

Lo que cambia con el vertedero rectangular sin contracción es el valor del coeficiente de descarga.

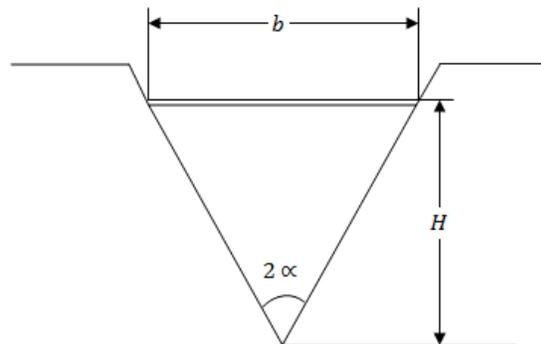
$$C = 0.578 + 0.037 \frac{L}{B} + \frac{3.615 - 3 \frac{L}{B}}{1000H + 1.6} + 1.2 \frac{L}{B} \frac{H}{H + P}$$

$$C = 0.578 + 0.037 \frac{0.05}{0.13} + \frac{3.615 - 3 \frac{0.05}{0.13}}{1000 \cdot 0.05} + 1.2 \frac{0.05}{0.13} \frac{0.05}{0.05 + 0.10}$$

$$Q_r = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C L H^{3/2}$$

$$Q_r = \frac{2}{3} \sqrt{2 \cdot 9.81} \cdot 0.68 \cdot 0.05 \cdot 0.05^{3/2}$$

#### 4.10.3 Vertederos triangulares



De igual manera tenemos las fórmulas para caudal teórico y caudal real de vertederos triangulares

$$Q_r = \frac{8}{15} \tan \alpha \sqrt{2g} H^{5/2}$$

$$Q_{R=C} = C \frac{8}{15} \tan \alpha \sqrt{2g} H^{5/2}$$

La fórmula para un vertedero triangular de un ángulo dado y un coeficiente "C" constante puede expresarse de la siguiente manera:

$$Q = kH^{5/3}$$

$$k = \frac{8}{15} C \tan \sqrt{2g}$$

#### 4.10.4 Vertederos de pared gruesa.

##### Perfil creager

Para diseñar el Perfil fue utilizada una hoja de cálculo para agilizar los cálculos obtenidos, se utilizó un perfil creager por ser capaz de evacuar caudales de creciente, pues la forma especial de su cresta permite la máxima descarga al compararlo con otra forma de vertederos para igual altura de carga de agua

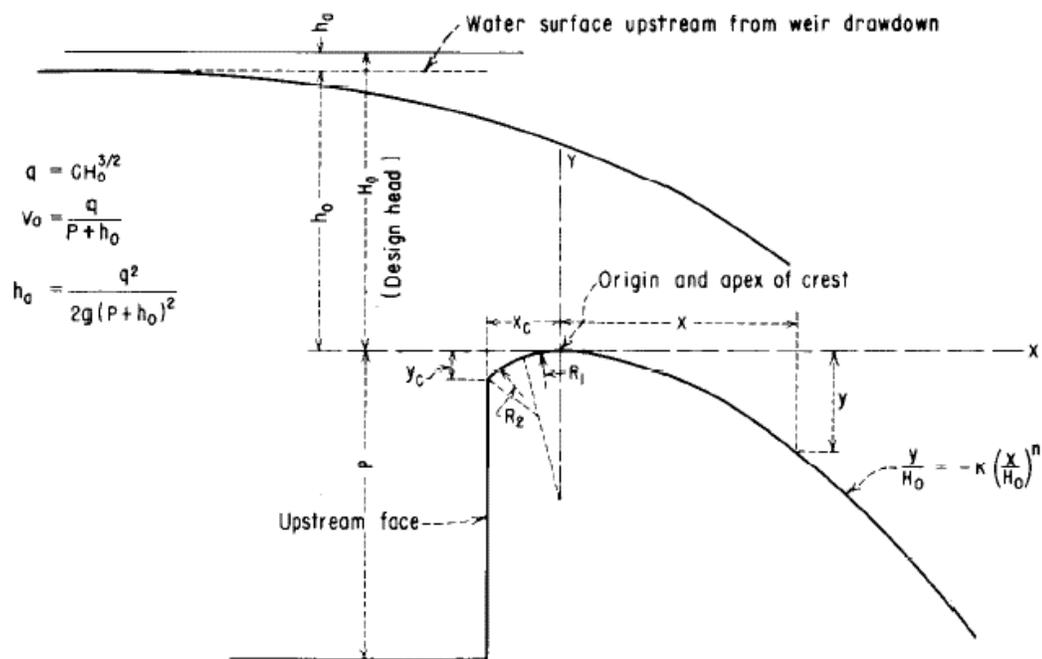


Figura 56. Perfil creager. Fuente: Chow (2004)

Mediante el programa Excel 2010 se elaboro el perfil creager con las formulas empleadas, el cual arrojó los siguientes datos figura 57.

- 1) Se introduce en la hoja de cálculo los datos del canal superficial, fue calculada la velocidad en función al caudal de agua, se calculan las alturas del nivel de agua. Se verifica el valor asumido para el coeficiente de gasto mediante la figura 58 por el método bureau of reclamation

DATOS	
<b>1.</b>	
Q=	0,0165 m <sup>3</sup> /s
C=	2,1569
b=	0,14 m
p=	0,2 m
V=	0,818475
<b>2.</b>	
$H_o = \left( \frac{Q}{C * b} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,143996$	
$H_a = \frac{\left( \frac{Q}{(P + H_o) * b} \right)^2}{2 * 9,81} = 0,005983$	
$H_e = H_o - H_a = 0,138013$	
<b>3.</b> Verifico el valor asumido para C	
$H_o = \frac{P}{H_o} = 1,388927$	
$C_o = -0,034 * \left( \frac{P}{H_e} \right)^2 + 0,145 * \left( \frac{P}{H_e} \right) + 2,031 = 2,1697$	
$C_2 = 0,212 * \left( \frac{H_e}{H_o} \right)^{\frac{2}{3}} + 0,788 = 0,9941$	
<b>4.</b>	
$C = C_o * C_2 = 2,1569$	

Figura 57. Datos hoja de Excel. Fuente: Autor.

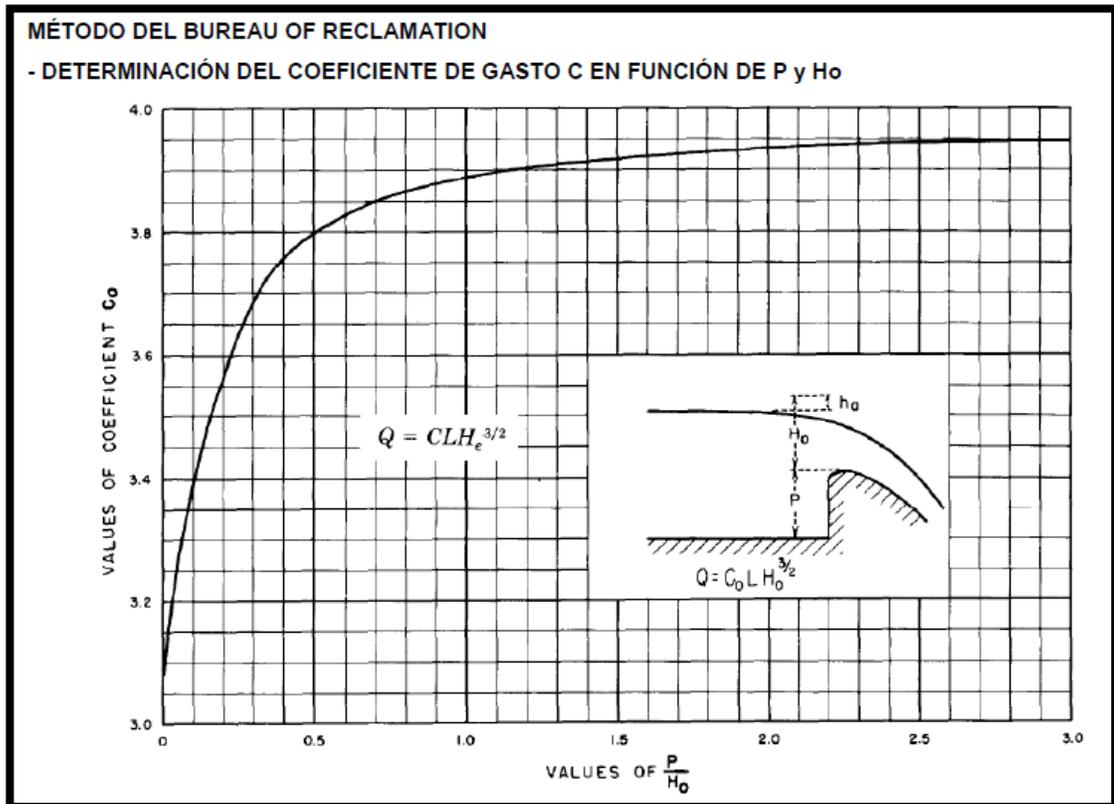


Figura 58. Método del bureau of reclamation. Fuente: Autor.

- 2) Posteriormente se calcula el perfil creager mediante la fórmula indicada figura 59.

5. Perfil Creager

$$\frac{y}{H_o} = -K * \left( \frac{x}{H_o} \right)^n$$

Figura 59 Fórmula para perfil creager. Fuente: Autor.

Determinación de los coeficientes K y n, mediante el método Bureau of Reclamation, Utilizando  $H_a/H_o = 0.042$  leemos en figura 60.

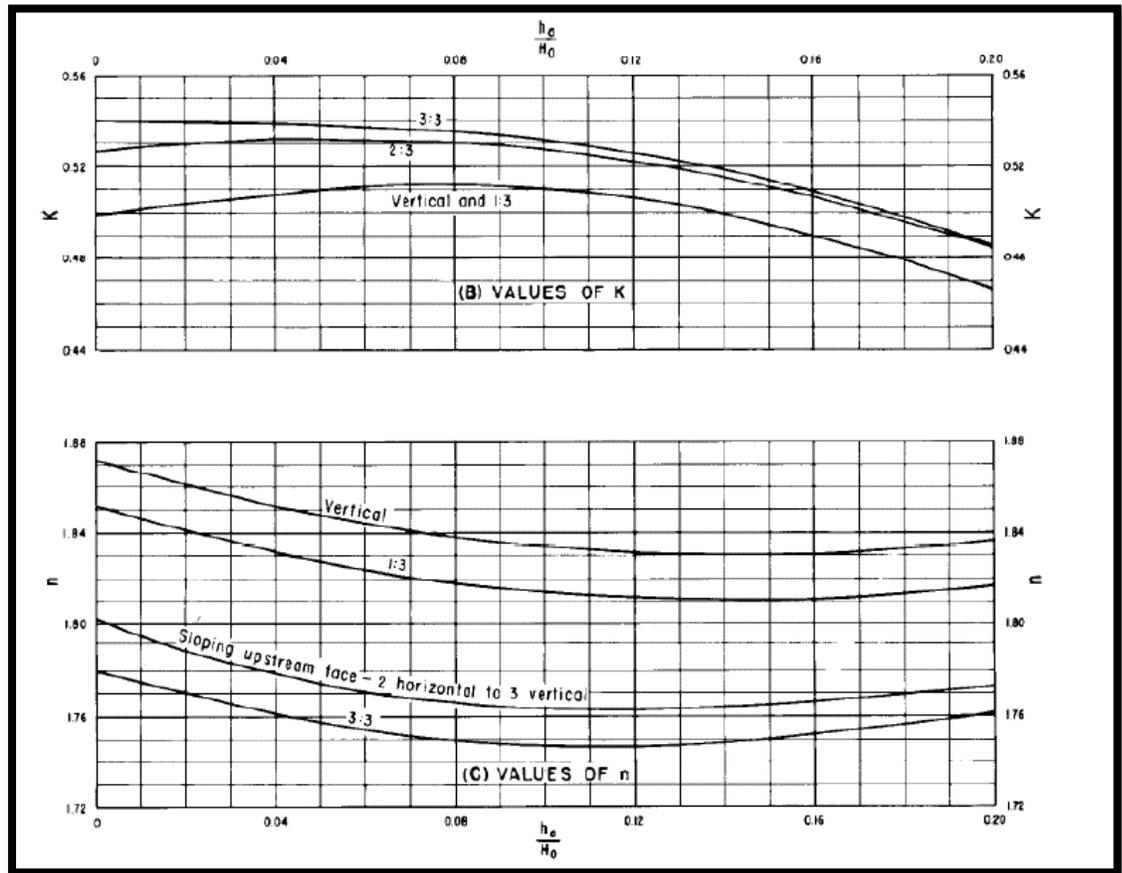


Figura 60. Método del bureau of reclamation, para determinar coeficientes  $k$  y  $n$ . Fuente: Autor.

Según la figura 60 para los coeficientes  $k$  y  $n$  tenemos  $k = 0.509$  y  $n = 1.851$

- 3) Determinación de las relaciones  $X_c$ ,  $Y_c$ ,  $R_1$  y  $R_2$ , mediante el método Bureau of Reclamation, Utilizando  $H_a/H_0 = 0.042$  leemos en figura 61 para cada una de las relaciones

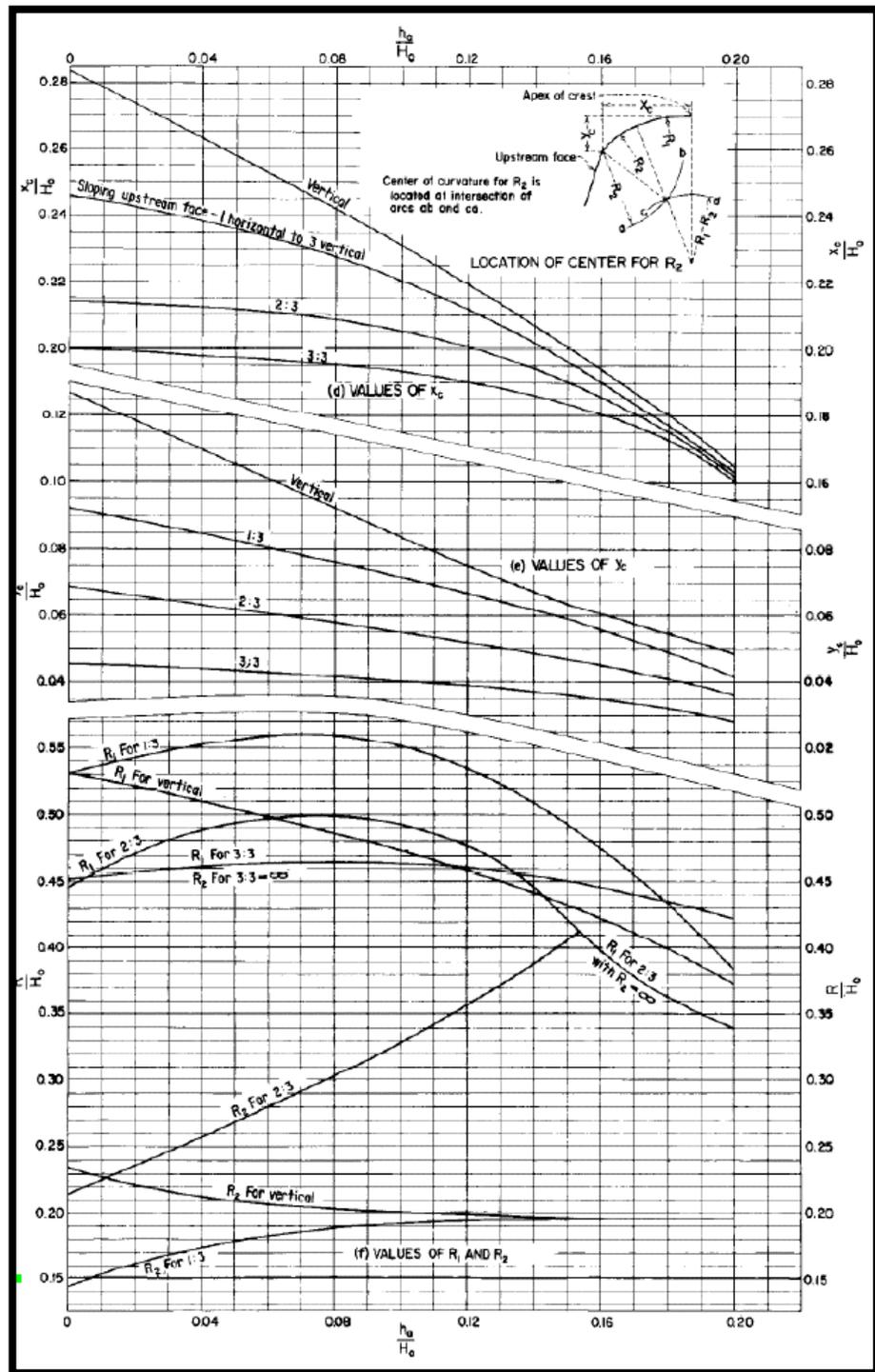


Figura 61. Método del bureau of reclamation, para determinar relaciones  $X_c$ ,  $Y_c$ ,  $R_1$  y  $R_2$ . Fuente: Autor.

4) Finalmente se Obteniendo como resultado según la figura 61

Xc/Ho	0,263
Yc/Ho	0,109
R1/Ho	0,511
R2/Ho	0,211

Sustituyendo en la ecuación de perfil  $\frac{y}{Ho} = -K * \left(\frac{x}{Ho}\right)^n$

Se obtienen las relaciones de Xc, Yc, R1 y R2

Xc =	0,0379
Yc =	0,0157
R1 =	0,0736
R2 =	0,0304

Xc y Yc nos da el inicio del paramento para las grafica del perfil

PARAMENTO			
X	Y	X	Y
-0,0379	-0,0157	-0,04	0,02
-0,02	-0,0019	-0,04	0,002
-0,01	-0,00053	-0,04	0,001
0	0		
0,01	-0,001	-0,04	-0,001
0,02	-0,002	-0,04	-0,002
0,03	-0,004	-0,04	-0,004
0,04	-0,01	-0,04	-0,01
0,05	-0,01	-0,04	-0,01
0,06	-0,01	-0,04	-0,0145
0,07	-0,02	-0,04	-0,0193
0,08	-0,02	-0,04	-0,02
0,09	-0,03	-0,04	-0,03
0,1	-0,04	-0,04	-0,04
0,11	-0,04	-0,04	-0,04
0,12	-0,05	-0,04	-0,05
0,13	-0,06	-0,04	-0,06
0,14	-0,07	-0,04	-0,07

- 5) Se grafica el perfil creager con los datos obtenidos

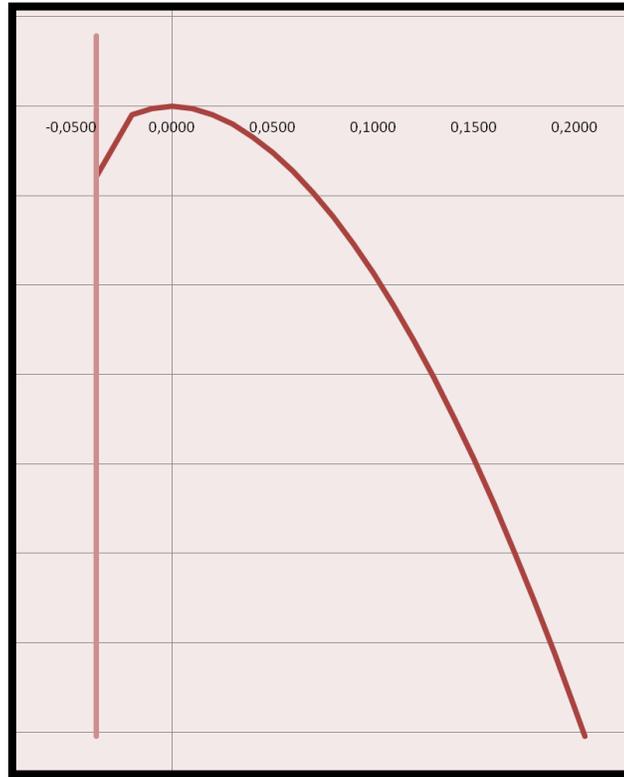


Figura 62. Grafica perfil creager, Fuente: Autor

Una vez diseñado el perfil creager el cual será elemento fundamental para la práctica de resalto hidráulico, se construyo en material de acrílico con las especificaciones de diseño ver anexo

## **CAPITULO V**

### **CONSTRUCCION Y CALIBRACION**

#### **5.1 Construcción**

##### **5.1.1 Tanque de Alimentación y tanque principal**

- Una vez establecidas las dimensiones de estos tanques se pudo conocer de cuanto material se requería para su elaboración.

- Se tomaron dos láminas de acero con dimensiones de 2.40m x 1.20m y espesor de 5 mm para demarcar las piezas que conforman los tanques, las cuales fueron cortadas con oxicorte.

- Luego se procedió a soldar las láminas cortadas con la ayuda de una maquina soldadora y electrodos, posteriormente se utilizó un esmeril para retirar aspereas y excesos de soldaduras.

- Se perforó en el fondo del tanque de alimentación un agujero de 1 pulgada soldándole un niple de ese mismo diámetro, esto se hizo para facilitar el mantenimiento del tanque a la hora de descargarlo.

- Para conectar la bomba al tanque de alimentación se perforó otro agujero de 1 pulgada, se soldó un niple de ese mismo diámetro para conectar con las tuberías y los accesorios correspondiente (en este caso 2 codos de 90°) y posteriormente la bomba.

- Igualmente en el tanque principal se perforó un agujero de 1 pulgada soldándole un niple de ese mismo diámetro, para conectar accesorios y tuberías necesarios para lograr el paso del agua desde el tanque de alimentación hasta este tanque con la ayuda de la bomba.

- Para asegurarse de que no hay grietas en el tanque se probó, llenándolo de agua.

- Para la realización del tanque principal se requirió de un taladro para hacer agujeros que con tornillos empalman con el canal artificial, para evitar posibles filtraciones la junta cuenta con una empaadura realizada con goma a la medida.

- Una vez armados dichos tanques, se procedió a cubrir con pintura anticorrosiva

Para la realización de los tanques antes mencionados se requirió de la ayuda de expertos tanto en el área de cristalería como soldadura.

### **5.1.2 Tanque de Descarga y canal artificial.**

- Se cortaron las láminas de vidrio de acuerdo a lo establecido en el diseño, esto se pudo llevar a cabo con la ayuda de una cortadora especial. Las dimensiones de las láminas fueron las siguientes: dos láminas de 2,40m x 0,42m; una lámina de 2,40m x 0,14m para el canal principal y para el tanque de descarga se necesitaron tres láminas de 0,70m x 0,30m y una lámina de 0,30m x 0,30m

- Se pegaron las láminas con un material especial utilizado en trabajos con vidrio, llamado sellador de silicón. Se utilizó cinta adhesiva (tirro), para sujetar las piezas del canal garantizando secar el sellador de silicón las piezas que conforman el canal se mantuvieran en su lugar y sin filtraciones.

- Tanto el canal artificial como el de descarga se realizaron marcos de refuerzo metálico hecho con ángulos 3/4 los cuales fueron cortados

manualmente, con dimensiones acorde a lo requerido, este marco ayuda a prevenir que la fuerza de empuje producida por el agua haga fallar el material del cual fueron hechas estas partes del equipo hidráulico, mientras que en la parte superior se colocó un perfil 'u' de aluminio para evitar posibles daños al momento de ser utilizado el equipo en la realización de las practicas.

- Se corto un pedazo de lámina de acrílico para la compuerta de cola movable que irá al final del tanque de descarga, se ajustó con dos gomas laterales para que se pudiera deslizar en el ángulo deseado. Las dimensiones de esta lámina son: 0,14m x 0,10m.

### **5.1.3 Soporte del Equipo**

- Para realizar el soporte del equipo se utilizaron barras de hierro de 5/8 pulgadas, que se cortaron con la ayuda de oxicorte, logrando las dimensiones requeridas de acuerdo al diseño establecido.

- Se soldó primero lo que correspondía al soporte del tanque de alimentación, su esqueleto principal, este por ser tan pesado se reforzó con tres tramos para mayor seguridad.

- Se le anexo al soporte del tanque de alimentación una base lo suficientemente larga para colocar la bomba.

- Seguidamente se soldó el soporte para el tanque principal.

- Con la ayuda del esmeril se procedió a quitar los detalles que sobresalían del soporte para darle un mejor acabado.

- Por último se pintó el soporte con esmalte anticorrosivo, luego se pintó el soporte con pintura de aceite. El anticorrosivo se aplicó con brocha mientras que la pintura de aceite del soporte se le aplicó con un compresor.

## 5.2 Materiales y equipos para la construcción

### 5.2.1 Construcción de los tanques de hierro y soportes:

#### ➤ Láminas de Hierro.

El hierro es un elemento metálico, maleable, magnético, plateado o de color blanco, se encuentra en la naturaleza formando parte de numerosos minerales, es el metal más usado, con el 95% en peso de la producción mundial de metal.

Para la construcción de los tanques de alimentación y principal de utilizaron láminas de 2.40mx 1.20m con un espesor de 5 mm

Entre las ventajas que ofrece este material tenemos:

- No se dobla, rompe o cambia de forma. Posee larga vida económica.
- Permite acabados rectos y esquinas cuadradas.
- Posee alta resistencia a la rotura.
- Posee alta tenacidad, esta propiedad nos expresa el trabajo que realiza un metal, cuando es sometido a esfuerzos exteriores que lo deforman hasta la rotura. Esta característica nos define la trabajabilidad del metal.
- Posee conductividad eléctrica y térmica.
- Cuando se incrementa la temperatura este metal tiende a dilatarse.

Desventajas:

- Se puede producir la oxidación y la corrosión.

➤ **El oxicorte**

Es una técnica auxiliar a la soldadura, que se utiliza para la preparación de los bordes de las piezas a soldar cuando son de espesor considerable, y para realizar el corte de chapas, barras de acero al carbono de baja aleación u otros elementos ferrosos.

➤ **Máquina de soldar**

Es una herramienta que es usada principalmente para la unión de piezas, mediante la aplicación del calor. Estas máquinas necesitan para trabajar la energía, la cual proviene de un arco de electricidad, la soldadura se lleva a cabo por la acción de dos tipos de rayos (láser y de electrones), la acción del procedimiento de fricción e incluso del de ultrasonido.

Hay que tener en cuenta que las máquinas de soldar son herramientas simples, pero ser utilizadas correctamente se requieren de conocimiento eléctrico puesto que será la energía eléctrica la que estaremos usando, además necesitaremos al menos un voltímetro y un amperímetro para leer la salida de corriente

En las máquinas de soldar encontramos las partes fijas, las partes eléctricas, las electrónicas y mecánicas.

Durante el uso de una máquina de soldar es necesario adoptar ciertas medidas de seguridad que comprenden el uso de mascara para soldar adecuada y guantes como mínimo

➤ **Electrodos**

Se utilizaron electrodos para soldar el soporte del equipo los tanques de alimentación y principal. El electrodo puede ser consumible, en el caso de la soldadura con gas metal o la soldadura blindada, o no consumible, como la soldadura con gas tungsteno. Para un sistema de corriente directa, la

barra de soldadura puede ser el cátodo para una soldadura de tipo llenado o el ánodo para cualquier otro tipo de soldadura.

➤ **Esmeril angular**

Amoladora angular, galletera o radial, es una herramienta usada para cortar, esmerilar y para pulir.

Un esmeril angular se puede impulsar con un motor, el cual impulsa una cabeza de engranajes en un ángulo recto en el cual está montado un disco abrasivo o un disco de corte más delgado los cuales pueden ser reemplazados cuando se desgastan. Los esmeriles angulares típicamente tienen un protector ajustable para su operación con cualquiera de las dos manos. Ciertas amoladoras angulares, dependiendo de su rango de velocidad, pueden utilizarse como lijadoras utilizando un disco lijador con una almohadilla de apoyo. El sistema protector usualmente esta hecho de un plástico duro, resina fenólica o caucho de media dureza dependiendo de la cantidad de flexibilidad deseada

Los esmeriles angulares pueden ser utilizados tanto para eliminar el material sobrante de las piezas como para cortar en pedazos. Hay muchas clases diferentes de discos que se usan para diversos tipos de materiales y trabajos: discos de corte (hoja de diamante), discos rectificadores abrasivos, piedras demoledoras (rectificadoras), discos lijadores, ruedas de cepillo de alambre y almohadillas para pulir.

➤ **Taladro**

Este está diseñado para el agujereado, huecos cilíndricos o cónicos, de una superficie de la forma más rápida, precisa y fácil. Los materiales que pueden trabajarse son desde paredes de hormigón, azulejos, hierro, madera, en resumen todo tipo de materiales, solo tenemos que buscar la broca apropiada. Pero, aunque el agujereado es su función principal, la gran

difusión del taladro ha propiciado la adaptación de numerosos accesorios para otros trabajos. Esos accesorios permiten el lijado, desbaste, pulido, corte, cepillado, torneado, etc.

### ➤ **Pintura**

Para pintar el equipo se escogió entre los diferentes tipos de pintura que se encuentran en el mercado. Entre ellas tenemos:

**Pintura al aceite:** Tiene como conglomerantes y como aglutinante aceites vegetales secantes. No se recomienda mezclar con resinas duras. Muy utilizadas anteriormente por su flexibilidad y penetración sobre bases porosas.

**Esmalte graso:** Está compuesto por aceites secantes mezclados con resinas duras naturales o sintéticas. Posee buen brillo, buena extensibilidad, tiene un secado y endurecimiento lento que se retrasan con el frío. Se utiliza en interiores como esmalte de acabado.

**Esmalte sintéticos:** Se obtienen por combinación química de resinas duras y aceites secantes. Las resinas más empleadas son las alquílicas, que tienen gran dureza, buen brillo, resisten agentes químicos e intemperie y, al combinarse con los aceites, tienen gran flexibilidad. Secan con rapidez. Gran brillo, incluso al exterior. Se utilizan mucho en decoración y protección de superficies de madera y sobre metal, tanto en exteriores como en interiores. También se utilizan como imprimaciones anticorrosivas, aunque necesitan primero una preparación esmerada si se utiliza sobre metal.

**Pinturas de resinas:** Se obtienen a base de un derivado clorado del caucho. Resisten agentes atmosféricos, agua y agentes químicos. Son

impermeables. Poseen un secado rápido. Se utiliza sobre superficies de hormigón, acero, depósitos de cemento, marcas viales, piscinas, etc.

### **5.2.2 Construcción del canal artificial y tanque de descarga:**

#### **➤ Láminas de vidrio**

Es el material más utilizado por su versatilidad, su transparencia, su rigidez y sobre todo por permitir un acabado limpio y sobre todo muy estético.

Como ventajas por tanto las tiene casi todas, aunque su principal inconveniente radica en sus limitaciones físicas a la hora de servir como elemento de contención de agua. Esto se debe a su baja resistencia a flexión en comparación con otros materiales de construcción que nos obligarán a tener en cuenta ciertos parámetros indispensables para su utilización.

Para la construcción de los accesorios necesarios para la realización de las prácticas correspondientes a descarga por vertedero y resalto hidráulico se utilizó acrílico con un espesor de 5mm. El peso del acrílico es más liviano que el vidrio, la mitad. Puede ser encontrado a partir de 2 milímetros hasta 100 milímetros y con diversos acabados de superficie; satinado, rayas, prismas y texturas decorativas.

El acrílico es un material plástico altamente flexible, capaz de soportar largos periodos de tiempo a la intemperie. Tiene su aplicación y uso en diversos sectores, entre ellas se mencionan: publicitario, industrial, científico, construcción y transporte, entre otros.

Entre las principales ventajas que posee este material es que es muy versátil, puede fácilmente adquirir formas por diversos métodos y posee diversos acabados aplicables en pintura. Otra ventaja es su durabilidad, no presenta daños cuando está expuesto a largos periodos de tiempo y a la

intemperie y sobre todo a rayos ultravioletas, manteniendo sus colores y brillo.

Es un material más seguro que el vidrio porque no se astilla y es un excelente aislante eléctrico. Además se pueden cambiar sus colores obteniendo tonos perlados, transparentes, translucidos y fosforescentes.

➤ **Sellador de Silicón de secado rápido.**

Formulado para rellenar juntas de vidrio, aluminio, metales, cerámica, madera, fibra de vidrio y otros.

SILIPEX es el sellador de silicona multipropósito que crea una barrera al paso de aire, agua y otras sustancias de un ambiente a otro. Por su flexibilidad, resistencia, durabilidad y economía es la solución ideal para variadas aplicaciones tanto en el interior del hogar, como en el exterior del mismo muy elástico y no se agrieta, resistente al agua y al sol. Este tipo de sellador de silicón fue utilizado para el armando del canal artificial y el tanque de descarga.

➤ **Pistola de Silicón**

Está hecha de metal, en ella se inserta el sellador de silicona Esta pistola es un cilindro circular de metal que recibe un tubo de sellador de silicona. Tiene un vástago de metal dentro que empuja a través de la parte trasera del tubo de sellador de silicona y fuerza a salir por la punta el extremo del tubo de silicona. Presionando un mango en el extremo de la pistola de masilla, puedes controlar la cantidad de silicona dispensada.

➤ **Cinta adhesiva**

La cinta adhesiva se utiliza para unir objetos de manera temporal, o a veces también permanente. La cinta adhesiva contiene

una emulsión adhesiva por una cara, aunque existen variedades adhesivas por ambas caras. Se elabora con caucho sin tratar

### **5.2.3 Para las conexiones**

#### **➤ Tuberías Plásticas PVC (Poli cloruro de Vinilo Rígido)**

Se utilizaron tuberías PVC de 1" de diámetro para las conexiones.

Dentro de la gama de tuberías plásticas se encuentran las tuberías de PAVCO, algunas características se mencionan a continuación:

- Tiene una elevada resistencia a la abrasión, junto con una baja densidad, buena resistencia mecánica y al impacto, lo que la hace común e ideal para la edificación y construcción.
- Al utilizar aditivos tales como estabilizantes, plastificantes, entre otros, el PVC puede transformarse en un material rígido o flexible, característica que le permite ser usado en gran número de aplicaciones.
- Es un material altamente resistente, los productos de PVC pueden durar hasta más de sesenta años, como se comprueba en las aplicaciones tales como tuberías para la conducción de aguas potables y sanitarios.
- Posee alta resistencia a la electrolisis.
- Bajo costo de instalación y manejo, ya que ahorra en gastos de equipo especial para unir y transportar las tuberías en relación con las metálicas.
- Posee facilidad de instalación.
- Baja conductividad térmica.

- Resistente a la corrosión, esta tubería es inmune al daño causado con la corrosividad natural del suelo, esto es realmente ventajoso en comparación a la tubería metálica.

➤ **Accesorios en PVC**

Codo: Accesorio de tubería que tiene una curva a 90 grados, empleada para desviar la dirección recta de la misma.

Uniones tipo pvc: Este tipo de unión tiene muchas ventajas con respecto a las otras uniones como resistencia a la corrosión, a la acción electrolítica que destruye las tuberías de cobre, las paredes lisas y libres de porosidad que impiden la formación de incrustaciones comunes en las tuberías metálicas proporcionando una vida útil mucho más larga con una mayor eficiencia, este tipo de uniones proporciona alta resistencia a la tensión y al impacto; por lo tanto pueden soportar presiones muy altas, como también pueden brindar seguridad, comodidad, economía. Entre ellas tenemos: TEE, terminal de rosca macho, terminal de rosca hembra, tapón de tubería.

➤ **Válvulas:**

Las válvulas son uno de los instrumentos de control más esenciales en la industria, estas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar en este caso el agua que es el elemento con el que se va a trabajar.

En el mercado las válvulas que se pueden encontrar son:

- Válvulas de compuerta.
- Válvulas de globo.

Se estudiarán válvulas de diámetro de 1", según el diseño escogido.

## CAPITULO VI

### RESULTADOS

Ensayo 1

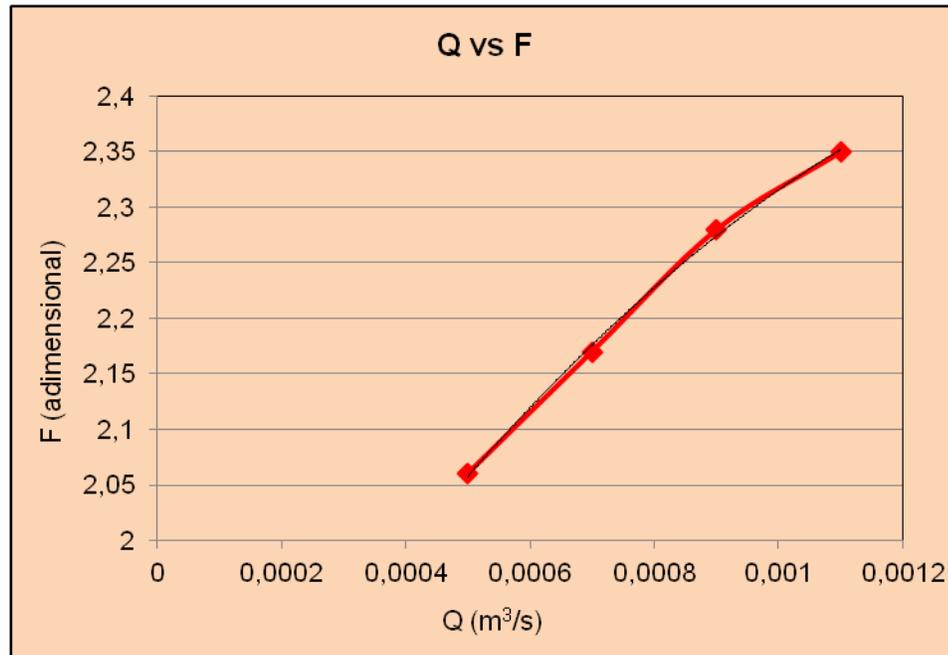
Para la práctica de resalto hidráulico se obtuvieron los siguientes datos y resultados:

**Datos:**

Abertura de la llave	Altura del agua (m)	Ángulo de inclinación (°)	Profundidad aguas abajo (Y1) (m)	Profundidad aguas arriba (Y2) (m)	Longitud del resalto (m)
1	0.025	10°	0.009	0.045	0.43
2	0.021	10°	0.008	0.042	0.40
3	0.019	10°	0.008	0.029	0.34
4	0.015	10	0.007	0.025	0.29

**Tabla de resultados:**

Altura del agua(h) (m)	L (m <sup>2</sup> )	Q (m <sup>3</sup> /s)	V (m/s)	F	q (m <sup>3</sup> /s/m)	$\Delta E$	$E_2/E_1$	hj	resalto
<b>0,025</b>	0,14	0.0011	0.700	2.35	0.0078	0.023	0.85	0.036	Salto débil
<b>0,021</b>	0,14	0.0009	0.641	2.28	0.0064	0.0233	0.86	0.034	Salto débil
<b>0,019</b>	0,14	0.0007	0.610	2.17	0.0050	0.008	0.88	0.021	Salto débil
<b>0,015</b>	0,14	0.0005	0.542	2.06	0.0036	0.007	0.90	0.018	Salto débil

**Grafica caudal vs Froude**

A medida que aumenta el caudal se origina un aumento en el número de Froude. Debido a la variación de la altura de agua, cuando esta es mayor la velocidad va a ser mayor por ende el caudal aumenta y, la energía a disipar será mayor.

## Ensayo 2

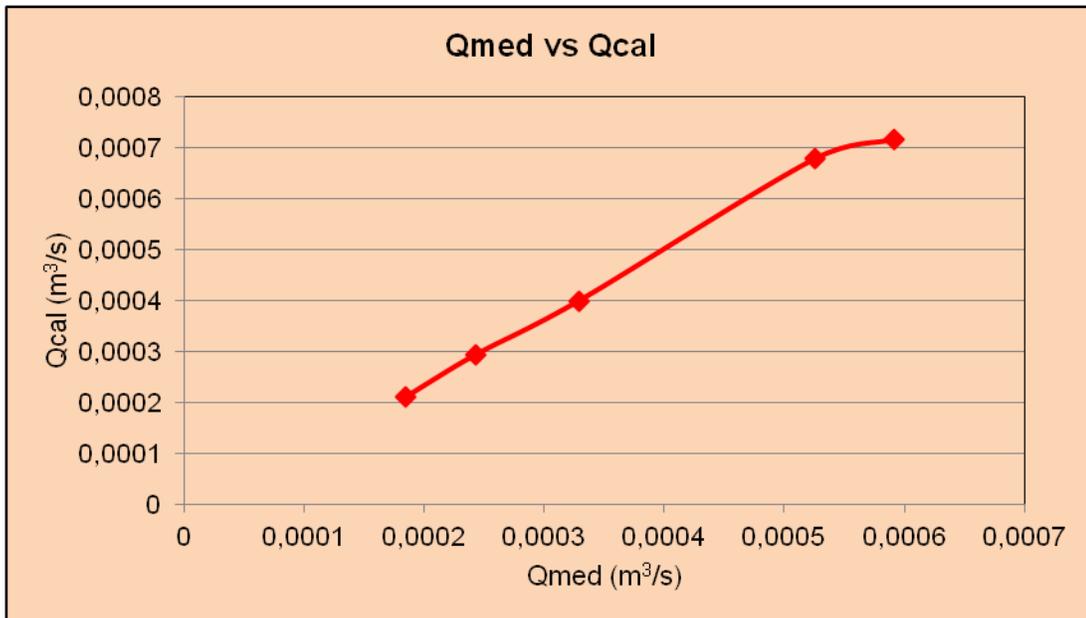
Para la práctica de descarga por vertedero se obtuvieron los siguientes datos y resultados

**Datos**

Abertura de la válvula	Altura en el vertedero "h" (cm)	Aforo	
		Volum en (ml)	Tiemp o (s)
1	1,50	160,00	0,70
2	1,80	220,00	0,81
3	2,20	285,00	0,62
4	3,00	210,00	0,33
5	3,20	330,00	0,46

**Tabla de resultados**

Abertura de la válvula	Altura en el vertedero "h" (cm)	Qcal (m <sup>3</sup> /s)	Qcali (m <sup>3</sup> /s)	Qreal (m <sup>3</sup> /s)	Qaforo (m <sup>3</sup> /s)
1	1,50	0,000185	0,000148	0,000179	0,000229
2	1,80	0,000243	0,000212	0,000253	0,000272
3	2,20	0,000329	0,000295	0,000347	0,000460
4	3,00	0,000525	0,000512	0,000595	0,000636
5	3,20	0,00	0,00	0,00	0,00
		0591	0542	0629	0717

**Caudal medido (Qmed) vs Caudal calculado (Qcal)**

Según los resultados obtenidos, se puede decir que la altura del vertedero es directamente proporcional a los caudales. A medida que la altura del vertedero aumenta por acción de una abertura de válvula mayor, se incrementa progresivamente el volumen de agua por unidad de tiempo y a su vez el caudal.

Se observa la relación directamente proporcional entre el caudal medido y el caudal calculado. Dicha relación presenta un comportamiento o tendencia lineal.

## **CAPITULO VII**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- En el canal se pueden generar distintos tipos de flujo, sean estos sub-critico, críticos y supercríticos.
- El equipo puede soportar diferentes tipos de vertederos, ya sean estos de pared delgada o gruesa.
- Al considerar las alternativas de diseño se eligió la opción que permite la realización de prácticas para el estudio de descarga por vertedero y resalto hidráulico, tomando en cuenta los materiales existentes en la zona.
- En cuanto a los ensayos realizados y sus resultados, se pudo concluir que los mismos están influenciados por la capacidad y potencia de la bomba con la cual se pone en funcionamiento el equipo.
- Mediante el estudio del resalto hidráulico se pudo observar que el ángulo de inclinación de la compuerta de cola es de vital importancia para el estudio de los diferentes tipos de resalto.
- Para la realización de las prácticas se recomienda seguir el instructivo con las indicaciones para el correcto uso del equipo.
- En cuanto a los accesorios para realizar las practicas (vertederos) debido a que las láminas de acrílico son de material termoplástico, no se deben almacenar cerca de fuentes de calor. De igual manera debe evitarse el contacto con vapores solventes, ya que son atacados por algunos de ellos.
- Para la realización de las practicas se recomienda llenar el tanque de alimentación un día antes debido al factor tiempo, a su vez es conveniente vaciar dicho tanque después de haber realizado las practicas, para evitar estancamiento de agua y malos olores

## BIBLIOGRAFÍAS

- Almeida, M. y Cesin, E. (2010). *Construcción de un Equipo para el Estudio del Resalto Hidráulico* [Tesis en línea]. Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui, Venezuela. Consultada el 21 de febrero del 2015 en: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2537/1/0TESISIC010A33.pdf>
- Arismendi, E. (2013). *Tipos y diseño de la investigación*. [Documento en línea]. Disponible en: [http://planificaciondeproyectosemirarismendi.blogspot.com/2013/04/tipos-y-diseno-de-la-investigacion\\_21.html](http://planificaciondeproyectosemirarismendi.blogspot.com/2013/04/tipos-y-diseno-de-la-investigacion_21.html). [Consulta: 2015, Mayo 21].
- Blancos, C. (2008). *Epistemología del proyecto factible*. [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.entorno-empresarial.com/articulo/1926/epistemologia-del-proyecto-factible> [Consulta: 2016, Abril 21].
- Carvajal, A. (2010). *Construcción y calibración de un equipo hidráulico para el estudio de compuertas sumergidas* [Tesis en línea]. Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui, Venezuela. Consultada el 21 de febrero del 2015 en: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2575/15TESISIC010C23.pdf>
- Chow, V. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. (2<sup>d a</sup> ed.). España: McGraw-Hill.
- Longart, M. y Manzano, A. (2010). *Construcción de un equipo hidráulico para el estudio de pérdidas por fricción y accesorios* [Tesis en línea]. Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui, Venezuela. Consultada el 21 de febrero del 2015 en: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2589/1/30TESISIC010L50.pdf>
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de los fluidos y máquinas hidráulicas* (2<sup>d a</sup> ed.). Algete, Madrid: Ediciones del Castillo S.A
- Rocha, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*. Lima, Perú
- Velásquez, J. y Muñoz, E. (2010). *Construcción de un equipo hidráulico para el estudio de bomba centrífuga y descarga por vertedero triangular* [Tesis en línea]. ]. Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui, Venezuela. Consultada el 21 de febrero del 2015 en: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2606/1/45-TEISISIC010V.pdf>

Villón, M. (2007). *Hidráulica de canales* (2<sup>d</sup> a ed.). Lima, Perú: Villon

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO**

<b>TÍTULO</b>	CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO HIDRÁULICO PARA EL ESTUDIO DE DESCARGA POR VERTEDEROS Y RESALTO HIDRÁULICO, CASO: UNIVERSIDAD DE ORIENTE- EXTENSIÓN CANTAURA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CVLAC / E MAIL</b>
Díaz Rodríguez, Marling Belén	<b>CVLAC:</b> V- 20.712.818 <b>E MAIL:</b> mbelendiazr@gmail.com
Segnini Rodriguez, Eliezer David	<b>CVLAC:</b> V- 20.648.300 <b>E MAIL:</b> eliezer.segnini@gmail.com
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>
	<b>CVLAC:</b> <b>E MAIL:</b>

**PALABRAS O FRASES CLAVES:**

Construcción

Equipo hidráulico

Descarga por vertedero

Resalto hidráulico

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>ÁREA</b>	<b>SUB ÁREA</b>
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Civil

**RESUMEN (ABSTRACT):**

El objetivo principal de esta investigación consistió en la construcción de un equipo hidráulico que permita el estudio de resalto y descarga por vertedero en el laboratorio de Ingeniería Civil en la universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui- Extensión Cantaura, con la finalidad de brindar a los estudiantes de esta casa de estudio la oportunidad de obtener conocimientos mediante la realización de prácticas de laboratorio, reforzando así los conocimientos teóricos ya obtenidos. Para ello fue necesario el estudio de los materiales existentes en la zona así como la realización de planos para concretar el diseño del equipo mediante la utilización de Autocad y SAP 2000, seguidamente se procedió a la construcción y calibración del mismo para la ejecución de los ensayos pertinentes, por último se seleccionaron las guías que permiten el realizar las prácticas correspondientes.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL</b>				
González Hernández, Anabel Yoedelin	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS (X)</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>	V- 16.573.233			
	<b>E_MAIL</b>	anabelyoedelin@hotmail.com			
	<b>E_MAIL</b>				
Martínez Guerra, Jhonatan Alex	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU (X)</b>
	<b>CVLAC:</b>	V- 15.376.400			
	<b>E_MAIL</b>	ingmartinezgj@gmail.com			
	<b>E_MAIL</b>				
Medina Ramos, Mary Carmen	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU (X)</b>
	<b>CVLAC:</b>	V- 14.804.614			
	<b>E_MAIL</b>	mary.carmen.medina.2014.mm@gmail.com			
	<b>E_MAIL</b>				
	<b>ROL</b>	<b>CA</b>	<b>AS</b>	<b>TU</b>	<b>JU</b>
	<b>CVLAC:</b>				
	<b>E_MAIL</b>				
	<b>E_MAIL</b>				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

<b>2016</b>	<b>10</b>	<b>21</b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

<b>NOMBRE DE ARCHIVO</b>	<b>TIPO MIME</b>
TESIS. Construcción de Equipo Hidráulico para el Estudio de Descarga por Vertederos y Resalto Hidráulico, Caso: Universidad de Oriente- Extensión Cantaura Departamento de Ingeniería Civil.doc.	Aplicación/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L  
M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5  
6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** (OPCIONAL).

**TEMPORAL:** (OPCIONAL)

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero Civil

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pregrado

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Ingeniería Civil

**INSTITUCIÓN:** Universidad de Oriente / Extensión Cantaura



UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
CONSEJO UNIVERSITARIO  
RECTORADO

CUN°0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano  
**Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ**  
Vicerrector Académico  
Universidad de Oriente  
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Leído el oficio SIBI - 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE	
SISTEMA DE BIBLIOTECA	
RECIBIDO POR	<i>[Signature]</i>
FECHA	05/8/09
HORA	5:30

Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

Cordialmente,

*[Signature]*  
**JUAN A. BOLANOS CUMBELE**  
Secretario



C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Telemática, Coordinación General de Postgrado.  
JABC/YGC/maruja

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo al Artículo 41 del Reglamento de trabajos de grado:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo”

---

Segnini R. Eliezer D.

**AUTOR**

---

Díaz R. Marling B.

**AUTOR**

---

Prof. Anabel González

**TUTOR**

---

Prof. Jhonatan Martínez

**JURADO**

---

Prof. Mary Medina

**JURADO**

---

Prof. Loaiza Ramón

**POR LA COMISIÓN DE TRABAJO DE GRADO**