

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

**ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AGRÍCOLA**



**“PROGRAMA PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO Y
ESTRUCTURAL DE BOCATOMAS TIPO BARRAJE
CON EL VISUAL BASIC 9.0 – HUAMANGA –
AYACUCHO – 2011”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:

CESAR VIDAL GUTIÉRREZ NINAHUAMÁN

AYACUCHO - PERÚ

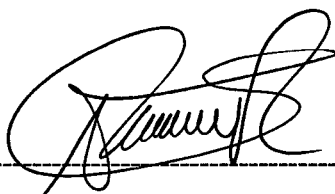
2014

Tesis
IAE44
Eut
Ej. 1

**“PROGRAMA PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DE BOCATOMAS
TIPO BARRAJE CON EL VISUAL BASIC 9.0 – HUAMANGA - AYACUCHO, 2011”**

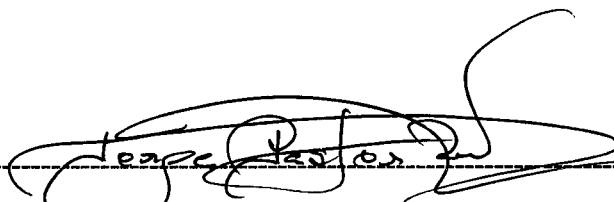
Recomendado : 10 de Octubre del 2014

Aprobado : 29 de Octubre del 2014



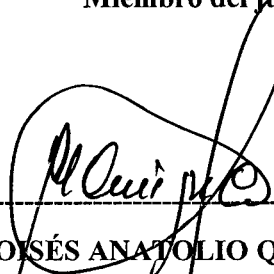
M.Sc. RUBÉN ALFREDO MENESES ROJAS

Presidente del jurado



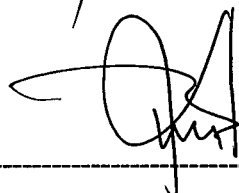
M.Sc. JORGE EDMUNDO PASTOR WATANABE

Miembro del jurado



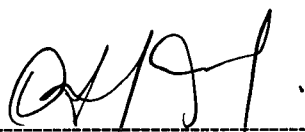
Ing. MOISÉS ANATOLIO QUISPE CADENAS

Miembro del jurado



Ing. LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR

Miembro del jurado



Dr. ROMULO AGUSTIN SOLANO RAMOS

Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias

A Dios ante todo, por permitirme la vida, darme la sabiduría y guiar mi camino.

A mis padres Valentín Gutiérrez H., y Juana Ninahuamán Ch. a mis hermanos Jorge, Andrea, Rolanda, Froilán, Artemio, Uvaldina, y toda mi familia, por su apoyo, consejos, y darme el aliento para salir a delante.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres responsables de mi existencia, que deseosos de verme alcanzar mis metas, me enseñaron que todas las cosas se logran con el deseo de quererlos lograr.

Agradezco de todo corazón a mis hermanos y demás familiares por su paciencia, comprensión y apoyo en todo momento.

A mis amigos de la Universidad Nacional de San de Cristóbal de Huamanga por darme el aliento, confianza y no desvanecer en el desarrollo de mi trabajo de investigación, gracias nuevamente a ellos.

Al Ing. Jorge E. Pastor Watanabe por apoyarme con el asesoramiento de la presente tesis.

RESUMEN

El presente trabajo de tesis muestra el desarrollo de un software de aplicación, para el diseño hidráulico y estructural de bocatomas tipo barraje. Se definirán en primera instancia los aspectos preliminares previos al diseño de bocatomas, seguidamente se realizará el diseño hidráulico, para finalmente concluir con el diseño estructural de esta obra hidráulica.

El software desarrollado tiene la denominación “**Diseño Hidráulico y Estructural de Bocatomas tipo Barraje**”, con su acrónimo DHEBB V2.0.0, es una herramienta que permite a estudiantes, profesionales, y personas inmersas en el tema de Bocatomas, hacer el diseño rápido, preciso y confiable de bocatomas tipo barraje, evitando de esta manera hacer el trabajo manual laborioso, y el uso de hojas de cálculo poco confiables, ya con el transcurso del tiempo cada usuario va modificando de acuerdo a sus necesidades, y datos con que cuenta en el momento del diseño.

La presente aplicación consiste en: diseño del canal de derivación, definición del ancho de encauzamiento, coeficiente de rugosidad del río, características hidráulicas del río, diseño de ventanas de captación y zona de limpia, perfil del flujo ventana-canal de derivación, diseño de barraje vertedor, diseño del dissipador de energía, determinación del contorno subterráneo de la presa, muro de encauzamiento y estudio de la curva de remanso, socavación del cauce, diseño de muros de encauzamiento, diseño de muros laterales, análisis de estabilidad del barraje. Adicionalmente el software tiene varias herramientas, cada una con diferente finalidad.

La validación del software se realizó de acuerdo a la siguiente precisión:

- Se usó el DHEBB V2.0.0 para diseñar una bocatoma, ubicada en el distrito de El Carmen, provincia de Churcampa, departamento de Huancavelica (Primeramente se realizó el cálculo manual, y posteriormente usando el DHEBB V2.0.0, al comparar los resultados se aprecia que coinciden exactamente).
- Se usó el DHEBB V2.0.0 para diseñar una bocatoma existente, ubicada en la costa del Perú, provincia de Cañete, distrito de San Vicente.

Finalmente, se presenta el manual de usuario sobre los procedimientos de cálculo a utilizar, con base a los ejemplos evaluados.

El programa se desarrolló bajo la filosofía de la programación orientada a objetos utilizando el lenguaje de programación Visual Basic, trabajando con el Visual Studio 2010, así como el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) Basic, para la creación de una interfaz gráfica de usuario de aplicación sencilla y práctica.

ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|-----------------------------------|-------|
| Caratula | |
| Dedicatoria..... | i |
| Agradecimientos..... | ii |
| Resumen..... | iii |
| Índice..... | v |
| Índice de figuras y gráficos..... | xiv |
| Índice de tablas..... | xviii |

I. INTRODUCCIÓN

| | |
|--------------------------------------|---|
| 1.0) INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1) ANTECEDENTES..... | 2 |
| 1.2) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.3) JUSTIFICACIÓN..... | 3 |
| 1.4) OBJETIVOS..... | 3 |
| 1.4.1) Objetivo general..... | 3 |
| 1.4.2) Objetivos específicos..... | 4 |

II. REVISIÓN DE LITERATURA

| | |
|--|----|
| 2.0 GENERALIDADES SOBRE LAS ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN..... | 5 |
| 2.1) DEFINICIÓN..... | 5 |
| 2.2) PARTES QUE CONFORMA UNA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN..... | 5 |
| 2.3) PRINCIPALES TIPOS DE BOCATOMAS..... | 7 |
| 2.4) CONDICIONES QUE DEBEN DE CUMPLIR LAS OBRAS DE CAPTACIÓN..... | 9 |
| 2.5) CONDICIONES QUE DEBEN DE CUMPLIR LOS RÍOS..... | 9 |
| 3.0 INFORMACION REQUERIDA PARA SU DISEÑO..... | 10 |
| 3.1) UBICACIÓN..... | 10 |
| 3.1.1) Angulo de derivación..... | 10 |
| 3.1.2) Influencia de la curvatura..... | 13 |
| 3.2) ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS..... | 15 |

| | |
|--|----|
| 3.3) ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS..... | 15 |
| 3.4) ESTUDIOS HIDROLÓGICOS..... | 16 |
| 3.5) ESTUDIO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS..... | 17 |
| 3.6) ESTUDIO ECONÓMICO..... | 17 |
| 3.7) CONDICIONES ECOLÓGICAS..... | 17 |
| 3.8) OTROS REQUERIMIENTOS..... | 18 |
| | |
| 4.0 HIDRAULICA FLUVIAL APLICADO AL DISEÑO DE BOCATOMAS..... | 19 |
| 4.1) TIPOS DE ESTABILIDAD..... | 19 |
| 4.1.1) Estabilidad estática..... | 19 |
| 4.1.2) Estabilidad dinámica..... | 19 |
| 4.1.3) Estabilidad morfológica..... | 19 |
| 4.2) GRADOS DE LIBERTAD..... | 20 |
| 4.2.1) Escurrimiento con un grado de libertad..... | 20 |
| 4.2.2) Escurrimiento con dos grados de libertad..... | 20 |
| 4.2.3) Escurrimiento con tres grados de libertad..... | 20 |
| 4.3) GASTO FORMATIVO..... | 20 |
| 4.4) CAUCES ESTABLES..... | 21 |
| 4.4.1) Método de Blench..... | 22 |
| 4.4.2) Método de Altunin..... | 23 |
| 4.4.3) Método de Pettit..... | 29 |
| 4.4.4) Otros métodos..... | 30 |
| 4.5) SOCAVACIÓN..... | 30 |
| 4.5.1) Calculo de la forma de socavación..... | 31 |
| 4.5.2) Calculo de la socavación general por contracción..... | 32 |
| 4.5.3) Calculo de la socavación local en muros de encauzamiento..... | 36 |
| | |
| 5.0 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RIO..... | 42 |
| 5.1) TALUD DE LAS MÁRGENES DEL RÍO..... | 42 |
| 5.2) COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DEL RÍO..... | 42 |
| 5.3) CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO NATURAL..... | 46 |
| 5.4) CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO ENCAUZADO..... | 49 |
| | |
| 6.0 CANAL DE DERIVACIÓN..... | 51 |
| 6.1) DEFINICIÓN..... | 51 |

| | |
|---|----|
| 6.2) ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LOS CANALES..... | 51 |
| 6.2.1) Relaciones geométricas en canales trapezoidales..... | 52 |
| 6.2.2) Relaciones geométricas en canales rectangulares..... | 53 |
| 6.3) FLUJO UNIFORME..... | 53 |
| 6.3.1) Velocidad en flujo uniforme..... | 55 |
| 6.4) ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA..... | 55 |
| 6.4.1) Formula de Bazin..... | 55 |
| 6.4.2) Formula de Ganguillet – Kutter..... | 56 |
| 6.4.3) Formula de Manning..... | 57 |
| 6.5) SECCIÓN DE MÁXIMA EFICIENCIA HIDRÁULICA..... | 58 |
| 6.5.1) Definición de los parámetros del canal de MEH..... | 59 |
| 6.6) CRITERIOS DE DISEÑO PARA CANALES..... | 60 |
| 6.6.1) Velocidad máxima y mínima permisible..... | 60 |
| 6.6.2) Ancho de solera..... | 60 |
| 6.6.3) Borde libre..... | 61 |
| 7.0 PERFIL DEL FLUJO VENTANA DE CAPTACIÓN – CANAL DE DERIVACIÓN..... | 63 |
| 7.1) DEFINICIÓN..... | 63 |
| 7.2) VENTANAS DE CAPTACIÓN..... | 63 |
| 7.2.1) Rejillas en ventana de captación..... | 63 |
| 7.2.2) Altura de las ventanas de captación..... | 65 |
| 7.2.3) Ancho de las ventanas de captación..... | 66 |
| 7.3) BARRAJE VERTEDOR O AZUD..... | 66 |
| 7.3.1) Altura del barraje..... | 66 |
| 7.3.2) Longitud del barraje..... | 67 |
| 7.3.3) Carga de agua sobre el barraje..... | 68 |
| 7.4) ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL FLUJO (VENTANA DE CAPTACIÓN – CANAL DE DERIVACIÓN)..... | 69 |
| 7.4.1) Dimensionamiento de la compuerta de admisión..... | 71 |
| 7.4.2) Dimensionamiento del canal de aducción..... | 72 |
| 7.5) DIMENSIONAMIENTO DEL DESRIPIADOR..... | 72 |
| 7.6) DIMENSIONAMIENTO DEL CANAL DE TRANSICIÓN..... | 74 |
| 7.6.1) Definición del desnivel en transición..... | 75 |

| | |
|---|-----|
| 7.7) CAUDAL MÁXIMO DE DERIVACIÓN..... | 75 |
| 7.7.1) Diseño del vertedor de excedencias..... | 76 |
| 7.8) COMPUERTA DE DESRIPIADOR..... | 79 |
| 7.9) PRINCIPALES COTAS VENTANA DE CAPTACIÓN – CANAL DE DERIVACIÓN..... | 82 |
| 8.0 DISEÑO DE LA ZONA DE LIMPIA..... | 85 |
| 8. 1) GENERALIDADES..... | 85 |
| 8.2) DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO..... | 85 |
| 8.2.1) Ancho de la compuerta de limpia..... | 85 |
| 8.2.2) Altura de la compuerta de limpia..... | 87 |
| 8.2.3) Pendiente del canal de limpia..... | 89 |
| 8.2.4) Velocidad en canal de limpia..... | 89 |
| 8.3) RECOMENDACIONES DE DISEÑO..... | 90 |
| 8.3.1) Velocidad de arrastre en canal limpia..... | 90 |
| 8.3.2) Consideraciones finales en el canal de limpia..... | 91 |
| 9.0 PERFIL DEL BARRAJE VERTEDOR..... | 92 |
| 9.1) ASPECTOS GENERALES..... | 92 |
| 9.2) CONDICIONES DE DISEÑO..... | 92 |
| 9.3) CAPACIDAD DE DESCARGA..... | 94 |
| 9.4) COEFICIENTE DE DESCARGA..... | 94 |
| 9.4.1) Método de U.S. Bureau of Reclamation..... | 94 |
| 9.4.2) Método de Gehy (1982)..... | 96 |
| 9.5) LONGITUD EFECTIVA DE LA CRESTA..... | 97 |
| 9.6) PERFIL DEL CIMACIO..... | 99 |
| 9.6.1) Perfil de cimacio criterio de diseño según el US Bureau of Reclamation (USBR)..... | 102 |
| 9.6.2) Perfil de cimacio criterio de diseño según la Waterways Experiment Station (WES)..... | 104 |
| 9.6.3) Radio de la curva de descarga (R_3), ángulo del arco de círculo (α)..... | 105 |
| 9.7) DEFINICIÓN DEL PERFIL DE CIMACIO AGUAS ARRIBA DE LA CRESTA..... | 107 |
| 9.7.1) Trazos preliminares..... | 108 |

| | |
|--|-----|
| 9.7.2) Trazos Definitivos..... | 108 |
| 9.7.3) Geometría del perfil del cimacio aguas arriba de la cresta..... | 109 |
| 10.0 DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA..... | 113 |
| 10. 1) ASPECTOS GENERALES..... | 113 |
| 10.2) DISIPADORES DE ENERGÍA..... | 113 |
| 10.3) EL RESALTO HIDRÁULICO..... | 114 |
| 10.3.1) Resalto en canales rectangulares horizontales..... | 114 |
| 10.3.2) Tipos de resalto hidráulico..... | 115 |
| 10.3.3) Características hidráulicas del resalto..... | 117 |
| 10.3.4) Longitud del resalto..... | 121 |
| 10.4) EL RESALTO HIDRÁULICO COMO DISIPADOR DE ENERGÍA..... | 122 |
| 10.5) TIPOS DE DISIPADORES DE ENERGÍA..... | 125 |
| 10.5.1) Tanques amortiguadores..... | 125 |
| 10.5.2) Estructuras del U.S. Bureau of Reclamation (USBR)..... | 127 |
| 11.0 MOVIMIENTO DEL AGUA BAJO LA PRESA..... | 132 |
| 11.1) ASPECTOS GENERALES..... | 132 |
| 11.2) ECUACIÓN DE DARCY EN MEDIOS POROSOS..... | 132 |
| 11.3) DIMENSIONAMIENTO DE DENTELLONES..... | 133 |
| 11.4) EVALUACION DEL MOVIMIENTO DE AGUA BAJO LAS PRESAS..... | 135 |
| 11.4.1) Método de Bligh..... | 136 |
| 11.4.2) Método de Lane..... | 137 |
| 11.4.3) Método de Kamov..... | 139 |
| 11.5) DEFINICIÓN DEL ESPESOR DEL SOLADO..... | 139 |
| 11.6) PROTECCIÓN AL FINAL DE LA ESTRUCTURA..... | 141 |
| 11.6.1) Profundidad de escollera o enrocado..... | 141 |
| 11.6.2) Longitud de la escollera o enrocado..... | 142 |
| 11.7) FACTOR DE SEGURIDAD AL FENÓMENO DE TUBIFICACIÓN..... | 144 |
| 12.0 MURO DE ENCAUZAMIENTO Y ESTUDIO DE LA CURVA DE REMANSO..... | 145 |
| 12.1) ASPECTOS GENERALES..... | 145 |
| 12.2) RÉGIMEN CRÍTICO..... | 146 |
| 12.2.1) Calculo del tirante crítico..... | 147 |

| | |
|---|-----|
| 12.3) CÁLCULO DE LA CURVA DE REMANSO..... | 149 |
| 12.3.1) Clasificación de las curvas de remanso..... | 149 |
| 12.3.2) Métodos de cálculo de la curva de remanso..... | 149 |
| 13.0 MURO DE ENCAUZAMIENTO..... | 173 |
| 13.1) ASPECTOS GENERALES..... | 173 |
| 13.2) CARGAS QUE ACTÚAN SOBRE LOS MUROS..... | 174 |
| 13.2.1) Empuje del suelo..... | 174 |
| 13.2.2) Empuje del agua..... | 176 |
| 13.2.3) Empuje producido por la sobrecarga en el relleno..... | 176 |
| 13.2.4) Empuje por la supresión del agua..... | 178 |
| 13.2.5) Fricción concreto – suelo..... | 178 |
| 13.2.6) Reacción del terreno..... | 179 |
| 13.3) ESTABILIDAD DEL MURO..... | 179 |
| 13.3.1) Estabilidad al volteo..... | 180 |
| 13.3.2) Estabilidad al deslizamiento..... | 181 |
| 13.3.3) Hundimiento de la estructura..... | 183 |
| 13.3.4) Incumplimiento de los factores de seguridad..... | 186 |
| 13.4) DRENAJE..... | 186 |
| 13.5) MUROS DE GRAVEDAD..... | 186 |
| 13.6) MUROS EN VOLADIZO..... | 187 |
| 13.7) VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTE Y FLEXION (PANTALLA Y ZAPATA)..... | 190 |
| 13.7.1) Verificación de los esfuerzos de corte..... | 190 |
| 13.7.2) Verificación de los esfuerzos de flexión..... | 191 |
| 13.8) REFUERZO MÍNIMO EN MUROS..... | 192 |
| 13.9) FACTORES DE CARGA..... | 192 |
| 13.10) FACTORES DE REDUCCIÓN DE CAPACIDAD..... | 193 |
| 13.11) ACERO DE REFUERZO..... | 193 |
| 14.0 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL BARRAJE..... | 195 |
| 14.1) ASPECTOS GENERALES..... | 195 |
| 14.2) FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LA ESTRUCTURA..... | 195 |
| 14.2.1) Peso propio (W)..... | 196 |
| 14.2.2) Presión hidrostática (E_w)..... | 196 |

| | |
|---|-----|
| 14.2.3) Subpresión (E_s)..... | 197 |
| 14.2.4) Empuje de sedimentos o azolves (E_a)..... | 198 |
| 14.2.5) Empuje pasivo producido por el dentellón..... | 198 |
| 14.2.6) Peso del agua sobre el barraje..... | 199 |
| 14.2.7) Reacción del terreno (σ)..... | 201 |
| 14.2.8) Presión negativa en el cimacio..... | 201 |
| 14.3) CONDICIONES DE ESTABILIDAD..... | 201 |

III. MATERIALES Y MÉTODOS

| | |
|-------------------------------------|-----|
| 15.0 MÉTODOS Y RECURSOS..... | 202 |
| 15.1) METODOLOGÍA..... | 202 |
| 15.1.1) Actividades realizadas..... | 203 |
| 15.2) RECURSOS USADOS..... | 206 |

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | |
|--|-----|
| 16.0 EJECUCIÓN DEL PROYECTO..... | 207 |
| 16.1) ALGORITMO PARA DE DISEÑO DE BOCATOMAS TIPO BARRAJE..... | 207 |
| 16.1.1) Algoritmo general del software..... | 207 |
| 16.1.2) Algoritmo para diseño de canal de derivación..... | 208 |
| 16.1.3) Algoritmo para la definición del ancho de encauzamiento..... | 208 |
| 16.1.4) Algoritmo para determinación del coeficiente de rugosidad del río..... | 208 |
| 16.1.5) Algoritmo para características hidráulicas del río..... | 209 |
| 16.1.6) Algoritmo para diseño de ventanas de captación y zona de limpia..... | 209 |
| 16.1.7) Algoritmo para definir el perfil del flujo ventana de captación – canal de derivación..... | 210 |
| 16.1.8) Algoritmo para diseño de barraje vertedor..... | 211 |
| 16.1.9) Algoritmo para diseño del dissipador de energía..... | 212 |
| 16.1.10) Algoritmo para determinación del contorno subterráneo de la presa..... | 213 |
| 16.1.11) Algoritmo para muro de encauzamiento y curva de remanso..... | 213 |
| 16.1.12) Algoritmo para determinación de la socavación del cauce..... | 214 |
| 16.1.13) Algoritmo para diseño de muros de encauzamiento..... | 214 |
| 16.1.14) Algoritmo para diseño de muros laterales..... | 215 |
| 16.1.15) Algoritmo para análisis de estabilidad del barraje..... | 216 |

| | |
|--|-----|
| 16.2) DIAGRAMAS DE FLUJO PARA DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DE BOCATOMAS TIPO BARRAJE..... | 217 |
| 16.2.1) Diagrama de flujo general del software..... | 217 |
| 16.2.2) Diagrama de flujo: Diseño del canal de derivación..... | 219 |
| 16.2.3) Diagrama de flujo: Definición del ancho de encauzamiento..... | 220 |
| 16.2.4) Diagrama de flujo: Determinación del coeficiente de rugosidad del río..... | 221 |
| 16.2.5) Diagrama de flujo: Características hidráulicas del río..... | 222 |
| 16.2.6) Diagrama de flujo: Diseño de ventanas de captación y zona de limpia..... | 223 |
| 16.2.7) Diagrama de flujo: Perfil del flujo ventana de captación – canal de derivación..... | 225 |
| 16.2.8) Diagrama de flujo: Diseño del barraje vertedor..... | 227 |
| 16.2.9) Diagrama de flujo: Diseño del dissipador de energía..... | 229 |
| 16.2.10) Diagrama de flujo: Determinación del contorno subterráneo de la presa..... | 230 |
| 16.2.11) Diagrama de flujo: Muro de encauzamiento y curva de remanso..... | 231 |
| 16.2.12) Diagrama de flujo: Determinación de la socavación del cauce..... | 232 |
| 16.2.13) Diagrama de flujo: Diseño de muros de encauzamiento..... | 233 |
| 16.2.14) Diagrama de flujo: Diseño de muros laterales..... | 234 |
| 16.2.15) Diagrama de flujo: Análisis de estabilidad del barraje..... | 235 |
| 16.3) DESCRIPCIÓN DEL LENGUAJE USADO..... | 236 |
| 16.3.1) Visual Studio 2010..... | 236 |
| 16.3.2) Net Framework 4.0..... | 236 |
| 16.3.3) Visual Basic 2010..... | 236 |
| 17.0 RESULTADOS OBTENIDOS..... | 237 |
| 17.1) SOFTWARE PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DE BOCATOMAS TIPO BARRAJE (DHEBB V2.0.0)..... | 237 |
| 17.2) MANUAL DEL USUARIO DEL SOFTWARE DHEBB V2.0.0..... | 238 |
| 17.2.1) Como ingresar al programa..... | 238 |
| 17.2.2) Barra de Título..... | 240 |
| 17.2.3) Barra de menús..... | 241 |
| 17.2.4) Principales herramientas..... | 248 |
| 17.2.5) Módulos con las que trabaja el programa..... | 254 |

| | |
|---|-----|
| 17.2.6) Función de las herramientas dentro de los módulos..... | 269 |
| 17.3) INSTALACIÓN DEL SOFTWARE..... | 271 |
| 17.4) PRUEBA DEL SOFTWARE..... | 274 |
| 17.4.1) Ejercicio de prueba, Diseño de la bocatoma “Fortaleza”..... | 274 |
| 18.0 DISCUSIÓN..... | 298 |

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|--|-----|
| 19.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 300 |
| 19.1) CONCLUSIONES..... | 300 |
| 19.2) RECOMENDACIONES..... | 301 |

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

| | |
|-------------------|-----|
| BIBLIOGRAFÍA..... | 302 |
|-------------------|-----|

VII. ANEXOS

ANEXOS (Codificación del software)

ANEXOS (Reporte del Diseño de la Bocatoma “El Carmen”)

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRAFICOS

| | Pág. |
|---|------|
| Figura N° 2.01: Partes de una obra de captación..... | 06 |
| Figura N° 3.01: Zona de estancamiento y depósito..... | 11 |
| Figura N° 3.02: Variación de $\frac{Q_{F1}}{Q_F}$ con el ángulo Θ para una relación de toma constante $\frac{Q_1}{Q} = 0.5$ | 12 |
| Figura N° 3.03: Influencia de la curvatura..... | 14 |
| Figura N° 4.01: Sección transversal del cauce..... | 34 |
| Figura N° 4.02: Muros de encauzamiento que se prolongan hasta el cauce principal y no existe flujo en la zona de inundación..... | 37 |
| Figura N° 4.03: Intersección del flujo por los muros. Método de Artamonov..... | 38 |
| Figura N° 5.01: Pendientes: línea de energía, línea piezométrica, y fondo del cauce..... | 46 |
| Figura N° 5.02: Sección rectangular del cauce natural..... | 47 |
| Figura N° 5.03: Sección trapezoidal del cauce natural..... | 48 |
| Figura N° 5.04: Sección de río encauzado..... | 49 |
| Figura N° 6.01: Sección trapezoidal del canal de derivación..... | 51 |
| Figura N° 6.02: Sección rectangular del canal de derivación..... | 53 |
| Figura N° 6.03: Pendientes: línea de energía, línea piezométrica, y fondo del cauce..... | 54 |
| Figura N° 6.04: Tirante vertical y normal..... | 54 |
| Figura N° 7.01: Vista en planta ventana – canal de derivación..... | 63 |
| Figura N° 7.02: Rejillas en ventana de captación..... | 64 |
| Figura N° 7.03: Ventana de captación..... | 66 |
| Figura N° 7.04: Definición de la altura del barraje..... | 67 |
| Figura N° 7.05: Distribución de longitudes en el ancho de encauzamiento..... | 68 |
| Figura N° 7.06: Carga de agua sobre el barraje..... | 69 |
| Figura N° 7.07: Vista de perfil sección ventana de captación – canal de derivación..... | 70 |
| Figura N° 7.08: Longitudes en compuerta de admisión..... | 71 |
| Figura N° 7.09: Dimensiones características del desripiador..... | 74 |

| | |
|---|-----|
| Figura N° 7.10: Dimensiones características de la transición..... | 77 |
| Figura N° 7.11: Detalle del vertedor de excedencia..... | 78 |
| Figura N° 7.12: Ubicación de la compuerta de desripiador..... | 79 |
| Figura N° 7.13: Perfil del flujo a través de compuerta de limpia..... | 80 |
| Figura N° 7.14: Vista en planta de compuerta de limpia en desripiador..... | 82 |
| Figura N° 7.15: Principales cotas ventana – Canal de derivación..... | 84 |
| Figura N° 8.01: Vista en planta canal de limpia..... | 85 |
| Figura N° 8.02: Distribución de compuertas en canal de limpia..... | 86 |
| Figura N° 8.03: Perfil canal de limpia..... | 89 |
| Figura N° 9.01: Vertido libre sobre un Barraje..... | 93 |
| Grafico N° 9.01: Coeficiente de descarga en cimacios de paramento aguas arriba vertical, vertiendo con la carga de diseño..... | 95 |
| Grafico N° 9.02: Coeficiente de descarga en cimacios de paramento aguas arriba vertical, vertiendo con cargas diferentes a la de diseño..... | 96 |
| Figura N° 9.02: Coeficiente de contracción en estribos, según U.S. Bureau of Reclamation..... | 98 |
| Figura N° 9.03: Coeficiente de contracción por pilas de formas diferentes, con el tajamar coincidiendo con el plano vertical del paramento aguas arriba de un cimacio de perfil WES y velocidad de llegada despreciable..... | 98 |
| Figura N° 9.04: Vertedor de pared delgada..... | 99 |
| Figura N° 9.05: Eje de coordenadas..... | 100 |
| Figura N° 9.06: Ubicación de punto de tangencia en cimacio..... | 101 |
| Figura N° 9.07: Elementos de los perfiles de cimacio con la forma de la lámina vertiente..... | 102 |
| Figura N° 9.08: Valor de k para el diseño del perfil de un cimacio..... | 103 |
| Figura N° 9.09: Valor de n para el diseño del perfil de un cimacio..... | 103 |
| Figura N° 9.10: Valor de x_c/H_0 para el diseño del perfil de un cimacio..... | 103 |
| Figura N° 9.11: Valor de y_c/H_0 para el diseño del perfil de un cimacio..... | 104 |
| Figura N° 9.12: Valor de $\frac{R_1}{H_0}, \frac{R_2}{H_0}$ para el diseño del perfil de un cimacio..... | 104 |
| Figura N° 9.13: Perfil de un cimacio tipo WES con velocidad de llegada despreciable y paramento aguas arriba vertical $P/H_0 \geq 1$ | 105 |
| Figura N° 9.14: Altura de curva de descarga igual a la profundidad de la poza de disipación de energía..... | 108 |

| | |
|--|-----|
| Figura N° 9.15: Curva de descarga en función del talud del canal de pendiente constante..... | 108 |
| Figura N° 9.16: Perfil de cimacio aguas arriba de la cresa..... | 109 |
| Figura N° 9.17: Perfil completo de un cimacio con las ecuaciones que lo gobiernan..... | 112 |
| Figura N° 10.01: $F_1 = 1$, No se forma resalto..... | 115 |
| Figura N° 10.02: $F_1 = 1$ a 1.7, Resalto ondulante..... | 115 |
| Figura N° 10.03: $F_1 = 1.7$ a 2.5, Resalto débil..... | 115 |
| Figura N° 10.04: $F_1 = 2.5$ a 4.5, Resalto oscilante..... | 116 |
| Figura N° 10.05: $F_1 = 4.5$ a 9, Resalto estable..... | 116 |
| Figura N° 10.06: $F_1 = 4.5$ a 9, Resalto fuerte..... | 117 |
| Figura N° 10.07: Resalto hidráulico..... | 118 |
| Figura N° 10.08: Longitud de Resalto en términos de profundidad secuente y_2 en canales horizontales según la USBR..... | 122 |
| Figura N° 10.09: Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 1). “Resalto Hidráulico Normal”..... | 123 |
| Figura N° 10.10: Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 2). “Resalto Hidráulico Desplazado”..... | 124 |
| Figura N° 10.11: Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 3). “Resalto Hidráulico Sumergido”..... | 125 |
| Figura N° 10.12: Disipador de energía tipo tanque amortiguador..... | 126 |
| Figura N° 10.13: Cuenco disipador tipo I..... | 127 |
| Figura N° 10.14: Dimensiones del cuenco tipo IV USBR..... | 128 |
| Figura N° 10.15: Longitud del resalto hidráulico para cuenco tipo IV..... | 129 |
| Figura N° 10.16: Dimensiones del cuenco tipo III USBR..... | 130 |
| Figura N° 10.17: Altura de los bloques de impacto y del umbral..... | 130 |
| Figura N° 10.18: Longitud del resalto USBR tipo III..... | 130 |
| Figura N° 10.19: Longitud del resalto USBR tipo II..... | 131 |
| Figura N° 10.20: Dimensiones del cuenco tipo II USBR..... | 131 |
| Figura N° 11.01: Filtración en presa derivadora..... | 133 |
| Figura N° 11.02: Longitud de dentellones..... | 134 |
| Figura N° 11.03: Socavación al pie del disipador de energía..... | 142 |
| Figura N° 11.04: Longitud de la escollera..... | 143 |
| Figura N° 12.01: Muro de encauzamiento..... | 146 |

| | |
|--|-----|
| Figura N° 12.02: Curvas de energía específica..... | 147 |
| Figura N° 12.03: Remanso producido por el barraje en el río..... | 151 |
| Figura N° 12.04: Tramo de canal..... | 151 |
| Figura N° 12.05: Área bajo la curva..... | 153 |
| Figura N° 12.06: Sección 1-2 de un tramo de canal..... | 154 |
| Figura N° 12.07: Sección 1-2 de un tramo de canal..... | 154 |
| Figura N° 12.08: Identificación de tramo a calcular..... | 156 |
| Figura N° 12.09: Identificación de tramo a calcular..... | 158 |
| Figura N° 13.01: Tipo de muros..... | 174 |
| Figura N° 13.02: Empuje del suelo sobre muros de sostenimiento..... | 175 |
| Figura N° 13.03: Empuje del agua sobre muro de encauzamiento..... | 177 |
| Figura N° 13.04: Empuje debido a una sobrecarga uniforme sobre relleno..... | 177 |
| Figura N° 13.05: Empuje debido a la supresión..... | 178 |
| Figura N° 13.06: Volteo de muro debido a cargas actuantes sobre él..... | 181 |
| Figura N° 13.07: Ubicación de la fuerza resultante..... | 183 |
| Figura N° 13.08: Resultante dentro del tercio medio..... | 184 |
| Figura N° 13.09: Resultante en el borde del tercio medio..... | 184 |
| Figura N° 13.10: Resultante por fuera del tercio medio..... | 184 |
| Figura N° 13.11: Criterio para dimensionamiento preliminar de muros de gravedad..... | 187 |
| Figura N° 13.12: Criterio para dimensionamiento preliminar de muros en voladizo..... | 188 |
| Figura N° 13.13: Criterios para el diseño del muro en voladizo..... | 189 |
| Figura N° 13.14: Criterio para el detallado del refuerzo en muros en voladizo..... | 190 |
| Figura N° 14.01: Peso del barraje..... | 196 |
| Figura N° 14.02: Presión hidrostática sobre barraje..... | 197 |
| Figura N° 14.03: Presión hidrostática sobre barraje..... | 197 |
| Figura N° 14.04: Empuje de sedimentos sobre barraje..... | 198 |
| Figura N° 14.05: Empuje pasivo del suelo..... | 199 |
| Figura N° 14.06: Peso de agua sobre barraje..... | 200 |
| Figura N° 14.07: Reacción del terreno..... | 201 |
| Grafico N° 15.01: Metodología de trabajo..... | 205 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla N° 4.01: Valores de factor de fondo F_b | 22 |
| Tabla N° 4.02: Valores de factor de Orilla F_a | 23 |
| Tabla N° 4.03: Valores de la velocidad V_ϕ en función del diámetro medio de las partículas cuando el tirante es de 1m..... | 25 |
| Tabla N° 4.04: Valores de A y m para cauces estables..... | 26 |
| Tabla N° 4.05: Formulas para el cálculo de causes estables formados en terrenos de arena gruesa a guijarros (partículas con diámetro mayor de 1mm)..... | 27 |
| Tabla N° 4.06: Formulas de diseño para causes estables en grava o boleo..... | 28 |
| Tabla N° 4.07: Formulas de diseño para causes estables en grava o boleo..... | 28 |
| Tabla N° 4.08: Formulas de diseño para causes estables en grava o boleo..... | 29 |
| Tabla N° 4.09: K1 para trabajar con la fórmula de Simons y Henderson..... | 30 |
| Tabla N° 4.10: Factor de corrección por contracción del cauce μ | 35 |
| Tabla N° 4.11: Coeficiente de corrección K_θ | 39 |
| Tabla N° 4.12: Coeficiente de corrección K_Q | 39 |
| Tabla N° 4.13: Coeficiente de corrección K_m | 39 |
| Tabla N° 4.14: Coeficiente por la forma del muro K_f | 40 |
| Tabla N° 5.01: Taludes recomendados para las márgenes de un río según el material del terreno..... | 42 |
| Tabla N° 5.02: Valores de “n” dados por Horton para ser usados en las fórmulas de Ganguillet – Kutter y de Manning..... | 43 |
| Tabla N° 5.03: Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad según la ecuación de Cowan..... | 45 |
| Tabla N° 6.01: Valores de m para emplearse en la fórmula de Bazin..... | 56 |
| Tabla N° 6.02: Valores de n dados por Horton para ser usadas en las fórmulas de Ganguillet – Kutter y Manning..... | 58 |
| Tabla N° 6.03: Ancho de solera en función del caudal..... | 61 |
| Tabla N° 6.04: Borde libre en función del caudal..... | 61 |
| Tabla N° 6.05: Borde libre en función de la solera..... | 62 |
| Tabla N° 7.01: Valores de coeficiente de descarga en función de la forma del vertedor..... | 65 |

| | |
|--|-----|
| Tabla N° 7.02: Valores de “e”, en función de la carga de agua y altura de compuerta..... | 81 |
| Tabla N° 11.01: Coeficiente de Bligh..... | 137 |
| Tabla N° 11.02: Coeficiente de Lane..... | 138 |
| Tabla N° 11.03: Coeficiente de Kamov..... | 139 |
| Tabla N° 12.02: Cálculo de la curva de remanso método de Bakhmeteff..... | 158 |
| Tabla N° 12.04: Tabulación para el método de tramos fijos..... | 160 |
| Tabla N° 12.01 de las funciones de flujo variado..... | 163 |
| Tabla N° 12.03 funciones de Bresse para curvas de remanso..... | 172 |
| Tabla N° 13.01: Peso específico y ángulo de fricción interna para algunos tipos de suelo..... | 176 |
| Tabla N° 13.02: Valores de Coeficiente de fricción concreto – suelo..... | 179 |
| Tabla N° 13.03: Relación $B/(H + h_s)$, para diferentes tipos de relleno..... | 186 |
| Tabla N° 13.04: Varillas corrugadas y sus características..... | 194 |

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.0 INTRODUCCIÓN

Es necesario tener presente que la bocatoma es una estructura muy importante para el éxito de un proyecto. Si por una razón u otra se produce una falla importante en la obra de toma, esto significaría la posibilidad del fracaso de todo el proyecto de aprovechamiento hidráulico. En consecuencia, el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de una obra de toma deben ofrecer la máxima de seguridad.

El diseño de una obra de toma puede ser un problema muy difícil de resolver, en el que debe preverse la interacción estructura-naturaleza. La obra de toma, es un elemento extraño en contacto con el agua. Es decir, que la estructura va a producir inevitablemente alteraciones en el medio natural circundante y a la vez, la naturaleza va a reaccionar contra la obra.

Para el diseño de bocatomas es necesario contar con una gran cantidad de datos como son: geológicos, geotécnicos, topográficos, hidráulica fluvial, hidrológicos, transporte de sedimentos, económicos, etc. Las cuales son obtenidas de una serie de estudios, y recojo de información en la zona de estudio. Una vez obtenida toda la información, se procede con el procesamiento de la información, para finalmente obtener el diseño de una bocatoma segura, eficiente y que cumpla con todos los requerimientos hidráulicos y estructurales, para el óptimo funcionamiento a lo largo de su vida útil. Este procesamiento puede realizarse de forma manual, la cual es laborioso, poco preciso, y está sujeto a errores humanos. Por esta razón se ha elaborado

el software DHEBB V2.0.0 para el diseño de bocatomas en forma rápida, precisa y eficiente.

En la actualidad la existencia de programas de ingeniería ha facilitado el desarrollo de procesos eficientes con los mínimos recursos. Su aplicación radica desde la fase inicial de ingreso de datos hasta su estado final con resultados precisos.

La estrecha relación entre estos programas y los ingenieros o estudiantes de Ingeniería, resulta ser de gran utilidad, ya que permite relacionar los conocimientos académicos adquiridos con los problemas comunes presentes en la práctica. Sin embargo, la aplicación de este tipo de programas debe tratarse con sumo cuidado ya que se debe evitar considerar como “cajas negras”, es decir; que se obtengan resultados sin conocer qué tipo de operaciones o metodologías se emplearon para obtener dichos resultados.

1.1) ANTECEDENTES

A inicios del 2010 el autor de la presente tesis ha desarrollado el software denominado “Diseño de Bocatomas” V1.0.0 con fines académicos, y de uso personal. Este software con muchas deficiencias ha quedado en el olvido debido a ciertas falencias que presentaba, en cuanto a la confiabilidad de los cálculos que realizaba, las pocas herramientas con que contaba, los algoritmos demasiados largos para solucionar problemas fáciles, la cual repercute en la codificación del software.

Por las razones antes mencionadas no se ha presentado el borrador de tesis con el mencionado software.

Después de haber realizado una mayor revisión de literatura en el diseño de bocatomas, en cuanto al lenguaje de programación Visual Basic, se ha desarrollado nuevos métodos de cálculo, y con ello nuevos algoritmos y codificación de todo el software, obteniendo como resultado final el software “Diseño hidráulico y estructural de bocatomas tipo barraje” con su acrónimo DHEBB V2.0.0 tema del actual trabajo de tesis.

1.2) PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cuando estudiantes, profesionales y personas inmersas en obras de captación tienen la necesidad de realizar el diseño de una bocatoma segura, eficiente, y que cumpla con todos los requerimientos hidráulicos y estructurales, recurren al uso de hojas de cálculo incompletos y con múltiples errores, y que la forma de cálculo lineal y tradicional da poca confianza a los diseñadores. Obteniendo un resultado final inconsistente, lo cual llevará a la ejecución de la obra con serias deficiencias en el funcionamiento, pudiendo fallar sin antes haber cumplido con la vida útil de la estructura. O en todo caso, captando una cantidad de agua mucho menor a lo que realmente se necesita.

O como en muchos lugares, las estructuras están fallando debido a que no se ha considerado algunos parámetros importantes en el dimensionamiento de la estructura de captación.

1.3) JUSTIFICACIÓN

Contar con un programa de diseño hidráulico y estructural de bocatomas tipo barraje, permitirá al profesional proyectista evaluar y comparar las diferentes alternativas de diseño con mayor rapidez y precisión, de tal manera que se pueda verter más de una propuesta de diseño adoptándose la más económica y sobre todo la más segura.

Por esta razón, implementar este importante recurso didáctico e interactivo, es incorporar una nueva tecnología, precisa y eficaz, que sirve en la toma de decisiones acertadas, la cual repercute en el adecuado funcionamiento de la estructura durante el periodo de vida del proyecto.

1.4) OBJETIVOS

Para la realización de la presente tesis se ha definido los siguientes objetivos:

1.4.1) Objetivo general

Implementación de un software para diseño hidráulico y estructural de bocatomas tipo barraje, con el Visual Basic 2010.

1.4.2) Objetivos específicos

1. Recopilar y analizar información concerniente al diseño de bocatomas tipo barraje.
2. Definir el modelo matemático para realizar el diseño hidráulico y estructural de bocatomas tipo barraje.
3. Elaborar el software Diseño Hidráulico y Estructural de Bocatomas tipo Barraje (DHEBB V2.0.0).
4. Realizar la prueba de funcionamiento e instalación del software DHEBB V2.0.0.
5. Implementar un manual de usuario para el fácil entendimiento del software.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.0 GENERALIDADES SOBRE LAS ESTRUCTURAS DE CAPTACIÓN

2.1) DEFINICIÓN

Según M. Arias (1992), definimos bocatoma al conjunto de obras hidráulicas construidas en una fuente de agua, ya sea río, canal o laguna, con la finalidad de captar y derivar dicha fuente un determinado volumen de agua para utilizarlo con fines energéticos, de irrigación, de abastecimiento público u otros, constituye generalmente la obra básica para un aprovechamiento hídrico.

Una estructura de captación, es una estructura hidráulica, que se utiliza para hacer ingresar el agua de una fuente de aprovechamiento que puede ser un río o una laguna a un canal de derivación.

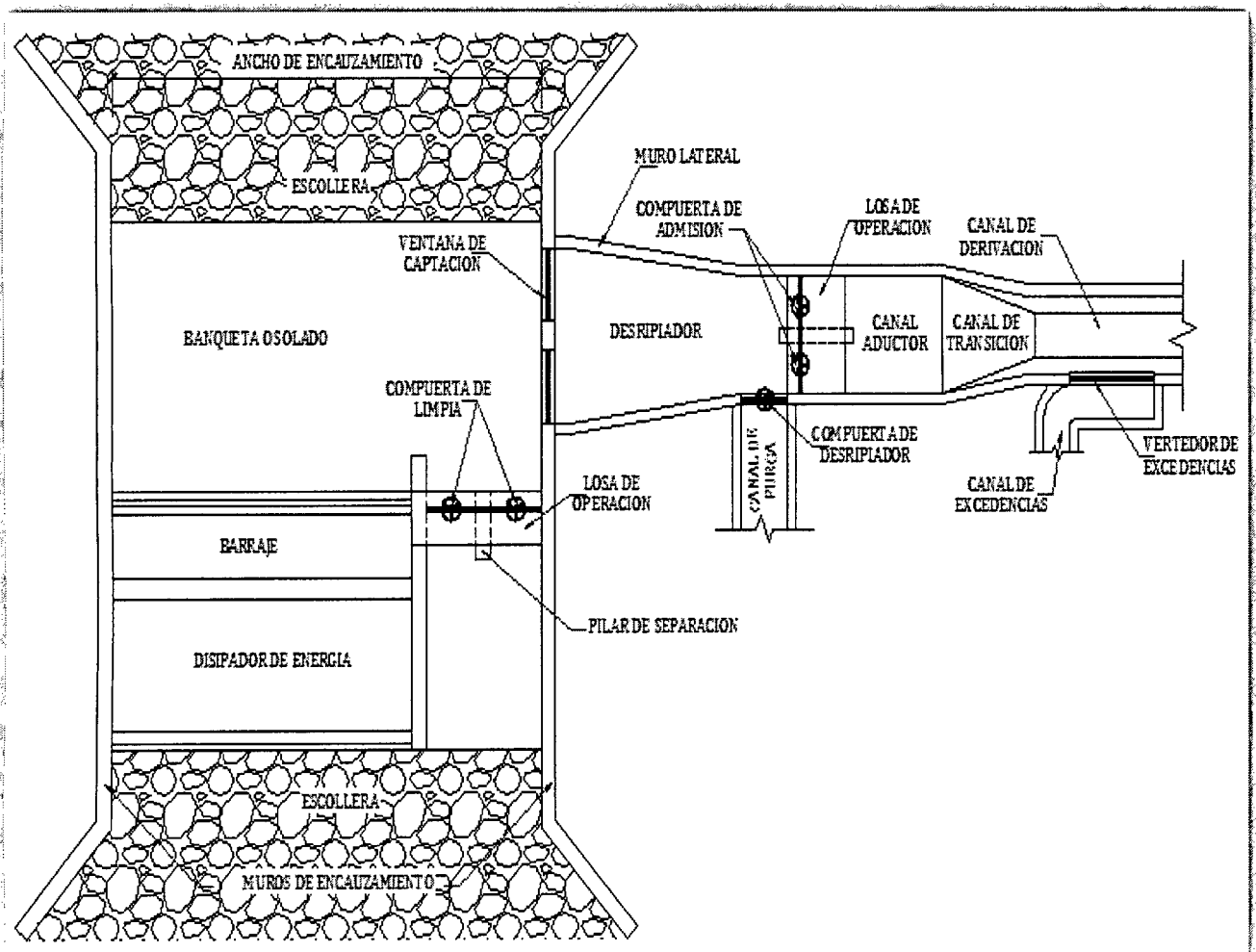
2.2) PARTES QUE CONFORMA UNA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN

Según C. Rosell (1993), existen varios factores que definen el tipo de bocatoma, entre los cuales podemos citar: el régimen del río, el transporte de sólidos, el caudal de la captación, las características del lecho del río, se sección transversal. Los elementos principales de las bocatomas son los siguientes:

- a) *Muros o diques de encauzamiento:* Su objetivo es encauzar el río y proteger los terrenos ribereños aguas arriba de la toma y evitar desbordamientos como consecuencia de la instalación del barraje. Los muros pueden ser de concreto armado, presa de gravedad, y de tierra.

- b) *Ventana de captación*: Es la estructura que está ubicada en una de las márgenes del río, hacia aguas arriba de la presa derivadora y tiene por finalidad captar las aguas; consta de un vertedero u orificio de captación de rejillas y de compuertas de regulación.
- c) *Canal de limpia*: Esta estructura tiene la finalidad de eliminar los sólidos que se depositen delante de las ventanas de captación.
- d) *Barraje o azud*: Cortina, presa derivadora o barraje es una represa construida transversalmente al río con objeto de levantar el tirante y facilitar el ingreso de agua.
- e) *Aliviadero de demasías*: Para evacuar las excedencias en la captación.

Figura N° 2.01: Partes de una obra de captación



- f) *Disipadores de energía*: Utilizado para cambios de régimen hidráulico al pie del vertedero Creager.

- g) *Escollera*: Ubicada aguas abajo del dissipador de energía, la finalidad de la escollera es la protección del solado contra la socavación debida al cambio del régimen del agua.
- h) *Desripador*: Lugar donde quedan retenidas los sólidos que lograron pasar por las ventanas de captación, también es una zona de transición entre las ventanas de captación y las compuertas de admisión.
- i) *Compuerta de admisión*: Controla el flujo de ingreso hacia el canal de derivación.
- j) *Canal de transición*: Utilizada cuando las secciones entre las compuertas de admisión, y el canal de derivación tienen diferentes secciones, con la finalidad de evitar grandes pérdidas de carga.
- k) Trampas para material de fondo y rejillas para material flotante.
- l) Medidores o aforadores.

2.3) PRINCIPALES TIPOS DE BOCATOMAS

Existe una diversidad de bocatomas, pero estas se agrupan teniendo en cuenta el régimen hidráulico del río y los elementos que forma parte de ella.

Según Linares (1979) las bocatomas pueden clasificarse de la siguiente forma:

- ✓ Bocatoma de régimen subcrítico.
- ✓ bocatoma de régimen supercrítico.
- ✓ bocatoma sin barraje.
- ✓ bocatoma con barraje.
 - barraje fijo.
 - barraje móvil.
 - barraje mixto.

Según A. Mansen, las bocatomas se pueden clasificar en cuatro tipos:

- a) **Toma directa**: Se trata de una bocatoma que capta directamente mediante un canal lateral, que por lo general es un brazo fijo del río, que permite el discurrir de un canal mayor que el que se va captar, su mayor ventaja es la no necesidad de construir barraje o azud que por lo general constituye una de las partes de mayor costo, sin embargo tiene

como desventaja, la facilidad de ser obstruida en época de crecida y además permite el ingreso de sedimentos hacia el canal de derivación.

b) Toma mixta o convencional: Se trata de una toma que permite la captación mediante el cierre con una estructura llamada azud o vertedero de derivación, el cual puede ser fija o móvil. Dependiendo del tipo de material usado, será fija cuando utiliza un elemento rígido, por lo general es de concreto y móvil cuando se utiliza compuertas de acero o madera y la captación se realiza por medio de una ventana que puede funcionar como orificio o vertedero, dependiendo del tirante en el río.

c) Toma móvil: Consiste en aquella toma que por la variación de niveles en forma muy marcada entre la época de estiaje y de avenida, necesita disponer de un vertedero relativamente bajo, pero para dar la carga necesaria requiere de compuertas que permitan elevar el nivel de agua necesaria para poder captar el volumen deseado. A los vertederos con compuertas que permiten el paso del caudal de avenida a través de ellas se les conoce como barraje. Su principal ventaja es que permite el paso de materiales de arrastre por encima de la cresta del vertedero.

d) Toma tirolesa o caucasiana: Es una toma, cuyas estructuras de captación se encuentran dentro de la sección del vertedero azud, dejando un espacio en él protegido por una rejilla que impide el ingreso de materiales gruesos. Estas tomas no son recomendables en ríos donde el arrastre de sedimentos es intenso, ya que podrían causar rápida obstrucción de las rejillas. La construcción de este tipo de bocatomas es solo recomendable donde las condiciones la favorezcan.

En resumen el tipo de bocatomas recomendable para una captación de un determinado caudal, depende de la altura del vertedero, de las condiciones de la cimentación, del flujo en el río, del remanso aguas arriba, de la disponibilidad de los materiales de construcción y del monto de dinero asignado para la ejecución de la obra.

2.4) CONDICIONES QUE DEBEN DE CUMPLIR LAS OBRAS DE CAPTACIÓN

Según J. Almora (2009), toda obra de captación debe cumplir las siguientes condiciones:

- ✓ Con cualquier tirante del río deben de captar una cantidad de agua prácticamente constante.
- ✓ Debe impedirse hasta donde sea posible la entrada a la conducción de todo material sólido y flotante, y hacer que estos materiales (desechos) pasen por el mismo cauce del río.
- ✓ Proveer un sistema para dejar pasar las avenidas, que tienen gran cantidad de sólidos y material flotante.
- ✓ Estar ubicada en un lugar que presente condiciones favorables desde el punto de vista constructivo.
- ✓ Conservar aguas abajo suficiente capacidad de transporte para evitar sedimentaciones.
- ✓ Satisfacer todas las condiciones de seguridad necesarias.

2.5) CONDICIONES QUE DEBEN DE CUMPLIR LOS RÍOS

- ✓ Según S. Krochin (2010), para asegurar el servicio ininterrumpido, el caudal debe ser bastante mayor que el caudal de diseño para el canal. Al mismo tiempo se debe tener la seguridad que la profundidad del río en el sitio de la toma no disminuya nunca de un cierto valor mínimo. Estas condiciones se encuentran generalmente sólo en ríos de llanura.
- ✓ El río debe tener el cauce estable y las orillas firmes a fin de que no se produzcan derrumbes, azolves o erosiones que puedan inutilizar las obras de toma.

3.0 INFORMACION REQUERIDA PARA SU DISEÑO

Antes de iniciar el diseño de una bocatoma, se debe examinar los siguientes aspectos, para la zona de emplazamiento de la bocatoma:

3.1) UBICACIÓN

Según A. Mansen (1988), es de suma importancia la ubicación de la bocatoma en el cauce del río, para la que se recomienda que el sitio elegido reúna por lo menos las siguientes condiciones:

- a.- La dirección o ruta del flujo de agua debe ser lo más estabilizada o definida.
- b.- La captación del agua debe ser siempre posible aun en época de estiaje.
- c.- La entrada de sedimentos hacia el canal de derivación debe ser limitada en lo máximo posible.
- d.- Ubicar en zonas rocosas, con la finalidad de asegurar la estabilidad de la estructura.
- e.- Ubicar en las partes más angostas de los ríos, la cual permita construir una presa derivadora corta y económica.

Un punto recomendable que cumple los requerimientos anteriores, se encuentra ubicado inmediatamente aguas abajo del centro de la parte cóncava en los tramos curvos del río.

Lógicamente este punto estará condicionado a cumplir las condiciones topográficas (cota de captación) condiciones geológicas y geotécnicas, condiciones sobre facilidades constructivas (disponibilidades de materiales), evitar posibles inundaciones o daños a construcciones vecinas, etc.

3.1.1) Angulo de derivación

Según A. Rocha (1992), el valor del ángulo de derivación determina, en primer lugar que para un mismo ancho del canal lateral se presenta una

mayor o menor abertura de entrada, con el consiguiente efecto sobre la captación de sólidos.

El ángulo de derivación determina también la curvatura de las líneas de corriente y la trayectoria de las partículas que se dirigen al canal de derivación. Un ángulo grande determina una fuerte curvatura.

En la figura N° 3.01 se muestra la zona de estancamiento para ángulos de 30°, 90° y 120°.

Con el objeto de apreciar la influencia del ángulo de derivación sobre la cantidad de sólidos captados se ha preparado la figura N° 3.02 en la que se presenta los resultados de varias investigaciones.

Figura N° 3.01: Zona de estancamiento y depósito.

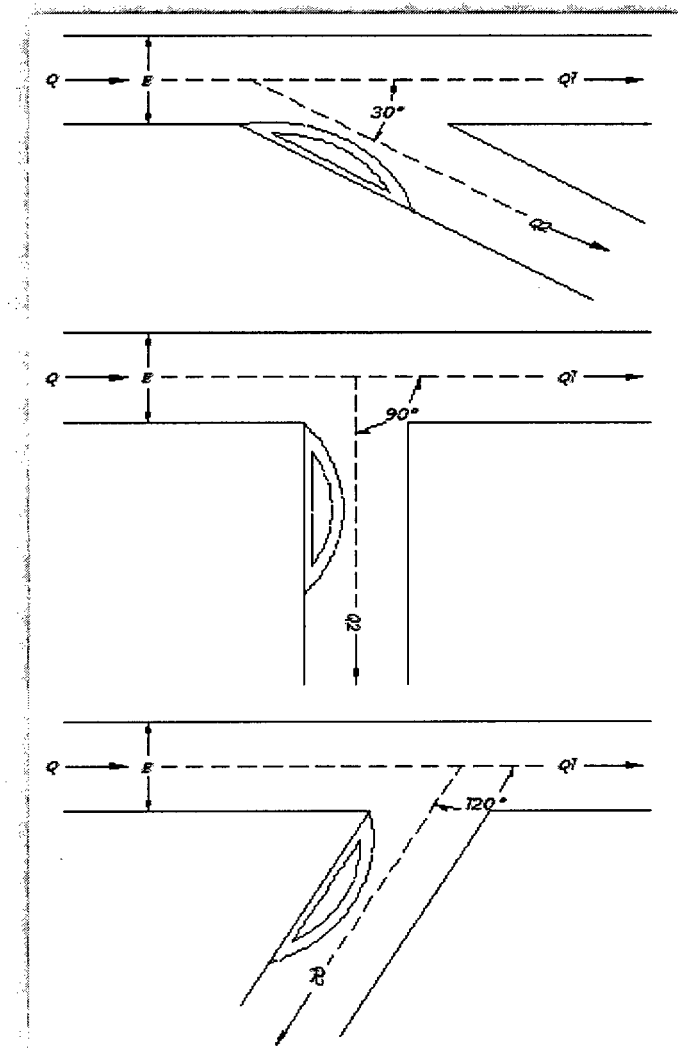
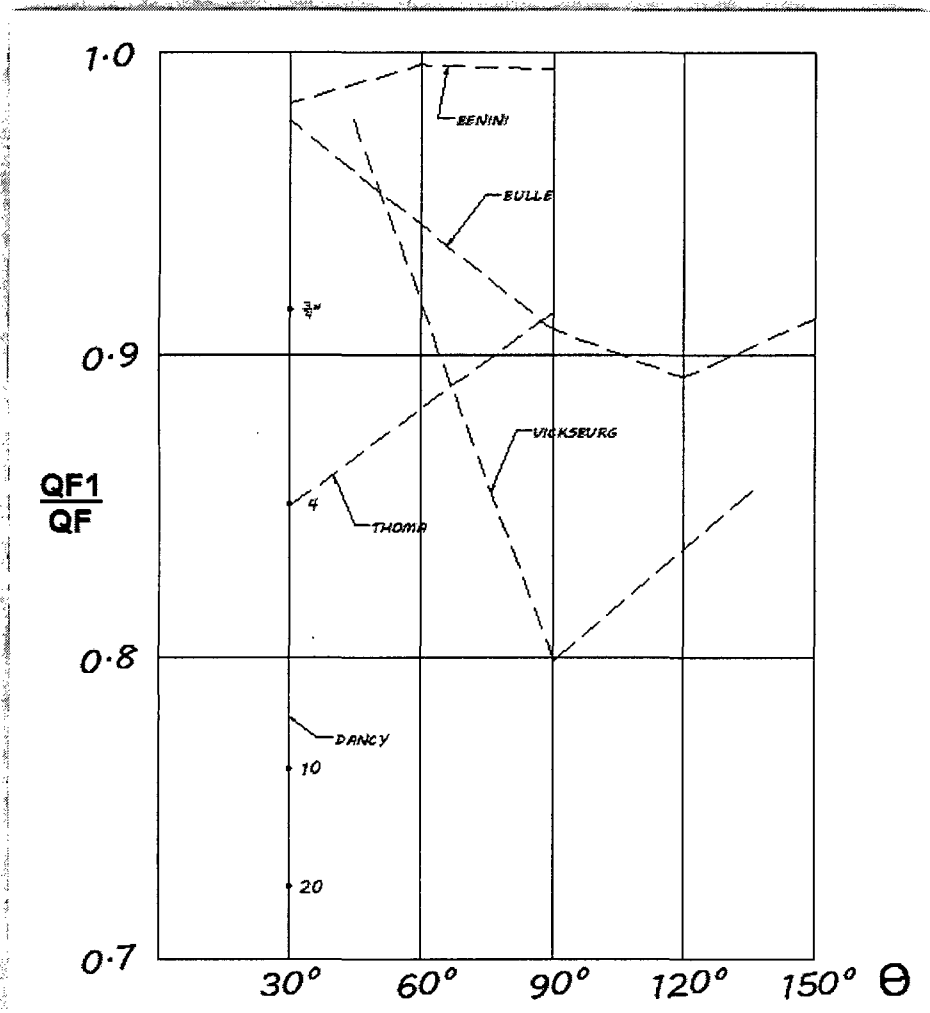


Figura N° 3.02: Variación de $\frac{Q_{F1}}{Q_F}$ con el ángulo Θ para una relación de toma constante $\frac{Q_1}{Q} = 0.5$.



Thoma, realizó mediciones solo para ángulos de 30° y 90°. Este último tenía una esquina redondeada, sin embargo no se ha considerado en el gráfico dado que efecto del redondeo de la esquina es en realidad pequeño.

Las mediciones de Vicksburg se basa en un modelo del río Mississippi, por lo tanto las condiciones son diferentes a la bifurcación esquematizada que estamos estudiando. Sin embargo se considera útil mostrar estos resultados, en el gráfico mencionado.

Las experiencias de Benini y Bulle corresponden al caso genérico en estudio. Dancy Utilizó únicamente un ángulo de 30°, pero diversos diámetros para el material sólido.

Luego de analizar las diversas investigaciones efectuadas y diseños de diferentes países, se puede concluir que no existe ángulo óptimo de derivación o en todo caso la influencia del ángulo de derivación es pequeña, no bien conocida y no susceptible de generalización.

3.1.2) Influencia de la curvatura

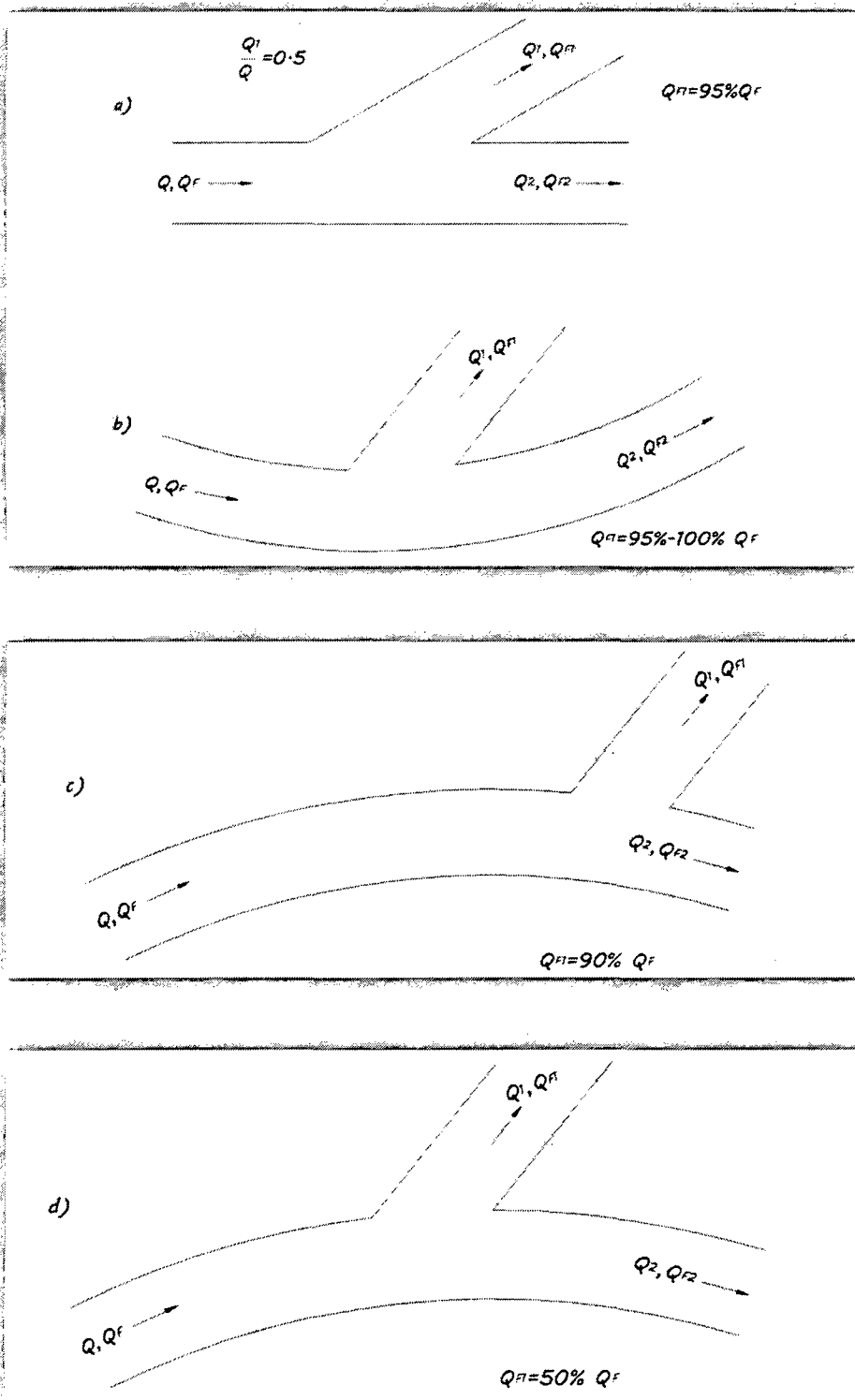
Según A. Rocha (1992), con el objeto de mostrar la influencia de la ubicación del canal lateral con respecto a la curvatura del canal principal, se muestra el resultado de la investigación de Habermaas referente a los porcentajes captados de material sólido de fondo para cada disposición. La figura N° 3.03 muestra los ensayos referentes a la captación de sedimentos en función de la proporción de toma (Q_1/Q), en todos los casos (Q_1/Q) es igual a 0.5.

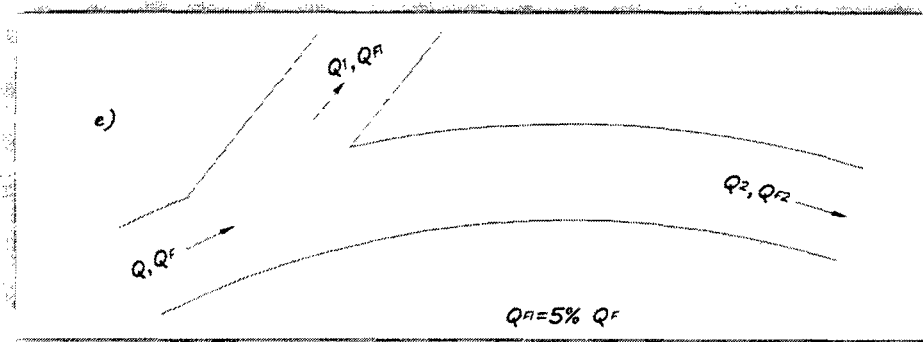
En el ensayo "a", la bifurcación está en un tramo recto e ingresa en 95% de los sólidos de fondo. En el ensayo "b" la bifurcación está ubicada en la margen interior de un tramo curvo, comprobándose que prácticamente la totalidad del gasto sólido de fondo ingresa al canal lateral.

En los ensayos "c", "d" y "e" la bifurcación se halla en el margen exterior de un tramo curvo. Se obtiene mejores resultados a medida que la captación se aproxima a la iniciación de la curva.

Los resultados favorables se deben a la presencia de una corriente helicoidal. Se observa que los resultados favorables de la experiencia "e" se deben a que como consecuencia de la ubicación del canal lateral, éste aparece; como una continuación del cauce principal, mientras que la parte del canal principal ubicado aguas abajo de la bifurcación aparece como el canal derivado.

Figura N° 3.03: Influencia de la curvatura.





3.2) ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS

Según A. Mansen (1988), definida la posible ubicación, se realizan los siguientes trabajos topográficos:

- Levantamiento topográfico a curvas de nivel del cauce del río, en una longitud de 500m a 1000m. tanto aguas abajo como aguas arriba del eje del barraje, la escala recomendada es 1:2000.
- Levantamiento localizado de la zona de ubicación de la bocatoma, se recomienda un área de 100m. x 100m. como mínimo, a escala 1/500 y 1 metro de equidistancia de las curvas de nivel.
- Perfil longitudinal del río, por lo menos un kilómetro tanto aguas arriba como aguas abajo del eje del barraje, la escala recomendada es $H=1:2000$ y $V=1:200$.
- Secciones transversales del cauce del río cada 20m. en un tramo comprendido 1000m aguas arriba y 500m aguas abajo del eje del barraje; la escala varía entre 1:100 y 1:200.

3.3) ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS

Es importante conocer las condiciones geomorfológicas, geológicas y geotécnicas, ya que su conocimiento permitirá dimensionar con mayor seguridad la estructura, por lo que se recomienda la obtención de los siguientes datos como resultado de los estudios geológicos – geotécnicos:

- Curva de graduación del material conformante del lecho del río.
- Sección transversal que muestre la geología de la zona de ubicación de la bocatoma.

- c) Coeficiente de permeabilidad del suelo de cimentación.
- d) Capacidad portante del suelo seco y saturado.
- e) Resultados sobre ensayos de hinchado de pilotes o tablaestacas.
- f) Los coeficientes de diseño sísmico.
- g) Los coeficientes de fricción estática del material de cimentación.

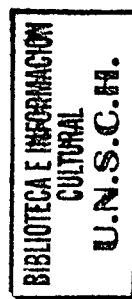
3.4) ESTUDIOS HIDROLÓGICOS

Es de suma importancia conocer el comportamiento hidrológico del río, ya que esto permitirá garantizar el caudal a derivar y así como definir el dimensionamiento de los elementos conformantes de la bocatoma, entre los datos a obtener tenemos:

- a) Caudales de máximas avenidas, que permitan fijar los niveles máximos de los muros de encauzamiento, de los barrajes y de los mecanismos de izaje de las compuertas, cuyo tiempo de retorno es de 25 años ($T_r = 25$ años).
- b) Caudales mínimos que permitan fijar los niveles de los umbrales de toma.
- c) Caudales medios con el objeto de conocer las masas de agua posibles de ser derivadas.

Debido a la poca duración de las avenidas, el daño que una crecida extraordinaria podría causar en esta clase de obra, es relativamente pequeño. Como el costo de construcción de una toma segura contra crecientes de cualquier magnitud es elevado, se considera suficiente basarse en el diseño de una crecida de cada 25 años.

Es lógico suponer que, para el proyecto de riego de la zona de influencia de la bocatoma, se han ejecutado un estudio hidrológico detallado de las posibles fuentes de agua, por lo que, se da por descontado la existencia de un estudio hidrológico sumamente detallado y que para nuestro caso, solo se usaran los datos anteriormente recomendados.



3.5) ESTUDIO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sólidos son perjudiciales en las estructuras de un proyecto hidráulico dado, producen erosión en los revestimientos de los canales o en otros casos reducción de la sección útil.

Para evitar estos perjuicios es necesario efectuar estudios de transporte de sedimentos aguas arriba de la toma.

El estudio de sedimentos debe efectuarse tanto de materiales de fondo como en los de suspensión. Igualmente se deben realizar análisis mineralógicos y químicos de las partículas para conocer sus propiedades abrasivas.

3.6) ESTUDIO ECONÓMICO

Constituye en muchas oportunidades el factor determinante para fijar la ubicación de la toma, ya que el costo de ella no está en función del volumen captado, sino de las condiciones que presenta el cauce en dicha zona. De allí que se deberá buscar la zona que represente el menor costo posible, ya sea en el tratamiento de terreno, volumen de la obra, proceso constructivo y funcionamiento de la estructura.

La rentabilidad de un proyecto dependerá fundamentalmente del costo de cada una de las estructuras que la conforman, el costo de la toma finalmente tiene un límite para asegurar un beneficio – costo favorable.

3.7) CONDICIONES ECOLÓGICAS

Siempre toda construcción en un río causa alteración del equilibrio ecológico de la zona, sobre todo en lo relacionado con la fauna. Es por esta razón que, se debe tratar de no alterar dicho equilibrio mediante la construcción de estructuras que compensen este desequilibrio causado por la bocatoma. Aunque debemos reconocer que, en nuestro país estas estructuras son de costo elevado y que siempre se tratan de obviar por limitaciones presupuestales, como por ejemplo la escalera de peces.

3.8) OTROS REQUERIMIENTOS

En este grupo se puede incluir las limitaciones u obligaciones que se deben tomar para la construcción de la bocatoma, estas son de orden legal, ya que mediante la construcción de la bocatoma por efecto del remanso podrían ser inundados terrenos aledaños o construcciones anteriores (puentes, caminos), etc.

Asimismo en algunos casos será necesario pedir autorización del instituto nacional de cultura por la existencia de restos arqueológicos. Por este motivo, todo diseño deberá ser previamente coordinado con todas las dependencias estatales y particulares que estén relacionados con el proyecto con la finalidad de evitar duplicidad o generación de problemas en proyectos similares por la construcción de una estructura en el mismo cauce.

Estudio de canteras de materiales que permitan construir las estructuras de concreto y otras.

4.0 HIDRAULICA FLUVIAL APLICADO AL DISEÑO DE BOCATOMAS

El conocimiento de la variación de las características hidráulicas y geométricas del cauce de un río para diferentes caudales es importante en el diseño de una estructura de captación (Bocatomas). Por lo cual los principales conceptos con sus respectivos cálculos se indican a continuación.

4.1) TIPOS DE ESTABILIDAD

Es la relación con la predicción de la variación de las características geométricas y pendiente de un río cuando se modifica alguna de las condiciones naturales de la cuenca y del río. Por ejemplo, al alterar el hidrograma de escurrimiento y el transporte de sedimento mediante la construcción de un embalse o aumentar el volumen de sedimentos en el cauce debido a la deforestación en partes de la cuenca, etc. Si se construye un embalse, el tramo agua abajo adyacente tiende a no arrastrar material; ese efecto es la causa principal que provoca el cambio de sección y pendiente. En los siguientes tramos aguas abajo, las modificaciones son ocasionadas por el cambio que sufre el escurrimiento, el que ahora estará formado por las descargas de la obra de toma y del vertedero.

Se puede hablar de diferentes grados de estabilidad:

4.1.1) Estabilidad estática

Se presenta cuando la corriente de los márgenes y el fondo, permanece constante por lo que la sección no varía, y en planta el río no sufre ningún corrimiento lateral. Este grado de estabilidad lo tienen los canales sin arrastre de sedimentos o algunos ríos durante la época de estiaje.

4.1.2) Estabilidad dinámica

Corresponde a los ríos o canales que tienen un solo cauce y todo el gasto pasa por él; además existe arrastre de sedimentos y aunque sus secciones transversales llegan a variar, ellas son aproximadamente similares año con año al ser observados en la misma época.

4.1.3) Estabilidad morfológica

Cubre el concepto más amplio, esto es que en cualquier cauce natural, la pendiente, el ancho, tirante y números de brazos por los que escurre el

gasto, dependen del propio gasto y de su distribución anual, de las características del sedimento y de la calidad y cantidad del transporte de sedimentos que procede de aguas arriba o que es aportado lateralmente.

4.2) GRADOS DE LIBERTAD

Otro concepto de interés y que permite mejor comprensión de los métodos que serán descritos es el grado de libertad de una corriente.

4.2.1) Esguerrimiento con un grado de libertad

Se dice cuando se tiene un canal revestido o sin arrastre, con ancho y pendiente dadas, y se hace pasar un gasto determinado. Este esguerrimiento tiene un grado de libertad y basta una ecuación para conocer el tirante, que es la única variable.

4.2.2) Esguerrimiento con dos grados de libertad

Si en un canal revestido, además de hacer pasar un gasto líquido se elimina constantemente un cierto gasto sólido, se ajustaran la pendiente del fondo y el tirante, hasta valores tales que el gasto líquido sea capaz de arrastrar ese material sólido, entonces se dice que el esguerrimiento tiene dos grados de libertad, ya que se pueden ajustar el tirante y la pendiente, y se necesitarán dos ecuaciones para el cálculo de las dos variables.

4.2.3) Esguerrimiento con tres grados de libertad

Si se forma un canal en material aluvial, y si se alimenta un gasto líquido y un gasto sólido como en el caso anterior, se ajustaran la pendiente ancho y tirante de la sección hasta que el gasto líquido arrastre en forma uniforme y continúa el sedimento alimentando. En estas condiciones se dice que la corriente tiene tres grados de libertad, por lo que requerirán tres ecuaciones a fin de definir el estado de equilibrio.

4.3) GASTO FORMATIVO

Cuando se estudia la estabilidad de un cauce, es indispensable fijar un gasto que represente el hidrograma anual. Este gasto asociado con la estabilidad de un cauce se denomina gasto formativo, existen al respecto varios criterios para determinarlo:

1^{er} Criterio. El gasto formativo que recibe este nombre es aquel que de permanecer constante a lo largo del año, transportará la misma cantidad de material del fondo que el hidrograma anual, por tanto, para encontrar el valor del gasto dominante se calcula para cada día del año el transporte de fondo en función del gasto medio diario aforado; sumando todos los resultados se obtiene el transporte anual del fondo y se divide entre 365 días del año, logrando el transporte medio diario que tiene esa capacidad de transporte. El gasto líquido, en m³/seg, asociado a ese gasto diario, recibe el nombre de dominante.

2^{do} Criterio. El gasto formativo es el que tiene un periodo de retorno de 1,4 años. Si hay una estación de aforos cercana, se puede obtener analizando los gastos máximos con los criterios de Nash y Gumbel.

3^{er} Criterio. Algunos autores consideran como gasto formativo (en ríos de planicie), el gasto máximo que es capaz de Pasar por el cauce principal sin que desborde hacia a la planicie. En la mayoría de los problemas estudiados este criterio ha conducido a resultados más congruentes.

4.4) CAUCES ESTABLES

Cuando una corriente escurre por un solo cauce se ha mencionado que existe un equilibrio entre el hidrograma de la corriente o gasto formativo, el gasto solido que entra al tramo en estudio, las características de los materiales del fondo y orillas, la pendiente media del tramo y las características de la sección transversal.

Generalmente conocido el gasto formativo Q , el transporte de solidos que entra al tramo en estudio, g_B o g_{BT} , y un diámetro representativo, D , del material de fondo, se desea obtener la pendiente S , ancho B y tirante Y , que hagan estable el tramo en estudio. Para lograr lo anterior se utilizan diferentes métodos para analizar la estabilidad de cauces, entre los que pueden citar los propuestos por Simons y Henderson, Altunin, Blench, y Pettit.

4.4.1) Método de Blench

La teoría de régimen se desarrolló inicialmente en la India para diseñar canales de riego. Una gran cantidad de investigadores han hecho aportaciones a esta teoría, entre ellos Blench, cuyo método se recomienda.

Según Blench, las tres ecuaciones de diseño para obtener las características geométricas y la pendiente de un canal estable son:

$$B = 1.81 * \sqrt{\frac{Q * Fb}{Fa}} \quad \dots 4.01$$

$$d = 1.02 * \left(\frac{Q * Fa}{Fb^2}\right)^{1/3} \quad \dots 4.02$$

$$S = \frac{0.56 * (1 + 0.012 * Ca) * Fb^{5/6} * Fa^{1/12}}{\left(1 + \frac{Ca}{2330}\right) * K * Q^{1/6}} \quad \dots 4.03$$

Donde:

Fb: Factor de fondo.

Fa: Factor de orilla.

Ca: Concentración del sedimento arrastrado del fondo, en partes por millón en peso.

K: coeficiente igual a:

$$K = \frac{6.03 * g}{v^{1/4}} \quad \dots 4.04$$

g: Aceleración de la gravedad.

v: Viscosidad cinemática.

Los coeficientes de las ecuaciones anteriores obligan a utilizar el sistema métrico.

Tabla N° 4.01: Valores de factor de fondo *Fb*

| <i>Descripcion</i> | <i>Fb</i> |
|------------------------|------------|
| <i>Material fino</i> | <i>0.8</i> |
| <i>Material grueso</i> | <i>1.2</i> |

Tabla N° 4.02: Valores de factor de Orilla F_a

| <i>Descripcion</i> | <i>Fa</i> |
|--------------------------------------|------------|
| <i>Material suelto</i> | <i>0.1</i> |
| <i>Material ligeramente cohesivo</i> | <i>0.2</i> |
| <i>Material cohesivo</i> | <i>0.3</i> |

El factor de fondo F_b , puede ser evaluado mediante las expresiones:

- ✓ Si el río arrastra poco sedimento y el fondo es arenoso:

$$F_b = 1.9 * D^{1/2} \quad \dots 4.05$$

Donde:

D : Diámetro medio de las partículas, en mm.

- ✓ Si existe arrastre de sedimento y el fondo arenoso.

$$F_b = 1.9 * D^{1/2} * (1 + 0.012 * C_a) \quad \dots 4.06$$

El método de Blench conviene utilizarlo en el diseño de canales de riego y en tramos de ríos con material fino y con cierta cohesión. Debe tenerse cuidado cuando su aplicación se extrapola a cauces naturales o canales con material grueso.

4.4.2) Método de Altunin

Para conocer la estabilidad de un cauce, de material granular, Altunin tomo en cuenta además de las variables ya indicadas, la mayor o menor resistencia de las orillas a la erosión, y la zona del río donde se encuentra el tramo de estudio. Con ello supuso que una sección es de tipo a, si las orillas son difícilmente erosionables y b si son fácilmente erosionables.

Las tres ecuaciones que propone para obtener los tres grados de libertad son:

La primera que permite conocer la velocidad media de la corriente que no produce erosión, tomando en cuenta el diámetro medio del material del fondo y el tirante.

$$U = a * V_\phi * d^\alpha \quad \dots 4.07a$$

La segunda define la velocidad media de la corriente en función de la resistencia del fondo.

$$U = k * d^z * S^x \quad \dots 4.07b$$

La tercera resultado de la observación de secciones naturales estables y fue propuesta por Glushkov.

$$B^m = K * d \quad \dots 4.07c$$

La ecuación anterior se puede transformar y se ha propuesto utilizarla también como.

$$B = \frac{A * Q^{0.5}}{S^{0.2}} \quad \dots 4.07d$$

Donde:

a : Constante igual a 1 en la planicie y 1.2 en la zona intermedia.

V_ϕ : Velocidad media máxima que soportan las partículas del fondo sin que se produzca erosión cuando el tirante es de 1m. Se obtiene con ayuda de la tabla N° 4.03 en función del diámetro medio de las partículas, en m/s.

d : Tirante medio de la sección, igual al área entre el ancho de la superficie libre, en m.

α : Exponente variable que depende del tirante y que puede tomar los valores.

$$\alpha = \frac{1}{3}, \quad \text{si } d < 1.50m \quad \dots 4.08a$$

$$\alpha = \frac{1}{4}, \quad \text{si } 1.50 < d < 2.50m \quad \dots 4.08b$$

$$\alpha = \frac{1}{5}, \quad \text{si } d > 2.50m \quad \dots 4.08c$$

Tabla N° 4.03: Valores de la velocidad V_{ϕ} en función del diámetro medio de las partículas cuando el tirante es de 1m.

| <i>Diametro (mm)</i> | <i>Velocidad (m/seg)</i> | <i>Diametro (mm)</i> | <i>Velocidad (m/seg)</i> |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1.0 | 0.60 | 50 | 1.50 |
| 2.5 | 0.75 | 52 | 1.54 |
| 5.0 | 0.80 | 54 | 1.56 |
| 10.0 | 0.83 | 56 | 1.59 |
| 15.0 | 0.86 | 58 | 1.62 |
| 20.0 | 0.90 | 60 | 1.65 |
| 25.0 | 0.98 | 65 | 1.69 |
| 30.0 | 1.04 | 70 | 1.73 |
| 32.0 | 1.11 | 75 | 1.76 |
| 34.0 | 1.17 | 80 | 1.80 |
| 36.0 | 1.24 | 85 | 1.84 |
| 38.0 | 1.29 | 90 | 1.88 |
| 40.0 | 1.35 | 95 | 1.91 |
| 42.0 | 1.38 | 100 | 1.95 |
| 44.0 | 1.41 | 150 | 2.40 |
| 46.0 | 1.44 | 200 | 2.60 |

k: Coeficiente de rugosidad que para cauces con gravas o diámetros mayores Altunin lo supone igual a 11.

z: Exponente que para las condiciones indicadas se recomienda igual 1/2.

x: Exponente que para las condiciones indicadas se recomienda igual a 1/3.

B: Ancho se la superficie libre del agua, en metros.

m: Exponente que es igual a 0.5 para ríos de montaña y 1.0 para cauces aluviales cerca de la desembocadura; se acepta 0.7 para cauces arenosos. Este exponente también se puede evaluar mediante la expresión:

$$m = 0.72 * \left(\frac{\Delta * D}{R_H * S} \right)^{0.2} \quad \dots 4.09$$

A: Coeficiente dado por la expresión

$$A = (n * K^{5/3})^{\frac{3}{3+5m}} \quad \dots 4.10$$

Su valor se obtiene de la tabla N° 4.04

Tabla N° 4.04: Valores de A y m para cauces estables

| Zona del río y conducción del cauce | Numero de Froude | Parametro A | | Valor del exponente m, cuando k=10 | |
|---|------------------|-----------------|------|------------------------------------|------|
| | | Tipo de seccion | | a | b |
| | | a | b | | |
| Zona de alta montaña: Cauce rocoso cubierto de piedras. | 1.0 | 0.50 | 0.75 | - | 1.00 |
| Zona de montaña: Cauce formado con cantos rodados, boleó guijarros. Rapidas y pendiente cercana a la crítica. | 1.0-0.50 | 0.75 | 0.90 | 1.00 | 0.80 |
| Zona en las faldas de la montaña: Llegada del río al valle: Cauce formado por guijarros, gravas y arena. Corriente tranquila. | 0.50-0.20 | 0.90 | 1.00 | 0.80 | 0.75 |
| Zona intermedia: Cauce formado por arena gruesa, media y fina. Corriente tranquila. | 0.20-0.04 | 1.00 | 1.10 | 0.75 | 0.70 |
| Zona de planicie: Cauce formado de arena fina. | | | | | |
| a. Río caudaloso | 0.2-0.0 | 1.10 | 1.30 | 0.75 | 0.70 |
| b. Río poco caudaloso | 0.3-0.20 | 1.30 | 1.70 | 0.60 | 0.50 |

En la expresión propuesta para evaluar A , n es el coeficiente de rugosidad según Manning, y K un coeficiente que depende de la resistencia de las orillas, cuyos valores son: 3 a 4 si el material que forma el cauce es muy resistente (tipo a), 16 a 20 para material fácilmente erosionable (tipo b) y para material aluvial entre 8 y 12. En los problemas de ingeniería se acepta $K = 10$.

A partir de las ecuaciones 4.07a, 4.07b y 4.07d, se obtienen las ecuaciones generales de diseño mostrado en la tabla N° 4.05, donde se ha considerado que z y x tiene los valores indicados anteriormente. Las ecuaciones se han presentado para los tres valores de α mencionados.

Dado que la información disponible para el diseño puede variar y con ello, las tres incógnitas que deben despejarse de las tres ecuaciones originales, en las tablas N° 4.06, 4.07 y 4.08 se indican tres posibles combinaciones de parámetros por obtener. En ella aparecen cinco incógnitas para cada grupo, pero eso se debe a que se han añadido dos ecuaciones adicionales de continuidad.

$$U = \frac{q}{d} \quad 4.11$$

$$Q = U * B * d \quad 4.12$$

Donde:

q : Gasto unitario, en $m^3/s \cdot m$.

Tabla N° 4.05: Formulas para el cálculo de cauces estables formados en terrenos de arena gruesa a guijarros (partículas con diámetro mayor de 1mm).

| ELEMENTO DE CALCULO | $\alpha = 1/5$ | $\alpha = 1/4$ | $\alpha = 1/3$ |
|--|---|---|--|
| Profundidad media, d | $\frac{0.732 * V_{\phi}^{10/3}}{(1000 * S)^{10/9}}$ | $\frac{0.685 * V_{\phi}^4}{(1000 * S)^{4/3}}$ | $\frac{0.565 * V_{\phi}^6}{(1000 * S)^2}$ |
| Velocidad media, U | $\frac{0.939 * V_{\phi}^{5/3}}{(1000 * S)^{2/9}}$ | $\frac{0.909 * V_{\phi}^3}{(1000 * S)^{1/3}}$ | $\frac{0.835 * V_{\phi}^3}{(1000 * S)^{2/9}}$ |
| Gasto unitario, q | $\frac{0.686 * V_{\phi}^5}{(1000 * S)^{4/3}}$ | $\frac{0.623 * V_{\phi}^6}{(1000 * S)^{5/3}}$ | $\frac{0.471 * V_{\phi}^9}{(1000 * S)^{8/3}}$ |
| Gasto de agua en un brazo estable, Q | $\frac{7.46 * A^2 * V_{\phi}^{10}}{(1000 * S)^{3.07}}$ | $\frac{6.20 * A^2 * V_{\phi}^{12}}{(1000 * S)^{3.73}}$ | $\frac{3.50 * A * V_{\phi}^{10}}{(1000 * S)^{5.73}}$ |
| Pendiente del curso estable, S | $\frac{0.00192 * A^{0.653} * V_{\phi}^{3.26}}{Q^{0.326}}$ | $\frac{0.00163 * A^{0.563} * V_{\phi}^{3.21}}{Q^{0.268}}$ | $\frac{0.00123 * A^{0.31} * V_{\phi}^{3.15}}{Q^{0.154}}$ |
| Velocidad de formación, V_{ϕ} | $\frac{6.85 * Q^{0.10} * S^{0.307}}{A^{0.20}}$ | $\frac{7.40 * Q^{0.083} * S^{0.312}}{A^{0.175}}$ | $\frac{8.45 * Q^{0.049} * S^{0.317}}{A^{0.10}}$ |

Tabla N° 4.06: Formulas de diseño para cauces estables en grava o boleo.

| <i>Variable por calcular</i> | $\alpha = 1/5$ | $\alpha = 1/4$ | $\alpha = 1/3$ |
|------------------------------|---|---|--|
| <i>Primer problema</i> | | <i>Datos: Q, V_φ, A</i> | |
| <i>S</i> | $\frac{0.00192 * A^{0.653} * V_{\phi}^{3.26}}{Q^{0.326}}$ | $\frac{0.00163 * A^{0.563} * V_{\phi}^{3.21}}{Q^{0.268}}$ | $\frac{0.00123 * A^{0.31} * V_{\phi}^{3.35}}{Q^{0.268}}$ |
| <i>B</i> | $\frac{A * Q^{0.5}}{S^{0.2}}$ | $\frac{A * Q^{0.5}}{S^{0.2}}$ | $\frac{A * Q^{0.5}}{S^{0.2}}$ |
| <i>q</i> | $\frac{Q}{B}$ | $\frac{Q}{B}$ | $\frac{Q}{B}$ |
| <i>d</i> | $\left(\frac{q}{V_{\phi}}\right)^{\frac{5}{6}}$ | $\left(\frac{q}{V_{\phi}}\right)^{\frac{4}{9}}$ | $\left(\frac{q}{V_{\phi}}\right)^{\frac{3}{4}}$ |

Tabla N° 4.07: Formulas de diseño para cauces estables en grava o boleo.

| <i>Variable por calcular</i> | $\alpha = 1/5$ | $\alpha = 1/4$ | $\alpha = 1/3$ |
|------------------------------|---|---|---|
| <i>Segundo problema</i> | | <i>Datos: S, V_φ, A</i> | |
| <i>d</i> | $\frac{0.732 * V_{\phi}^{10/3}}{(1000 S)^{10/3}}$ | $\frac{0.685 * V_{\phi}^4}{(1000 S)^{5/4}}$ | $\frac{0.565 * V_{\phi}^4}{(1000 S)^2}$ |
| <i>q</i> | $V_{\phi} * d^{6/5}$ | $V_{\phi} * d^{5/4}$ | $V_{\phi} * d^{4/3}$ |
| <i>B</i> | $\frac{A^2 * q}{S^{0.4}}$ | $\frac{A^2 * q}{S^{0.4}}$ | $\frac{A^2 * q}{S^{0.4}}$ |
| <i>Q</i> | $q * B$ | $q * B$ | $q * B$ |

Tabla N° 4.08: Formulas de diseño para cauces estables en grava o boleo.

| <i>Variable por calcular</i> | $\alpha = 1/5$ | $\alpha = 1/4$ | $\alpha = 1/3$ |
|------------------------------|---|---|--|
| <i>Tercer problema</i> | <i>Datos: Q, S, A</i> | | |
| V_ϕ | $\frac{0.817 * Q^{0.1} (1000S)^{0.307}}{A^{0.2}}$ | $\frac{0.855 * Q^{0.053} (1000S)^{0.312}}{A^{0.176}}$ | $\frac{0.943 * Q^{0.049} (1000S)^{0.317}}{A^{0.18}}$ |
| B | $\frac{A * Q^{0.5}}{S^{0.2}}$ | $\frac{A * Q^{0.5}}{S^{0.2}}$ | $\frac{A * Q^{0.5}}{S^{0.2}}$ |
| q | $\frac{Q}{B}$ | $\frac{Q}{B}$ | $\frac{Q}{B}$ |
| d | $\left(\frac{q}{V_\phi}\right)^{5/6}$ | $\left(\frac{q}{V_\phi}\right)^{4/9}$ | $\left(\frac{q}{V_\phi}\right)^{3/4}$ |

4.4.3) Método de Pettit

Dentro de otros métodos americanos el de Pettit proporciona resultados comparables con otras fórmulas.

Ancho superficial:

$$B = 2.45 * Q^{0.5} \quad \dots 4.13$$

Profundidad:

$$H = 0.715 * Q^{0.3} \quad \dots 4.14$$

Área hidráulica:

$$A = 1.25 * Q^{0.8} \quad \dots 4.15$$

Radio hidráulico:

$$R = 0.511 * Q^{0.3} \quad \dots 4.16$$

Velocidad media:

$$V = 0.8 * Q^{0.2} \quad \dots 4.17$$

Según este método la sección considerada por el emplazamiento de la estructura de captación, tendrá un cauce estable.

4.4.4) Otros métodos.

Según Simons y Henderson, para el cálculo del ancho estable B metros, se utiliza la siguiente relación:

$$B = K1 * \sqrt{Q} \quad \dots 4.18$$

Rangos en que trabaja la metodología:

S: Pendiente del cauce 0.06 – 10%.

Dm: Diámetro medio de las partículas 0.03 – 80mm.

Q: Caudal máximo instantáneo 0.15 – 250m³/s.

Tabla N° 4.09: Valores de K1 para trabajar con la fórmula de Simons y Henderson

| <i>Condiciones de fondo de rio</i> | <i>K1</i> |
|---|------------|
| <i>Fondo y orillas de arena</i> | <i>5.7</i> |
| <i>Fondo de arena y orillas de material cohesivo</i> | <i>4.2</i> |
| <i>Fondo y orillas de material cohesivo</i> | <i>3.6</i> |
| <i>Fondo y orillas de grava</i> | <i>2.9</i> |
| <i>Fondo de arena y orillas de material no cohesivo</i> | <i>2.8</i> |

4.5) SOCAVACIÓN

La socavación es la remoción de materiales del lecho y de las bancas de un cauce debido a la acción erosiva del flujo del agua alrededor de una estructura hidráulica.

La decisión final sobre la cimentación de la estructura hidráulica, y/o sus medidas de protección, debe basarse no solo en los resultados que las ecuaciones arrojen, sino también, en el buen criterio, experiencia y conocimiento de las variables involucradas en el problema por parte del ingeniero evaluador.

4.5.1) Calculo de la forma de socavación

Algunos de los métodos para calcular profundidades de socavación requieren que se determine previamente la forma de socavación: en lecho móvil (vivo) o en agua clara. Para esto es necesario que se determine si el flujo en el cauce principal o en las laderas aguas arriba de la captación está transportando o no materiales para luego escoger la ecuación que resulte apropiada.

Las profundidades de socavación en lecho móvil pueden estar limitadas si existe una apreciable cantidad de partículas grandes en el fondo del cauce, caso en el cual es aconsejable usar también ecuaciones de socavación en agua clara y escoger la profundidad que resulte menor de las dos o la que a criterio resulte la más representativa. Así mismo, ecuaciones de socavación en agua clara deben usarse si en poca cantidad de material que es transportado desde aguas arriba a la contracción o si el material es muy fino como para ser retenido en el hueco de socavación.

Para determinar si el flujo aguas arriba está transportando materiales de lecho, se debe calcular la velocidad crítica para el inicio de transporte de sedimentos V_c de la partícula D_{50} y compararla con la velocidad media de la corriente en el cauce principal o en las laderas.

Agua clara: $V < V_c$

Lecho móvil: $V > V_c$

La velocidad media se determina según la ecuación de Manning y para calcular la velocidad crítica es usual aplicar la siguiente ecuación recomendada en HEC-18.

$$V_c = 6.19 * h^{1/6} * D_{50}^{1/3} \quad \dots 4.19$$

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \quad \dots 4.20$$

Donde:

V_c : Velocidad crítica por encima de la cual el material de lecho con tamaño D_{50} o más pequeño es transportado, en m/s.

h : Profundidad del flujo, en m.

D_{50} : Diámetro del fondo del cauce, correspondiente al 50% de la curva granulométrica del material que pasa, expresado en peso.

4.5.2) Cálculo de la socavación general por contracción

La causa más común de socavación general es la contracción del flujo producida por la reducción de la sección del cauce por la construcción de obras hidráulicas.

a) Método de Lischtván – Levediev

Este es un método que permite el cálculo de la socavación general del cauce durante crecientes independientemente de que exista o no una obra hidráulica. Si el método se aplica para la zona de la obra hidráulica, quiere decir que se está considerando también el efecto de la contracción, y por lo tanto, éste no debe considerarse.

El método propuesto por Lischtván – Levediev se fundamenta en el equilibrio que debe existir entre la velocidad media real de la corriente (V_r) y la velocidad media erosiva (V_e). La velocidad erosiva no es la que da inicio al movimiento de las partículas en suelos sueltos, sino la velocidad mínima que mantiene un movimiento generalizado del material del fondo. Si el suelo es cohesivo, es la velocidad que es capaz de levantar y poner el sedimento en suspensión. La velocidad erosiva es función de las características del sedimento del fondo y de la profundidad del agua. La velocidad real está dada principalmente en función de las características del río: pendiente, rugosidad, y tirante del agua.

- **Velocidad media real:**

$$Q_d = \frac{A}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \quad \dots 4.21$$

Q_d : Caudal de diseño, m³/s.

A : Área hidráulica, m².

R : Caudal de diseño, m.

S : Pendiente hidráulica, o, pendiente media del río, m/m.

n : Coeficiente de rugosidad.

$$\alpha = \frac{Q_d}{A * R^{2/3}} = \frac{S^{1/2}}{n} \quad \dots 4.22$$

α : Coeficiente de sección dependiente de las características hidráulicas.

Asumiendo que el perímetro mojado es igual al ancho libre de la superficie del agua, la cual es válida para cauces anchos.

$$\alpha = \frac{S^{1/2}}{n} \cong \frac{Q_d}{B_e * h^{5/3}} \cong \frac{Q_d}{B_e * h_m^{5/3}} \quad \dots 4.23$$

Considerando que el caudal permanece constante antes y después de ocurrida la socavación, se tiene:

$$Q_d = \alpha * h^{5/3} * B_e = V_r * H_s * B_e \quad \dots 4.24$$

$$V_r = \frac{\alpha * h^{5/3}}{H_s} \quad \dots 4.25$$

V_r : Velocidad real del flujo.

- **Velocidad erosiva:**

a) Para suelos granulares: La velocidad erosiva es la que levanta y mantiene el material en movimiento.

$$V_e = 0.68 * \beta * D_m^{0.28} * H_s^z \quad \dots 4.26$$

V_e : Velocidad erosiva.

β : Coeficiente de frecuencia.

D_m : Diámetro medio de las partículas del material granular.

z : Exponente variable en función del diámetro medio de la partícula.

$$\beta = 0.7929 + 0.0973 * \text{Log}Tr \quad \dots 4.27$$

β : Coeficiente de correlación o de ajuste.

Tr : Periodo de retorno.

$$z = 0.394557 - 0.04136 * \text{Log}Dm - 0.0089 * \text{Log}^2Dm \quad \dots 4.28$$

b) Para suelos cohesivos: La velocidad erosiva es la que es capaz de poner las partículas en suspensión.

$$V_e = 0.60 * \beta * \gamma_m^{1.18} * H_s^x \quad \dots 4.29$$

V_e : Peso específico de la muestra agua sedimento.

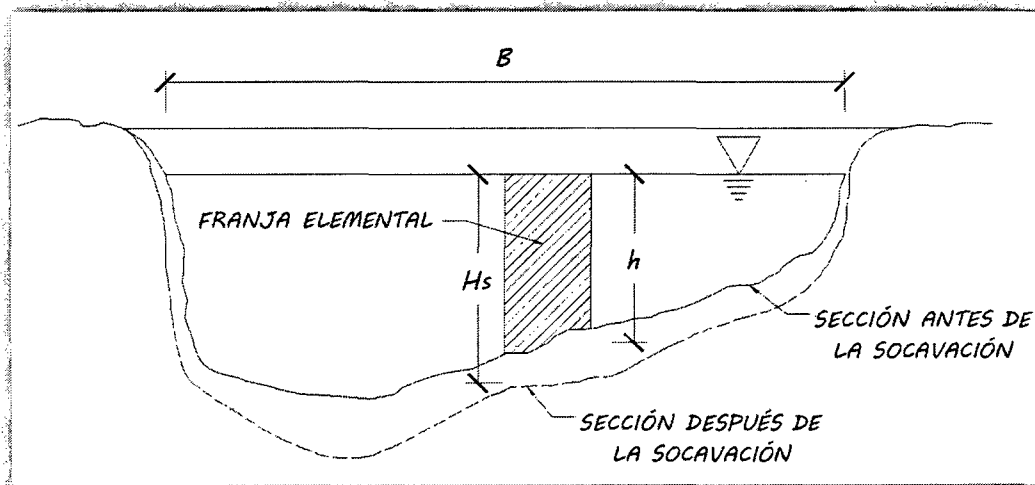
x : Exponente variable que depende del peso volumétrico del material cohesivo seco.

$$x = 0.892619 - 0.58073 * \gamma_m + 0.136275 * \gamma_m^2 \quad \dots 4.30$$

- **Determinación de la profundidad de socavación en suelos homogéneos:**

La profundidad de socavación en cualquier punto de la sección transversal se obtiene cuando la velocidad media del cauce iguala a la velocidad erosiva ($V_r = V_e$). Conocido la sección transversal en el lugar de la obra hidráulica antes del paso de la avenida, se escogen algunos puntos en cuyas verticales se desea conocer la profundidad de socavación. Uniendo estos puntos se obtiene el perfil de socavación. Considerando que la hipótesis del método es que el gasto en cada franja del cauce permanece constante durante el proceso erosivo, la profundidad de socavación será igual a 0 en las orillas, por lo que no se permite estimar ninguna erosión lateral en las márgenes.

Figura N° 4.01: Sección transversal del cauce.



Las siguientes expresiones asumen que los suelos son homogéneos y que la rugosidad del cauce es homogéneo.

a) Para suelos granulares:

$$H_s = \left[\frac{\alpha * h^{5/3}}{0.68 * \beta * D_m^{0.28}} \right]^{1/1+z} \quad \dots 4.31$$

La anterior expresión no considera el efecto de la contracción del flujo debida a la obra hidráulica, ni el peso específico del agua

durante la creciente, por lo que debe corregirse mediante unos factores de ajuste cuando se trata de evaluar obras hidráulicas.

El factor de corrección por contracción μ es menor que 1 y contribuye al aumento de la profundidad de socavación.

Tabla N° 4.10: Factor de corrección por contracción del cauce μ

| V (m/s) | Luz libre (m) | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 13 | 16 | 18 | 21 | 25 | 30 | 42 | 52 | 63 | 106 | 124 | 200 |
| < 1.0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1.5 | 0.94 | 0.96 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 2 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 |
| 2.5 | 0.90 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 1.00 |
| 3 | 0.89 | 0.91 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| 3.5 | 0.87 | 0.90 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| > 4.0 | 0.85 | 0.89 | 0.91 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.95 | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |

V: Velocidad media en la sección transversal

μ : 1.0 si no hay obstáculos.

Para obras de captación, distancia entre los muros de encauzamiento.

Adicionalmente, el efecto del peso específico del agua durante la creciente se considera en otro factor de corrección φ que es mayor o igual que la unidad y su efecto es reducir la profundidad de socavación.

$\varphi = 1$, si $\gamma_m = 1.0 \text{ tn/m}^3$ (agua clara).

γ_m : Peso específico de la muestra agua sedimento.

$\varphi = -0.54 + 1.5143\gamma_m$, si $\gamma_m > 1.0 \text{ tn/m}^3$ (lecho móvil).

La ecuación final para el cálculo de la socavación considerando los factores de corrección por contracción y peso específico del agua, es la siguiente:

$$H_s = \left[\frac{\alpha * h^{5/3}}{0.68 * \beta * \mu * \varphi * D_m^{0.28}} \right]^{1/1+z} \quad \dots 4.32$$

H_s : Profundidad de socavación, en m.

h : Tirante del agua, en m.

β : Coeficiente de frecuencia.

μ : Factor de corrección por contracción del cauce.

φ : Factor de corrección por forma de transporte de sedimentos.

b) Para suelos cohesivos:

Igualando las ecuaciones 4.25 y 4.29 y considerando los coeficientes de corrección por contracción y peso específico del agua durante crecientes, se tiene:

$$H_s = \left[\frac{\alpha * h^{5/3}}{0.60 * \beta * \mu * \varphi * \gamma_s^{1.18}} \right]^{1/1+x} \quad \dots 4.33$$

γ_s : Peso específico del sedimento del lecho, en tn/m³.

β : Coeficiente de frecuencia.

μ : Factor de corrección por contracción del cauce.

φ : Factor de corrección por forma de transporte de sedimentos.

b) Método de Straub

La siguiente expresión se usa para tener un estimativo del posible descenso que sufrirá el fondo del cauce debido a una reducción en su sección transversal.

$$H_s = \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{0.642} * h_1 \quad \dots 4.34$$

B_1 : Ancho de la superficie libre del cauce aguas arriba de la contracción, en m.

B_2 : Ancho de la superficie libre del cauce en la contracción, en m.

h_1 : Tirante del agua hacia aguas arriba de la contracción, en m.

4.5.3) Cálculo de la socavación local en muros de encauzamiento

Algunos métodos existen para la determinación de la socavación local: Liu, Chang y Skinner, Artamonov, Hire, Melville.

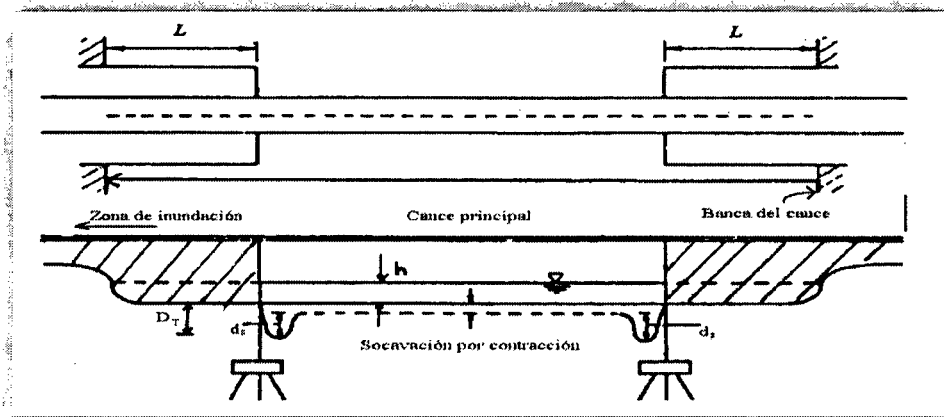
Todas las ecuaciones existentes tienen limitaciones de tipo práctico. Por ejemplo, las ecuaciones han sido desarrolladas para cauces de lecho arenoso y no tienen en cuenta la posibilidad de acorazamiento. Las ecuaciones para el cálculo de la socavación se basan en información de laboratorio y muy poca información de campo existe para su verificación. El

ingeniero diseñador debe determinar la ecuación que mejor se ajusta a las condiciones de campo dadas.

a) Método de Liu, Chang y Skinner

El método se basa en una ecuación resultante de estudios de laboratorio y análisis dimensional realizados en 1961 y se aplica para las siguientes condiciones que se ilustran en la siguiente figura:

Figura N° 4.02: Muros de encauzamiento que se prolongan hasta el cauce principal y no existe flujo en la zona de inundación.



Restricciones del método:

- Socavación en lecho móvil.
- Encauzamientos que se proyectan dentro del cauce principal.
- No existe flujo sobre las bancas del cauce de inundación.
- Flujo sub crítico.
- Lecho del cauce arenoso.
- Las ecuaciones deben ser ajustadas por un factor de corrección K_θ para considerar el efecto del ángulo de ataque del flujo.

$$\frac{d_s}{h} = K_f * \left(\frac{L}{h}\right)^{0.4} * F^{0.33} \quad \dots 4.35$$

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g * h}} \quad \dots 4.36$$

d_s : Profundidad de socavación de equilibrio medida desde el nivel medio del lecho hasta el fondo del hueco de socavación, en m.

h : Profundidad media del flujo aguas arriba en el cauce principal, en m.

L : Longitud del muro de encauzamiento y accesos que se opone al paso del agua, en m.

F_r : Numero de Froude en la sección de aguas arriba.

V : Velocidad media del flujo aguas arriba, en m/s.

K_f : Coeficiente de corrección por la forma del muro de encauzamiento.

$K_f = 1.1$ Para muros con pared inclinada hacia el cauce.

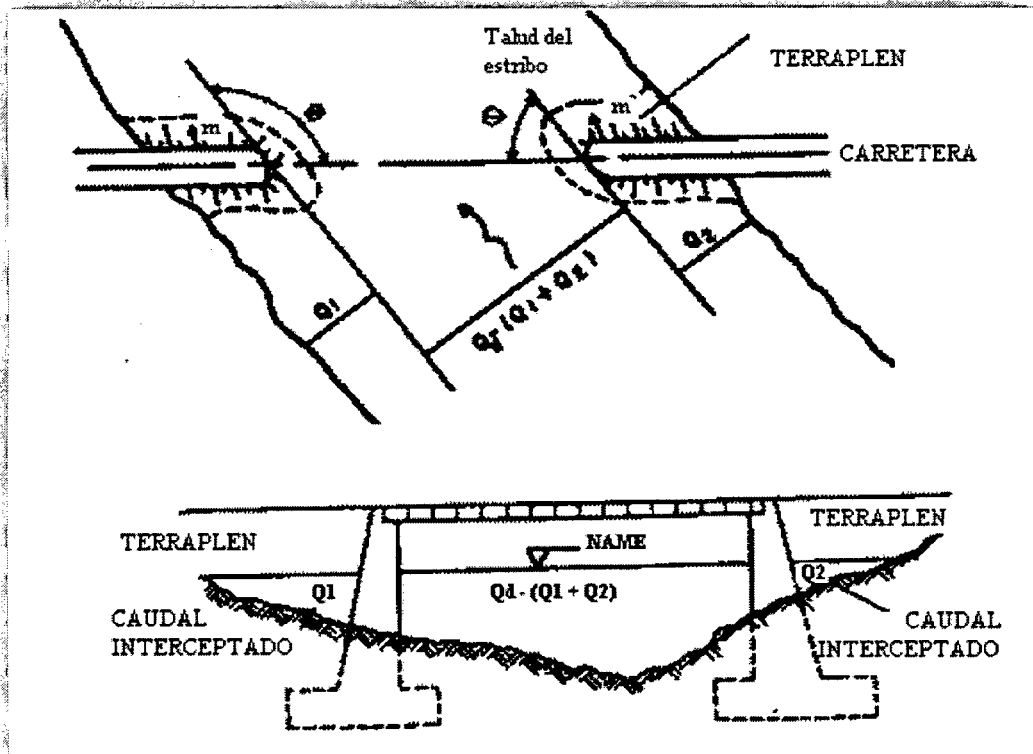
$K_f = 2.15$ Para muros con pared vertical.

b) Método de Artamonov

Este método permite determinar no solamente la profundidad de socavación al pie de estribos en puentes, sino también al pie de espigones. Depende de los siguientes factores:

- Porción del caudal que es interceptado por la estructura al meterse dentro de la corriente Q_1 o Q_2 .
- Talud que tienen los lados del muro.
- Angulo entre el eje longitudinal de la obra y de la corriente θ .

Figura N° 4.03: Intersección del flujo por los muros. Método de Artamonov.



$$H_T = K_\theta * K_Q * K_m * h \quad \dots 4.37$$

H_T : Profundidad del agua al pie del muro o espigón medida desde la superficie libre de la corriente.

K_θ : Coeficiente que depende del ángulo que forma el eje de la obra con la corriente, tabla 4.12.

K_Q : Coeficiente que depende de la relación entre el gasto teórico interceptado por la obra Q_1 o Q_2 y el caudal total Q_d que escurre por la sección transversal, tabla 4.13.

K_m : Coeficiente que depende del talud que tienen los lados del muro, tabla 4.14.

h : Tirante de agua en la zona cercana al espigón o muro antes de la socavación.

Tabla N° 4.11: Coeficiente de corrección K_θ

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| θ | 20° | 60° | 90° | 120° | 150° |
| K_θ | 0.84 | 0.94 | 1.00 | 1.07 | 1.19 |

Tabla N° 4.12: Coeficiente de corrección K_Q

| | | | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q_1/Q_d | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| K_Q | 2.00 | 2.65 | 3.22 | 3.45 | 3.67 | 3.87 | 4.06 | 4.20 |

Tabla N° 4.13: Coeficiente de corrección K_m

| | | | | | | |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| Talud m | 0.0 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 |
| K_m | 1.00 | 0.91 | 0.85 | 0.83 | 0.61 | 0.50 |

c) Método de Froehlich

La ecuación dada por Froehlich está basada en análisis dimensional y el análisis de regresión de datos de laboratorio para 170 mediciones de socavación en lecho móvil. Se recomienda su uso para socavación tanto en lecho móvil como en agua clara, para muros de encauzamiento que

se proyectan dentro del cauce principal o no y para flujo concentrado en el cauce principal o combinado con flujo sobre las zonas de inundación. La ecuación de Froehlich que a continuación se expone es de uso común en los Estados Unidos de América.

$$\frac{d_s}{h_e} = 2.27 * K_f * K_\theta * \left(\frac{L}{h_e}\right)^{0.43} * F_{re}^{0.61} + 1 \quad \dots 4.38$$

d_s : Profundidad de socavación.

h_e : Profundidad media del flujo (profundidad hidráulica) en la zona de inundación obstruida por la obra aguas arriba del muro de encauzamiento.

K_f : Coeficiente que depende de la forma del muro de encauzamiento.

K_θ : Coeficiente que depende del ángulo de ataque del flujo.

L : Longitud del muro de encauzamiento que se opone al paso de la agua proyectada normalmente al flujo.

F_{re} : Numero de Froude en la sección de aproximación obstruida por la obra.

Tabla N° 4.14: Coeficiente por la forma del muro K_f

| <i>Descripcion</i> | K_f |
|--|-------------|
| <i>Muro con pared vertical</i> | <i>1.00</i> |
| <i>Muro con pared vertical y aletas</i> | <i>0.82</i> |
| <i>Muro con pendiente hacia el cauce</i> | <i>0.55</i> |

$$K_\theta = \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.13} \quad \dots 4.39$$

θ : Angulo de inclinación del muro.

$\theta < 90$: Si el muro está inclinado hacia aguas abajo.

$\theta > 90$: Si el muro está inclinado hacia aguas arriba.

$$h_e = \frac{A_e}{L} \quad \dots 4.40$$

$$F_{re} = \frac{V_e}{\sqrt{g * h_e}} \quad \dots 4.41$$

$$V_e = \frac{Q_e}{A_e} \quad \dots 4.42$$

V_e : Velocidad del flujo obstruido por el muro en la sección de aguas arriba.

Q_e : Caudal obstruido por el muro aguas arriba de la obra.

A_e : Área del flujo de la sección de aguas arriba obstruida por la obra.

d) Método de HIRE

HEC-18 (1993), Incluye otra ecuación desarrollada a partir de datos del cuerpo de ingenieros militares de los Estados Unidos para la socavación en la punta de espolones construidos en el río Mississippi. La ecuación HIRE es por lo tanto aplicable cuando la obra penetra el cauce principal.

$$d_s = 4 * h * \left(\frac{K_f}{0.55} \right) * K_\theta * F_r^{0.33} \quad \dots 4.43$$

d_s : Profundidad de socavación.

h : Profundidad media del flujo al pie del muro en la sobrebanca o en el cauce principal, considerando la sección transversal inmediatamente aguas arriba de la obra.

F_r : Numero de Froude basado en la velocidad y profundidad al pie y justo aguas arriba de la obra.

K_f : Coeficiente de corrección por la forma del muro.

K_θ : Coeficiente de corrección por el ángulo de ataque del flujo.

5.0 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO

Para determinar las características hidráulicas del río, se debe definir y uniformizar el cauce en la zona de captación, siendo importante los siguientes parámetros:

5.1) TALUD DE LAS MÁRGENES DEL RÍO

Este talud es función del material que conforman las márgenes del río. En la tabla N° 5.01 se presenta taludes recomendados según el material del terreno.

Tabla N° 5.01: Taludes recomendados para las márgenes de un río según el material del terreno

| <i>CORTES</i> | <i>TALUD H:V</i> |
|-----------------------------------|----------------------|
| <i>Conglomerado suelos</i> | <i>1:1</i> |
| <i>Arcillosos suelos arenosos</i> | <i>1-5:1</i> |
| <i>Limosos suelos arenosos</i> | <i>1-3:1</i> |
| <i>Suelos arenosos sueltos</i> | <i>0-5:1</i> |
| <i>Roca alterada suelta</i> | <i>0-25:1</i> |
| <i>Roca sana</i> | |
| <i>RRELLENO</i> | <i>TALUD H:V</i> |
| <i>Tierra vegetal</i> | <i>1-5:1</i> |
| <i>Suelos arenosos</i> | <i>3:1</i> |

Sin embargo los diseños de acuerdo a la zona suele considerarse muros verticales ($Z=0$), muros inclinados ($Z>0$) para efectuar el encauzamiento en la zona de captación.

5.2) COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DEL RÍO

Este valor es característico de cada cauce, dependiendo de la mayor o menor resistencia que oponga el escurrimiento del fluido.

- ✓ A continuación se presenta un cuadro tabular de valores de "n" para diferentes tipos de cauces naturales.

Tabla N° 5.02: Valores de “n” dados por Horton para ser usados en las fórmulas de Ganguillet – Kutter y de Manning.

| SUPERFICIE | CONDICIONES DE LAS PAREDES | | | |
|---|----------------------------|--------|----------|-------|
| | Perfectas | Buenas | Medianas | Malas |
| 1) Limpios, bordos rectos, llenos, sin hendeduras ni charcos profundos. | 0.025 | 0.028 | 0.030 | 0.033 |
| 2) Igual al 1) pero con algo de hierba y piedra. | 0.030 | 0.033 | 0.035 | 0.040 |
| 3) Sinuoso, algunos charcos y escollos, limpios. | 0.033 | 0.035 | 0.040 | 0.045 |
| 4) Igual al 3), de poco tirante, con pendiente y seccion menos eficiente. | 0.040 | 0.045 | 0.050 | 0.055 |
| 5) Igual al 3), algo de hierba y piedras. | 0.035 | 0.040 | 0.045 | 0.050 |
| 6) Igual al 4), secciones pedregosas. | 0.045 | 0.050 | 0.055 | 0.060 |
| 7) Rios con tramos lentos, cauce enhierbado o con charcos profundos. | 0.050 | 0.060 | 0.070 | 0.080 |
| 8) Playas muy enhierbadas. | 0.075 | 0.100 | 0.125 | 0.150 |

- ✓ Cowan desarrollo un procedimiento para estimar el valor de “n”. Por este procedimiento, el valor de “n” se puede calcular por:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad \dots 5.01$$

Donde n_0 es un valor básico de “n” para cauces rectos, uniformes y liso en los materiales naturales comprendidos, n_1 es un valor agregado a n_0 para corregir el efecto de irregularidades de la sección recta, n_2 es un valor para las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del cauce, n_3 es un valor de corrección debido al grado de obstrucciones, n_4 es un valor de corrección por presencia de vegetación y condiciones de flujo, y m_5 factor multiplicador por sinuosidad, estos valores se pueden seleccionar de la tabla N° 5.03 de acuerdo a las condiciones dadas.

- ✓ Determinación del valor de “n” mediante métodos empíricos:
 - *Método de Strickler (1923)*: Se han desarrollado varios métodos empíricos para estimar “n”, el más conocido de estos métodos es uno propuesto por Strickler en 1923, para ríos con lecho de grava:

$$n = 0.0152 * (D_{50})^{1/6} \quad \dots 5.02$$

D_{50} : Diámetro del material del fondo del cauce en mm, correspondiente al 50% de la curva granulométrica del material que pasa, expresado en peso.

- *Método de Strickler (1948)*: Para mezclas de materiales de fondo con una significativa proporción de tamaños granulométricos. D_{90} tiene en cuenta el acorazamiento.

$$n = 0.038 * (D_{90})^{1/6} \quad \dots 5.03$$

D_{90} : Diámetro del material del fondo del cauce en m, correspondiente al 90% de la curva granulométrica del material que pasa, expresado en peso.

- *Método de Posada (1998)*: Fue desarrollado para ríos de montaña con lecho de grava.

$$n = 0.0487 * (D_{50})^{1/6} \quad \dots 5.04$$

D_{50} : Diámetro del material del fondo del cauce en m, correspondiente al 50% de la curva granulométrica del material que pasa, expresado en peso.

- *Método de Limerinos (1970)*: Ríos con materiales de lecho variado en tamaño desde gravas pequeñas a bolos medianos.

$$n = \frac{0.113 * R^{1/6}}{1.16 + 2.08 * \text{Log} \left(\frac{R}{D_{84}} \right)} \quad \dots 5.05$$

D_{84} : Diámetro del material del fondo del cauce en m, correspondiente al 84% de la curva granulométrica del material que pasa, expresado en peso.

R: Radio hidráulico en m.

- *Método de Jarrett R. D. (1984)*: Ríos con materiales de lecho variado en tamaño desde gravas pequeñas a bolos medianos.

$$n = 0.3224 * S_f^{0.38} * R^{-0.16} \quad \dots 5.06$$

S_f : Pendiente del fondo del cauce en m/m.

R: Radio hidráulico en m.

- *Método de Lane y Carlson (1953)*: En experimentos de campo, involucrando canales empedrados con guijarros, determinaron que:

$$n = 0.026 * (D_{75})^{1/6} \quad \dots 5.07$$

D_{75} : Diámetro del material del fondo del cauce en m, tal correspondiente al 75% de la curva granulométrica del material que pasa, expresado en peso.

Tabla N° 5.03: Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad según la ecuación de Cowan.

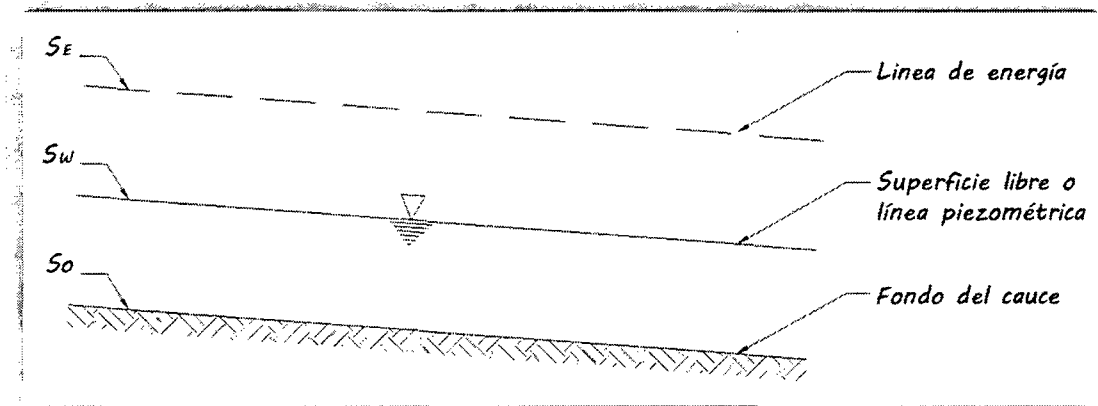
| Efecto | Factor | Condición | Valor | Comentario |
|---|--------|--------------------------|-------------|--|
| Material considerado | n_0 | Tierra | 0.030 | |
| | | Roca cortada | 0.025 | |
| | | Grava fina | 0.024 | |
| | | Grava gruesa | 0.028 | |
| Irregularidad en la sección recta | n_1 | Suave | 0.000 | Canal muy liso |
| | | Pequeña | 0.001-0.005 | Bancas algo erodadas |
| | | Moderada | 0.006-0.010 | Lecho y bancas rugosas |
| | | Fuerte | 0.011-0.020 | Bancas muy irregulares |
| Variaciones de la sección transversal del cauce | n_2 | Gradual | 0.000 | Cambios graduales |
| | | Alternado ocasionalmente | 0.001-0.005 | Cambios ocasionales de secciones pequeñas a grandes |
| | | Alternado frecuentemente | 0.010-0.015 | Cambios frecuentes en la forma de la sección recta |
| Efecto relativo de obstrucciones | n_3 | Despreciables | 0.000-0.004 | Obstrucción menor que el 5% de la sección recta |
| | | Pocas | 0.005-0.015 | Obstrucción entre el 5% y el 15% de la sección recta |
| | | Algunas | 0.020-0.030 | Obstrucción entre el 15% y el 50% de la sección |
| | | Muchas | 0.040-0.060 | Obstrucción mayor que el 50% |
| Vegetación | n_4 | Poca | 0.002-0.010 | Profundidad del flujo mayor que 2 veces la altura de la vegetación |
| | | Mucha | 0.010-0.025 | Profundidad del flujo mayor que la altura de vegetación |
| | | Bastante | 0.025-0.050 | Profundidad del flujo menor que la altura de vegetación |
| | | Excesiva | 0.050-0.100 | Profundidad del flujo menor que 0.5 la altura de la vegetación |
| Cantidad de meandros | m_5 | Pequeña | 1.000 | Sinuosidad < 1.2 |
| | | Media | 1.150 | 1.2 < sinuosidad < 1.5 |
| | | Fuerte | 1.300 | Sinuosidad > 1.5 |

5.3) CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO NATURAL

Usualmente se considera que el flujo en canales y cauces naturales es uniforme, sin embargo la condición de uniformidad es poco frecuente y debe entenderse que únicamente, porque los cálculos para flujo uniforme son relativamente sencillos y porque estos aportan soluciones satisfactorias, se justifica esta simplificación.

El flujo es uniforme, si los parámetros hidráulicos (tirante, velocidad, área, etc.) no cambian con respecto al espacio, es decir, que las características: profundidad, área transversal, velocidad y caudal en cada sección del canal son constantes, por lo cual la pendiente de la línea de energía, la pendiente de la superficie libre de agua y la pendiente del fondo del río son numéricamente iguales y por lo tanto son paralelas.

Figura N° 5.01: Pendientes: línea de energía, línea piezométrica, y fondo del cauce.



Llamando:

S_E : Pendiente de la línea de energía.

S_W : Pendiente de la superficie libre del agua.

S_0 : Pendiente del fondo del canal.

Se tiene:

$$S_E = S_W = S_0 = S \quad \dots 5.08$$

a) Formula de Manning: En 1889 el ingeniero Irlandés Robert Manning presenta una ecuación para determinar el valor de "C" (coeficiente de Chezy), en función del radio hidráulico y la rugosidad del cauce.

$$C = \frac{1}{n} * R^{1/6} \quad \dots 5.09$$

Luego, sustituyendo en la fórmula de Chezy, se tiene:

$$V = \frac{1}{n} * R^{1/6} * \sqrt{R * S} \quad \dots 5.10$$

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \quad \dots 5.11$$

Donde:

V: Velocidad, en m/s.

R: Radio hidráulico, en m.

S: Pendiente de la línea de energía, en m/m.

n: Coeficiente de rugosidad.

✓ Si Z=0

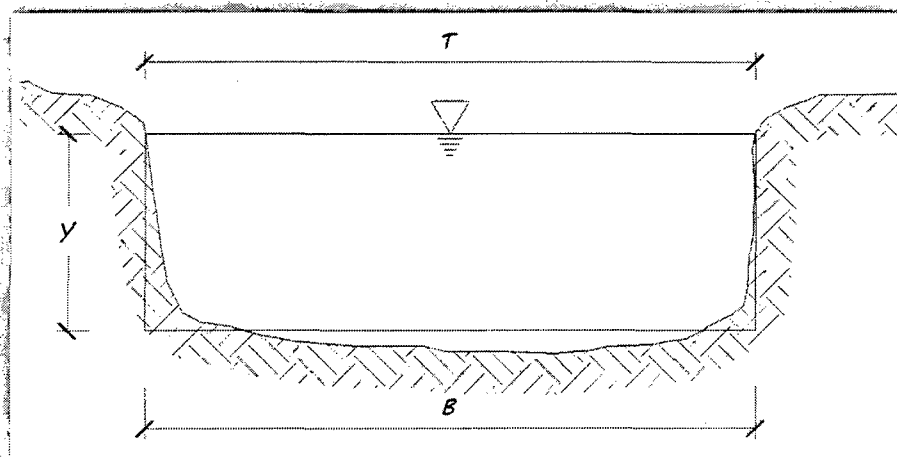
$$\text{Área hidráulica: } A = B * Y \quad \dots 5.12$$

$$\text{Perímetro: } P = 2Y + B \quad \dots 5.13$$

$$\text{Radio hidráulico: } R = \frac{B * Y}{2Y + B} \quad \dots 5.14$$

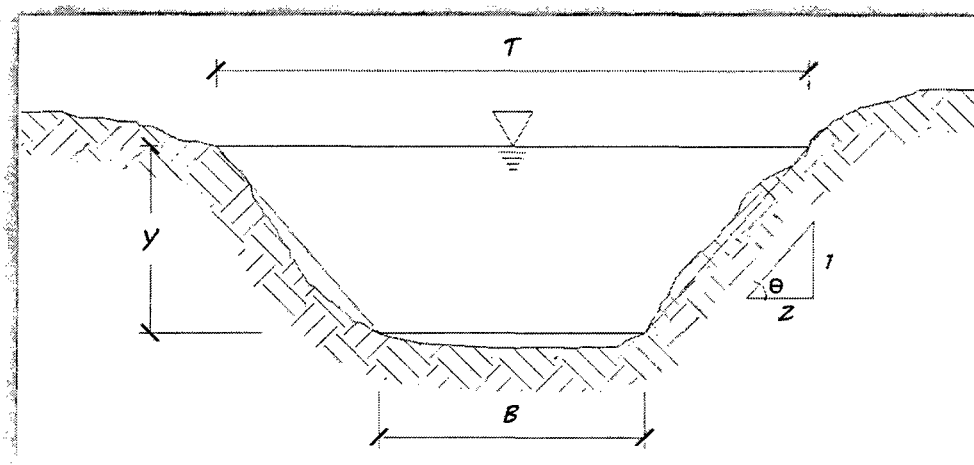
$$\text{Tirante normal: } Y = \frac{1}{B} * \left[\frac{Q * n * (2Y + B)^{2/3}}{S^{1/2}} \right]^{3/5} \quad \dots 5.15$$

Figura N° 5.02: Sección rectangular del cauce natural



✓ Si Z>0

Figura N° 5.03: Sección trapezoidal del cauce natural



$$\text{Área hidráulica: } A = Y * (B + YZ) \quad \dots 5.16$$

$$\text{Perímetro: } P = B + 2Y * \sqrt{1 + Z^2} \quad \dots 5.17$$

$$\text{Radio hidráulico: } R = \frac{Y*(B+YZ)}{B+2Y*\sqrt{1+Z^2}} \quad \dots 5.18$$

$$\text{Tirante normal: } Y = \frac{1}{B+YZ} * \left[\frac{Q*n*(B+2Y*\sqrt{1+Z^2})^{2/3}}{S^{1/2}} \right]^{3/5} \quad \dots 5.19$$

Las ecuaciones 5.15, 5.19 complejas en su estructura matemática, por lo cual es imposible resolver aplicando métodos aritméticos, por esta razón se aplicará métodos numéricos para su desarrollo, se aplicará el método de iteración de un punto.

b) Método de iteración de un punto: Este método es matemáticamente muy sencillo pero para resolver la ecuación del tirante del río requiere alrededor de 10 iteraciones para converger. Para que este método pueda aplicarse, la función no explícita debe ser de la siguiente forma:

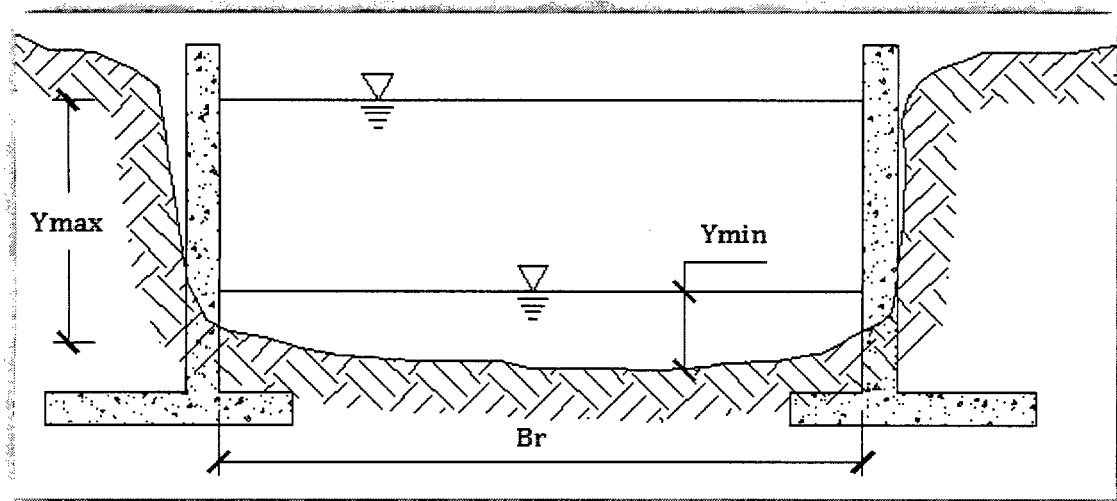
$$Y = f(Y) \quad \dots 5.20$$

El algoritmo se desarrolla de tal manera que el valor arrojado por la función $f(Y)$ en la iteración i se utilice como argumento Y en la iteración $i + 1$. Si la aproximación inicial es suficientemente cercana a la raíz α , entonces el método será convergente si α es una raíz simple. Para el método de iteración de un punto, esto es cierto aun si la raíz no es simple, pero la convergencia es más lenta en ese caso.

5.4) CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO ENCAUZADO

Las características hidráulicas del río encauzado, tiene diferente comportamiento a la de un cauce natural, por esta razón es necesario definirla. En principio debe considerar que los muros de encauzamiento son verticales, por donde circulará todo el caudal del río, y que el ancho de encauzamiento es menor que el ancho natural.

Figura N° 5.04: Sección de río encauzado



El río está limitado por los muros de encauzamiento que tiene un coeficiente de rugosidad de Manning diferente a la del fondo del río (Ver figura N° 5.04), en consecuencia se tiene una sección compuesta, entonces el valor de "n" que debe ser usado en la formula está dado por la expresión:

$$n_c = \frac{2Y * n_m + B_r * n_r}{2Y + B_r} \quad \dots 5.21$$

Donde:

n_c : Coeficiente de rugosidad de Manning de la sección compuesta.

n_m : Coeficiente de rugosidad de Manning del muro de encauzamiento.

n_r : Coeficiente de rugosidad de Manning del río.

B_r : Ancho de encauzamiento, en metros.

Y : Tirante alcanzado por el agua, en metros.

Teniendo en consideración estas aclaraciones se determina las características hidráulicas del río (Tirante, Área, Perímetro, Radio Hidráulico, etc), haciendo uso de la fórmula de Manning, y de las relaciones geométricas planteadas en el ítem anterior.

6.0 CANAL DE DERIVACIÓN

6.1) DEFINICIÓN

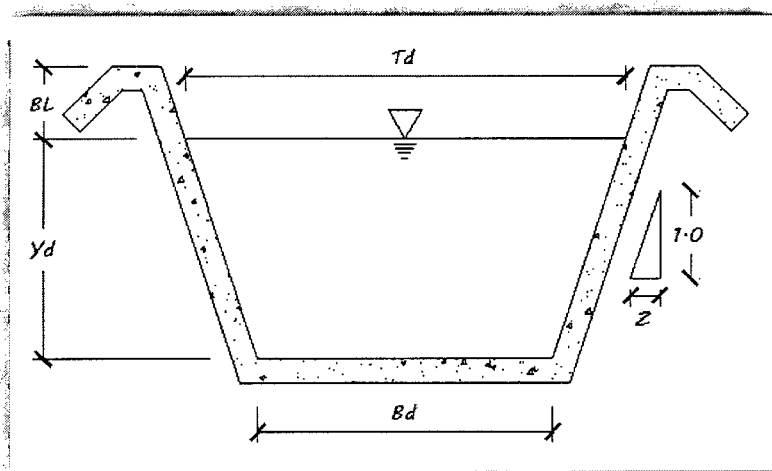
Los canales son conductos abiertos o cerrados en los cuales el agua circula debido a la acción de la gravedad y sin ninguna presión, pues la superficie libre del líquido está en contacto con la atmósfera, esto quiere decir que el agua fluye impulsada por la presión atmosférica y de su propio peso.

Se denominan canales artificiales a todos aquellos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo de la mano del hombre. El término sección de canal se refiere a la sección transversal tomada en forma perpendicular a la dirección del flujo. Las secciones transversales más comunes para conducciones son de tipo trapezoidal, y rectangular.

6.2) ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LOS CANALES

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 del flujo. Estos elementos son muy importantes y se utilizan con amplitud en el cálculo del flujo. Para secciones de canal regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección. La forma más conocida de la sección transversal de un canal es la trapezoidal, como se muestra en la figura N° 6.01.

Figura N° 6.01: Sección trapezoidal del canal de derivación.



Y_d : Tirante de agua o profundidad de flujo, es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre, es decir la profundidad máxima del agua en el canal, en metros.

T_d : Espejo de agua o ancho superficial, es el ancho de la superficie libre del agua, en metros.

Z : Talud, es la relación de la proyección horizontal a la vertical de la pared lateral (se llama también talud de las paredes laterales del canal). Es decir "Z" es el valor de la proyección horizontal cuando la vertical es 1, aplicando relaciones trigonométricas.

S_d : Pendiente, es la pendiente longitudinal de la rasante del canal, en m/m.

A_d : Área hidráulica, es la superficie ocupada por el agua en una sección transversal normal cualquiera, expresada en m².

P_d : Perímetro mojado, es la longitud de la línea de contorno del área mojada entre el agua y las paredes del canal, expresado en metros.

R_H : Radio hidráulico, es el cociente del área hidráulica y el perímetro mojado, en metros.

BL : Borde libre, es la distancia que hay desde la superficie libre del agua hasta la corona del borde, se expresa en metros.

6.2.1) Relaciones geométricas en canales trapezoidales

Teniendo en cuenta la figura N° 6.01, podemos determinar las relaciones geométricas de un canal trapezoidal.

- ✓ Espejo de agua:

$$T_d = 2 * Y_d * Z + B_d \quad \dots 6.01$$

- ✓ Perímetro hidráulico:

$$P_d = 2 * Y_d * \sqrt{1 + Z^2} + B_d \quad \dots 6.02$$

- ✓ Área hidráulica:

$$A_d = Y_d * (B_d + Y_d * Z) \quad \dots 6.03$$

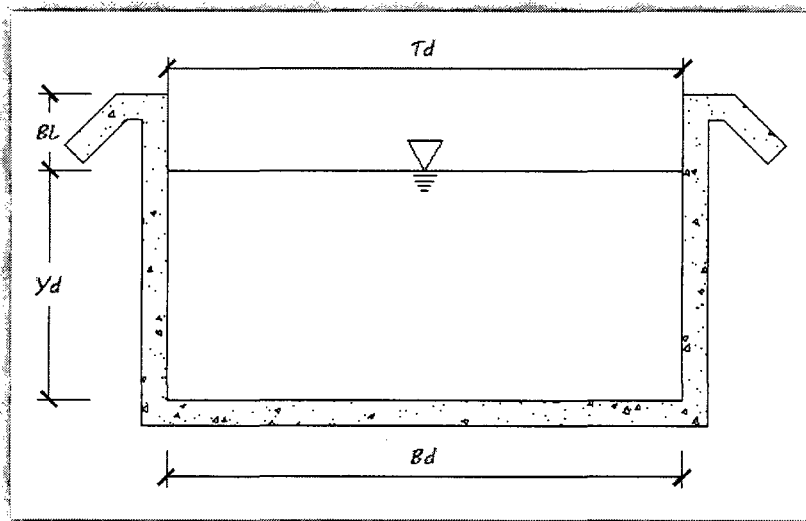
- ✓ Radio hidráulico:

$$R_H = \frac{Y_d * (B_d + Y_d * Z)}{2 * Y_d * \sqrt{1 + Z^2} + B_d} \quad \dots 6.04$$

6.2.2) Relaciones geométricas en canales rectangulares

Teniendo en cuenta la figura N° 6.02, podemos determinar las relaciones geométricas de un canal trapezoidal.

Figura N° 6.02: Sección rectangular del canal de derivación.



- ✓ Espejo de agua:

$$T_d = B_d \quad \dots 6.05$$

- ✓ Perímetro hidráulico:

$$P_d = 2 * Y_d + B_d \quad \dots 6.06$$

- ✓ Área hidráulica:

$$A_d = Y_d * B_d \quad \dots 6.07$$

- ✓ Radio hidráulico:

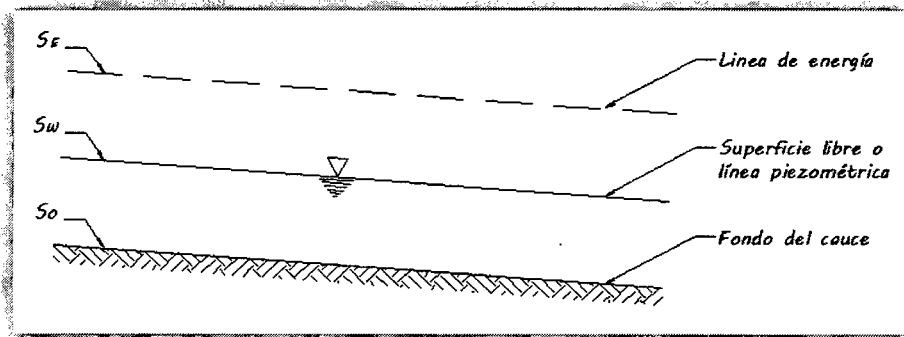
$$R_H = \frac{Y_d * B_d}{2 * Y_d + B_d} \quad \dots 6.08$$

6.3) FLUJO UNIFORME

El flujo es uniforme, si los parámetros hidráulicos (tirante, velocidad, área, etc.) no cambian con respecto al espacio, es decir, que las características: profundidad, área transversal, velocidad y caudal en cada sección del canal son constantes, por lo cual la pendiente de la línea de energía, la pendiente de

la superficie libre de agua y la pendiente del fondo del río son numéricamente iguales y por lo tanto son paralelas, ver figura N° 6.03.

Figura N° 6.03: Pendientes: línea de energía, línea piezométrica, y fondo del cauce.



Siendo:

S_E : Pendiente de la línea de energía

S_W : Pendiente de la superficie libre de agua

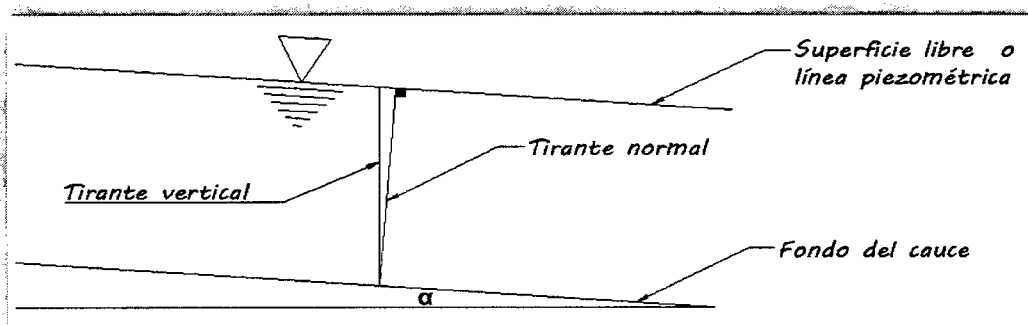
S_0 : Pendiente del fondo del canal

$$S_E = S_W = S_0 \quad \dots 6.09$$

Una de las condiciones para que se desarrolle un flujo uniforme en un canal, es que la pendiente sea pequeña, por lo que los tirantes normales se toman iguales a los verticales, ver figura N° 6.04.

Si α es pequeño, entonces $\cos \alpha \approx 1$, entonces *Tirante normal* \approx *Tirante vertical*. Tal como se muestra a continuación:

Figura N° 6.04: Tirante vertical y normal.



El flujo uniforme, para cualquier propósito práctico, también es permanente ya que el flujo no permanente y uniforme no existe en la naturaleza.

Las condiciones ligadas al flujo uniforme y permanente se llaman normales. De ahí los términos tirante normal, velocidad normal, pendiente normal, etc.

6.3.1) Velocidad en flujo uniforme

Las experiencias realizadas por Chezy le permitieron establecer la primera fórmula del flujo uniforme, para el cálculo de la velocidad media en un conducto, la cual se expresa como:

$$V = C * \sqrt{RS} \quad \dots 6.10$$

Donde:

V : Velocidad media en el canal, en m/s.

C : Coeficiente de Chezy que depende de las características del escurrimiento y de la naturaleza de las paredes.

R : Radio hidráulico, en metros.

S : Pendiente de la línea de energía, para el flujo uniforme, es también la pendiente de la superficie libre de agua y la pendiente del fondo del canal, en m/m.

6.4) ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES DE RESISTENCIA

El coeficiente de resistencia C de Chezy se obtiene experimentalmente en función del radio hidráulico, pendiente del canal y de la naturaleza de las paredes del canal.

Las fórmulas más usuales para determinar el coeficiente C de Chezy son:

6.4.1) Formula de Bazin

En 1897 el ingeniero hidráulico francés H. Bazin propuso una ecuación para calcular el valor de C de Chezy el cual se consideraba como una función de R pero no de la pendiente del canal (S). Para el sistema métrico la ecuación de Bazin es:

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} \quad \dots 6.11$$

Remplazando la ecuación 6.11 en la fórmula de Chezy, tenemos:

$$V = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} * \sqrt{RS} \quad \dots 6.12$$

Donde:

V: Velocidad media en el canal, en m/s.

R: Radio hidráulico, en metros.

S: Pendiente de la línea de energía, m/m.

m: Coeficiente que depende de las características de rugosidad de las paredes del canal. Sus valores se expresan en la tabla N° 6.01.

Tabla N° 6.01: Valores de m para emplearse en la fórmula de Bazin

| superficie | Naturaleza de las paredes | | | |
|--|---------------------------|--------|----------|-------|
| | Perfectas | Buenas | Medianas | Malas |
| <i>Tubos de albañal, vitrificados</i> | 0.06 | 0.22 | 0.33 | 0.50 |
| <i>Tubos de arcilla comun, para drenaje</i> | 0.11 | 0.17 | 0.28 | 0.50 |
| <i>Mamposteria con mortero de cemento</i> | 0.14 | 0.22 | 0.33 | 0.50 |
| <i>Superficie de cemento pulidas</i> | 0.00 | 0.06 | 0.14 | 0.22 |
| <i>Aplanados de cemento</i> | 0.06 | 0.11 | 0.22 | 0.33 |
| <i>Tuberia de concreto</i> | 0.14 | 0.22 | 0.33 | 0.41 |
| <i>Acueductos de duela o tablonces cepillados</i> | 0.00 | 0.14 | 0.22 | 0.28 |
| <i>Acueductos de tablonces sin cepillar</i> | 0.06 | 0.22 | 0.28 | 0.33 |
| <i>Acueductos de tablonces con astillas y palos</i> | 0.14 | 0.33 | 0.41 | 0.55 |
| <i>Canales revestidos con concreto</i> | 0.14 | 0.28 | 0.41 | 0.55 |
| <i>Mamposteria de piedras irregulares o sin labrar</i> | 0.50 | 0.69 | 1.05 | 1.38 |
| <i>Mamposteria seca, zampeados</i> | 1.90 | 1.38 | 1.60 | 1.74 |
| <i>Piedra labrada, silleria, paredes de ladrillo</i> | 0.22 | 0.28 | 0.36 | 0.50 |
| <i>Acueductos de lamina, lisos</i> | 0.06 | 0.14 | 0.22 | 0.33 |
| <i>Acueductos de lamina, corrugada</i> | 0.88 | 1.05 | 1.21 | 1.38 |
| <i>Canales de tierra en buenas condiciones</i> | 0.50 | 0.69 | 0.88 | 1.05 |

6.4.2) Formula de Ganguillet – Kutter

La fórmula, establecida en 1869 por los ingenieros Suisos E. Ganguillet y W.R. Kutter, se basó en numerosas mediciones, incluyendo el río Mississippi. Durante muchos años estuvo bastante extendido el uso de esta fórmula, su expresión es:

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S}\right) * \frac{n}{\sqrt{R}}} \quad \dots 6.13$$

Remplazando la ecuación 6.13 en la fórmula de Chezy, tenemos:

$$V = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{S}\right) * \frac{n}{\sqrt{R}}} * \sqrt{RS} \quad \dots 6.14$$

Donde:

V : Velocidad media en el canal, en m/s.

R : Radio hidráulico, en metros.

S : Pendiente de la línea de energía, m/m.

n : Coeficiente de rugosidad que depende de la naturaleza de las paredes del canal, en la tabla N° 6.02 se presentan los valores de n , propuestos por Horton.

6.4.3) Formula de Manning

En 1889 el ingeniero Irlandés Robert Manning presenta una ecuación para determinar el valor de "C" de la fórmula de Chezy, en función del radio hidráulico y de la rugosidad del material de que se construya el canal. Es la formula cuyo uso se halla más extendido en casi todas las partes del mundo.

$$C = \frac{1}{n} * R^{1/6} \quad \dots 6.15$$

Remplazando la ecuación 6.15 en la fórmula de Chezy, tenemos:

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2} \quad \dots 6.16$$

La ecuación 6.17 es la fórmula conocida de Manning, donde:

V : Velocidad media en el canal, en m/s.

R : Radio hidráulico, en metros.

S : Pendiente de la línea de energía, m/m.

n : Coeficiente de rugosidad, en la tabla N° 6.02, se presentan valores propuestos por Horton, se usan los mismos valores que se utilizan en la fórmula de Ganguillet – Kutter.

Tabla N° 6.02: Valores de n dados por Horton para ser usadas en las fórmulas de Ganguillet – Kutter y Manning

| SUPERFICIE | CONDICIONES DE LAS PAREDES | | | |
|--|----------------------------|--------|----------|-------|
| | Perfectas | Buenas | Medianas | Malas |
| <i>Tubería hierro forjado negro comercial</i> | 0.012 | 0.013 | 0.014 | 0.015 |
| <i>Tubería hierro forjado galvanizado comercial</i> | 0.013 | 0.014 | 0.015 | 0.017 |
| <i>Tubería de latón o vidrio</i> | 0.009 | 0.010 | 0.011 | 0.013 |
| <i>Tubería acero remachado en espiral</i> | 0.013 | 0.015 | 0.017 | |
| <i>Tubería de barro vitrificado</i> | 0.010 | 0.013 | 0.015 | 0.017 |
| <i>Tubos comunes de barro para drenaje</i> | 0.011 | 0.012 | 0.014 | 0.017 |
| <i>Tabique vidriado</i> | 0.011 | 0.012 | 0.013 | 0.015 |
| <i>Tabique con mortero de cemento</i> | 0.012 | 0.013 | 0.015 | 0.017 |
| <i>Superficies de cemento pulido</i> | 0.010 | 0.011 | 0.012 | 0.013 |
| <i>Superficies aplanadas con morteros de cemento</i> | 0.011 | 0.012 | 0.013 | 0.015 |
| <i>Tuberías de concreto</i> | 0.012 | 0.013 | 0.015 | 0.016 |
| <i>Tuberías de duela</i> | 0.010 | 0.011 | 0.012 | 0.013 |
| <i>Acueductos de tablon:</i> | | | | |
| <i>Labrado</i> | 0.010 | 0.012 | 0.013 | 0.014 |
| <i>Sin labrar</i> | 0.011 | 0.013 | 0.014 | 0.015 |
| <i>Con astillas</i> | 0.012 | 0.015 | 0.016 | |
| <i>Canales revestidos con concreto</i> | 0.012 | 0.014 | 0.016 | 0.018 |
| <i>Superficie de mampostería con cemento</i> | 0.017 | 0.020 | 0.025 | 0.030 |
| <i>Superficie de mampostería en seco</i> | 0.025 | 0.030 | 0.033 | 0.035 |
| <i>Acueductos semicirculares metálicos, lisos</i> | 0.011 | 0.012 | 0.013 | 0.015 |
| <i>Acueductos semicirculares metálicos, corrugados</i> | 0.023 | 0.025 | 0.028 | 0.030 |

6.5) SECCIÓN DE MÁXIMA EFICIENCIA HIDRÁULICA

Como normalmente los datos son $Q, n, Z, y S_d$ hay miles de combinaciones posibles de las incógnitas B_d e Y_d , que satisfacen la fórmula de Bazin, Ganguillet – Kutter, o de Manning. Por ejemplo, se da un valor para el ancho de la base, entonces se calcula el tirante que satisface la condición hidráulica, o bien al revés.

Se dice que un canal es de máxima eficiencia hidráulica cuando para la misma área, pendiente y calidad de paredes conduce un gasto máximo, o bien, es aquella que para el mismo gasto, pendiente y calidad de paredes tiene un área mínima.

Considerando un canal de sección constante por el que se debe pasar un caudal máximo, bajo las condiciones impuestas por la pendiente y la rugosidad, aplicamos continuidad para la fórmula de Chezy, entonces tendríamos lo siguiente:

$$Q = A * C * R^{1/2} * S^{1/2} \quad \dots 6.17$$

Donde A , C y S son constantes, luego la ecuación del caudal puede expresarse como:

$$Q = k * R^{1/2} \quad \dots 6.18$$

Siendo k una constante, en la ecuación 6.18 observamos que el radio hidráulico y el caudal son directamente proporcionales, razón por la cual el caudal será máximo, si el radio hidráulico es máximo. Observando la ecuación 6.04 definimos, para que el radio hidráulico sea máximo, el perímetro mojado debe ser mínimo, ya que esta relación es inversamente proporcional.

6.5.1) Definición de los parámetros del canal de MEH

Considerando una sección trapezoidal, el área y perímetro hidráulico se define de la siguiente forma:

$$P_d = 2 * Y_d * \sqrt{1 + Z^2} + B_d \quad \dots 6.02$$

$$A_d = Y_d * (B_d + Y_d * Z) \quad \dots 6.03$$

Despejando B_d en la ecuación 6.03:

$$B_d = \frac{A_d}{Y_d} - Y_d * Z \quad \dots 6.19$$

Remplazando la ecuación 6.19 en 6.02, tenemos:

$$P_d = \frac{A_d}{Y_d} - Y_d * Z + 2 * Y_d * \sqrt{1 + Z^2} \quad \dots 6.20$$

Derivando la ecuación 6.20 con respecto al tirante, e igualando a 0, tenemos:

$$\frac{dP_d}{dY_d} = -\frac{A_d}{Y_d^2} - Z + 2 * \sqrt{1 + Z^2} = 0 \quad \dots 6.21$$

Sustituyendo A_d de la ecuación 6.03 en la ecuación 6.21, entonces:

$$\frac{B_d}{Y_d} = 2(\sqrt{1 + Z^2} - Z) \quad \dots 6.22$$

Para un canal rectangular $Z = 0$, entonces $B_d = 2 * Y_d$, el ancho de la base es el doble del tirante, entonces se cumple la condición de sección de máxima eficiencia hidráulica.

6.6) CRITERIOS DE DISEÑO PARA CANALES

6.6.1) Velocidad máxima y mínima permisible

- ✓ La velocidad mínima permisible, es aquella que no produce sedimentación, su valor es muy incierto y no puede ser determinado con exactitud, en canales de concreto puede tomarse como referencia 0.6 m/s.
- ✓ La velocidad máxima permisible es aquella que no produce erosión, el U.S. Bureau of Reclamation, recomienda que para el caso de revestimiento de canales de hormigón no armado, las velocidades no deben exceder de 2.5 m/s.

6.6.2) Ancho de solera

Resulta muy útil fijar de antemano un valor para el ancho de solera, plantilla o base, con lo cual se pueden manejar con facilidad las fórmulas para calcular el tirante.

Una forma práctica de fijar el ancho de solera, se basa en el caudal, y se muestra en la tabla N° 6.03.

Para canales pequeños, el ancho solera estará en función del ancho de la pala de la maquinaria disponible para la construcción.

Tabla N° 6.03: Ancho de solera en función del caudal

| <i>Caudal Q (m³/s)</i> | <i>Ancho de solera Bd (m)</i> |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| <i>Menor de 0.10</i> | <i>0.30</i> |
| <i>Entre 0.10 y 0.20</i> | <i>0.50</i> |
| <i>Entre 0.020 y 0.40</i> | <i>0.75</i> |
| <i>Mayor de 0.40</i> | <i>1.00</i> |

6.6.3) Borde libre

No existe ninguna regla fija que se pueda aceptar universalmente para el cálculo del borde libre, debido a que la fluctuación de la superficie del agua en un canal, se puede originar por causas incontrolables.

El U.S. Bureau of Reclamation recomienda estimar el borde libre con la siguiente fórmula:

$$BL = \sqrt{C * Y_d} \quad \dots 6.23$$

Donde:

BL: Borde libre en pies.

C: 1.5 para caudales menores a 20 pies³/s y hasta 2.5 para caudales del orden de los 3000 pies³/s.

Y_d: Tirante del canal en pies.

La secretaria de recursos hidráulicos de México, citado por agricultura, recomienda los siguientes valores en función del caudal:

Tabla N° 6.04: Borde libre en función del caudal

| <i>Gasto m³/s</i> | <i>BL (cm)</i> |
|------------------------------|----------------|
| <i>≤ 0.05</i> | <i>7.5</i> |
| <i>0.05 - 0.25</i> | <i>10.0</i> |
| <i>0.25 - 0.50</i> | <i>20.0</i> |
| <i>0.50 - 1.00</i> | <i>25.0</i> |
| <i>> 1.00</i> | <i>30.0</i> |

Otra manera de definir el borde libre es en función de la solera del canal:

Tabla N° 6.05: Borde libre en función de la solera

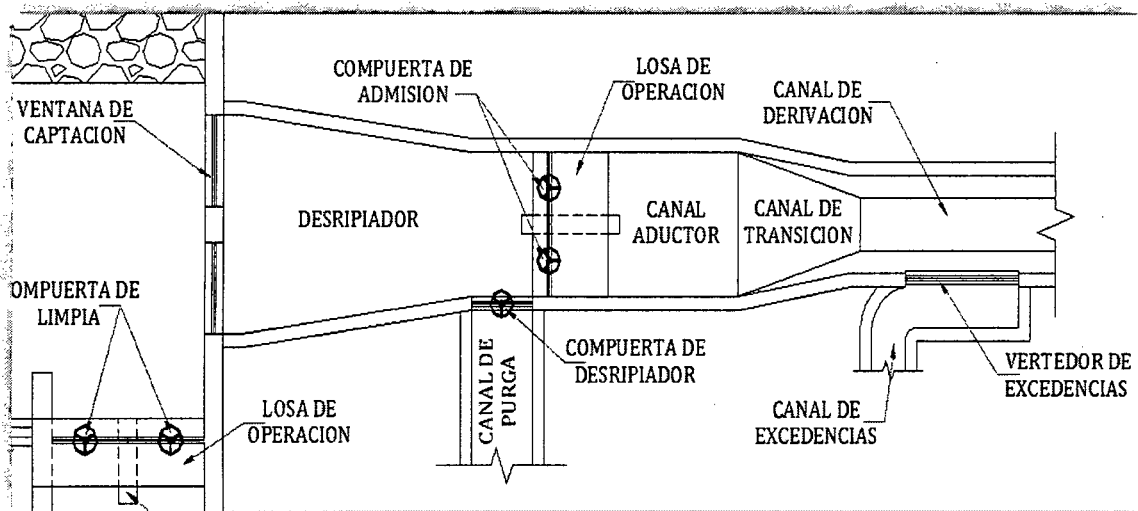
| <i>Ancho de la solera (m)</i> | <i>BL (m)</i> |
|-------------------------------|---------------|
| <i>Hasta 0.8</i> | <i>40.0</i> |
| <i>0.8 - 1.5</i> | <i>50.0</i> |
| <i>1.5 - 3.0</i> | <i>60.0</i> |
| <i>3.0 - 20.0</i> | <i>100.0</i> |

7.0 PERFIL DEL FLUJO VENTANA DE CAPTACIÓN – CANAL DE DERIVACIÓN

7.1) DEFINICIÓN

En este capítulo definiremos el perfil del flujo que existe entre la ventana de captación y el canal de derivación, para esto haremos uso de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica, continuidad, conservación de energía y la ecuación de cantidad de movimiento o momentum.

Figura N° 7.01: Vista en planta ventana – canal de derivación.



7.2) VENTANAS DE CAPTACIÓN

La captación de agua se realiza mediante una abertura llamada ventana de captación. Esta trabaja como vertedero en mínimas y como orificio ahogado en máximas. Sus dimensiones son calculadas en función del caudal a derivar, de la altura desde el fondo del cauce al umbral de la ventana, y del criterio propio de cada diseñador.

El bocal de toma se ubica por lo general aguas arriba del barraje vertedero, procurando que el ingreso de sedimentos sea mínimo.

La mayor parte de las tomas forman un ángulo recto con el barraje, pero el bocal con el río puede quedar con un ángulo hasta de 30°. La velocidad de entrada del agua por la ventana de captación debe quedar comprendida entre 0.80 y 1.20m/s.

7.2.1) Rejillas en ventana de captación

Su objetivo básico es impedir el paso de los materiales de arrastre y suspensión hacia el canal de derivación, las cuales causan obstrucción y desborde aguas debajo de la captación.

Las rejillas son platinas unidas mediante soldadura formando paneles. La separación entre rejillas viene dada por la distancia entre los ejes de dos rejillas consecutivas. La separación depende del tipo de material que debe evitarse el ingreso y varía entre 0.025m y 0.10m (material fino), y de 0.10m a 0.20 (material grueso).

Su principal desventaja es que causa pérdida de carga, las cuales deben ser consideradas durante el dimensionamiento de la ventana de captación. Muchas ecuaciones deducidas experimentalmente dan la pérdida por entrada a la rejilla en función de la velocidad, para su evaluación emplearemos la fórmula básica de Houk.

$$h_r = \left(\frac{\phi * V}{e} \right)^2 * \text{sen}(\omega) * (\text{sec}(\alpha))^{15/8} \quad \dots 7.01$$

Donde:

h_r : Pérdida de carga, en pulgadas.

ϕ : Diámetro de las rejillas, en pulgadas.

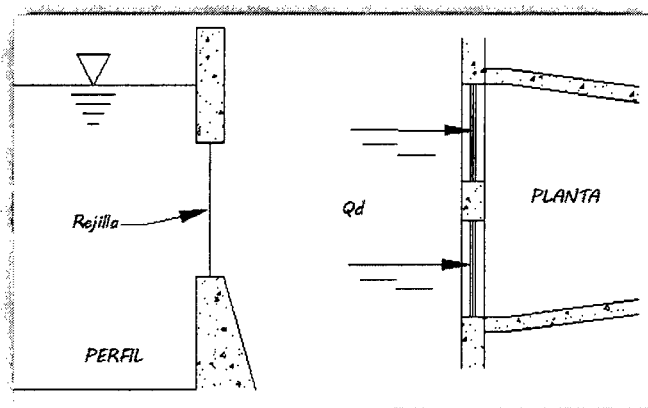
V : Velocidad del flujo a través de las rejillas, en pies/seg.

e : Espaciamiento entre rejillas, en pulgadas.

ω : Angulo de inclinación de las rejillas, 90°.

α : Angulo de ingreso, aproximadamente 0°.

Figura N° 7.02: Rejillas en ventana de captación.



7.2.2) Altura de las ventanas de captación

La altura de la ventana de captación se determina con la fórmula de vertederos.

$$Q_d = C * (L'_b - 0.1 * N * h_b) * h_b^{3/2} \quad \dots 7.02$$

Donde:

Q_d : Caudal de derivación, en m³/s.

C : Coeficiente de descarga del vertedero, tabla N° 7.01.

L'_b : Ancho neta de la ventana, en m.

h_b : Altura de la ventana, en m.

N : Numero de contracciones, igual a 2.

Generalizando la ecuación 7.01 para varias ventanas y despejando, puede obtenerse la altura de la ventana de captación, como se muestra a continuación:

$$h_b = \left(\frac{Q_d}{C * N_b * (L'_b - 0.2 * h_b)} \right)^{2/3} + h_r \quad \dots 7.03$$

Donde:

N_b : Numero de ventanas de captación.

h_r : Perdida de carga en rejillas.

h_b : Altura de la ventana de captación

Tabla N° 7.01: Valores de coeficiente de descarga en función de la forma del vertedor.


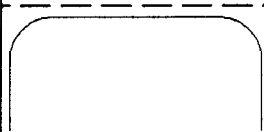

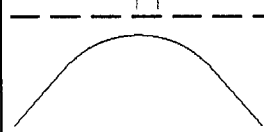
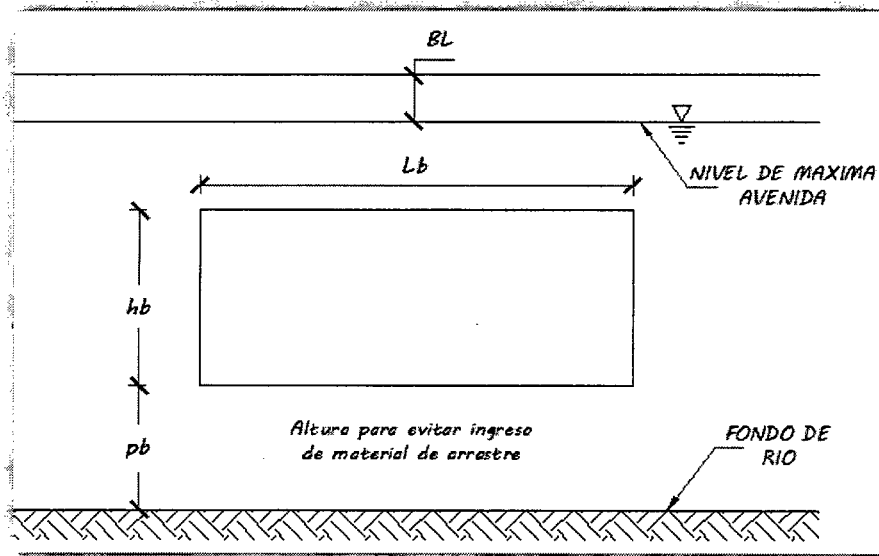
| FORMA | DESCRIPCION | C |
|---|---|-------------|
|  | Ancho de cantos rectangulares | 1.45 - 1.50 |
|  | Ancho de cantos redondeados | 1.48 - 1.92 |
|  | Afilado con aereación necesaria | 1.89 |
|  | En forma de techo con corona redondeada | 2.33 |

Figura N° 7.03: Ventana de captación.



7.2.3) Ancho de las ventanas de captación

Las rejillas consideradas reduce el área de la ventana de captación, por esta razón el ancho de la ventana debe ser corregida.

a) Calculo del número de rejillas

$$N_r = \frac{L'_b}{e} - 1 \quad \dots 7.04$$

Donde:

N_r : Numero de rejillas.

L'_b : Ancho de la ventana.

e : Espaciamiento entre rejillas, en m.

b) Ancho corregido de las ventanas

$$L_b = L'_b + N_r * \emptyset \quad \dots 7.05$$

Donde:

N_r : Numero de rejillas.

L'_b : Ancho de la ventana.

\emptyset : Diámetro de las rejillas, en m.

L_b : Ancho de la ventana de captación corregida, en m.

7.3) BARRAJE VERTEDOR O AZUD

7.3.1) Altura del barraje

La altura del barrage vertedor está orientado a elevar o mantener un nivel de agua en el río, de modo tal que, se pueda derivar un caudal hacia el canal. También debe permitir el paso de agua excedente por encima de la cresta.

$$P = p_b + h_b + h_p \quad \dots 7.06$$

Donde:

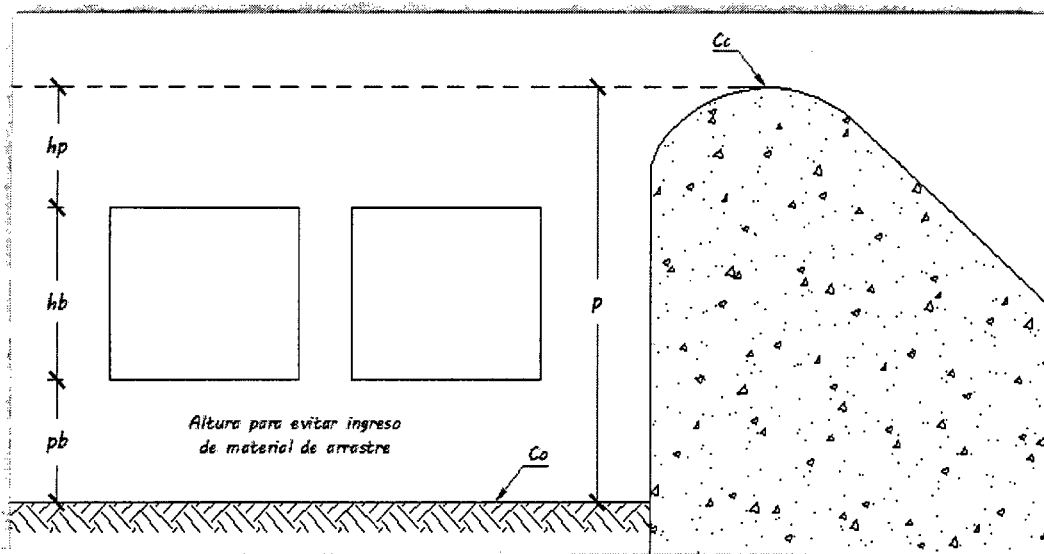
P : Altura del barrage, en m.

p_b : Alfeizer de la ventana, se recomienda ≥ 0.50 m.

h_b : Altura de la ventana de captación, en m.

h_p : Valor de carga de seguridad, se recomienda ≥ 0.20 m.

Figura N° 7.04: Definición de la altura del barrage.



De acuerdo a la figura N° 7.04 se puede definir la cota de la cresta del barrage de la siguiente manera:

$$C_C = C_0 + p_b + h_b + h_p \quad \dots 7.07$$

Donde:

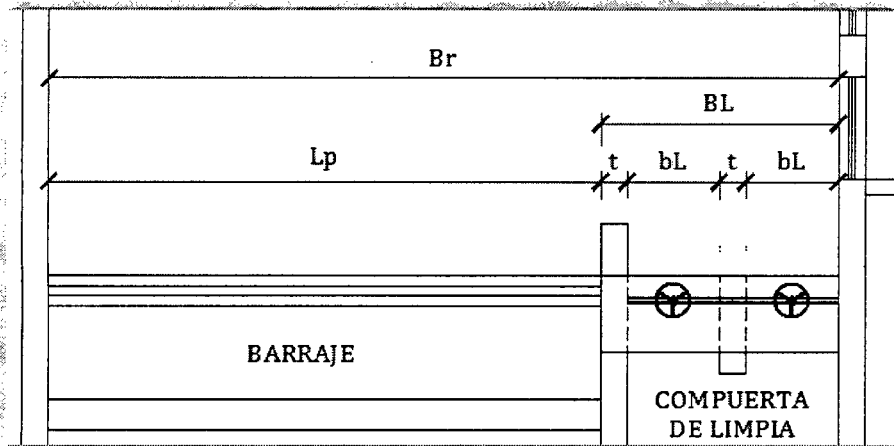
C_C : Cota de la cresta del barrage, en m.

C_0 : Cota del fondo del río delante del barrage, en m.

7.3.2) Longitud del barrage

Para la definición de la longitud del barrage debe tenerse en cuenta el ancho de encauzamiento, y la distribución de las compuertas en la zona de limpia.

Figura N° 7.05: Distribución de longitudes en el ancho de encauzamiento.



$$L_p = B_r - N_L * (b_L + t) \quad \dots 7.08$$

Donde:

L_p : Longitud del barraje, en m.

B_r : Ancho de encauzamiento, en m.

N_L : Numero de compuertas de limpia.

b_L : Ancho de las compuertas de limpia, en m.

t : Ancho de los pilares de separación de las compuerta, en m.

Antes de definir la longitud del barraje, debe definir el ancho del canal de limpia. Esta debe tener una velocidad mayor a la requerida para iniciar el arrastre.

$$V_L > V'_L \quad \dots 7.09$$

7.3.3) Carga de agua sobre el barraje

La fórmula general del vertedero es:

$$H_0 = \left(\frac{Q}{C_p * L_p} \right)^{2/3} \quad \dots 7.10$$

Dónde:

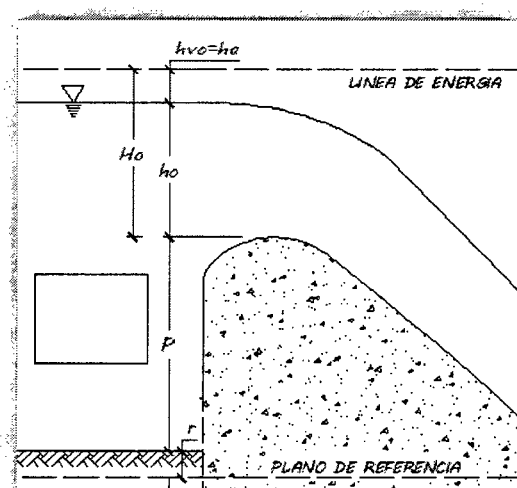
C_p : Coeficiente de descarga, en $m^{1/2}/s$

H_0 : Carga total de operación, incluye carga de velocidad, en m.

L_p : Longitud del barraje, en m.

Q : Descarga, en m^3/s .

Figura N° 7.06: Carga de agua sobre el barraje.



7.4) ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL FLUJO (VENTANA DE CAPTACIÓN – CANAL DE DERIVACIÓN)

Aplicando Bernoulli entre 1 y 2:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{f1-2} \quad \dots 7.11$$

$$h_{f1-2} = h_1 - h_2 = \Delta h \quad \dots 7.12$$

Aplicando continuidad en la sección 2, se obtiene lo siguiente:

$$Q_d = C_b * N_b * L'_b * h_b * \sqrt{2g * (h_1 - h_2)} \quad \dots 7.13$$

$$Q_d = C_b * N_b * L'_b * h_b * \sqrt{2g * \Delta h} \quad \dots 7.14$$

Donde:

C_b : Coeficiente de descarga en ventana de captación.

h_b : Altura de la ventana de captación, en m.

N_b : Numero de ventanas de captación, en m.

Aplicando Bernoulli en las secciones 1 y 3:

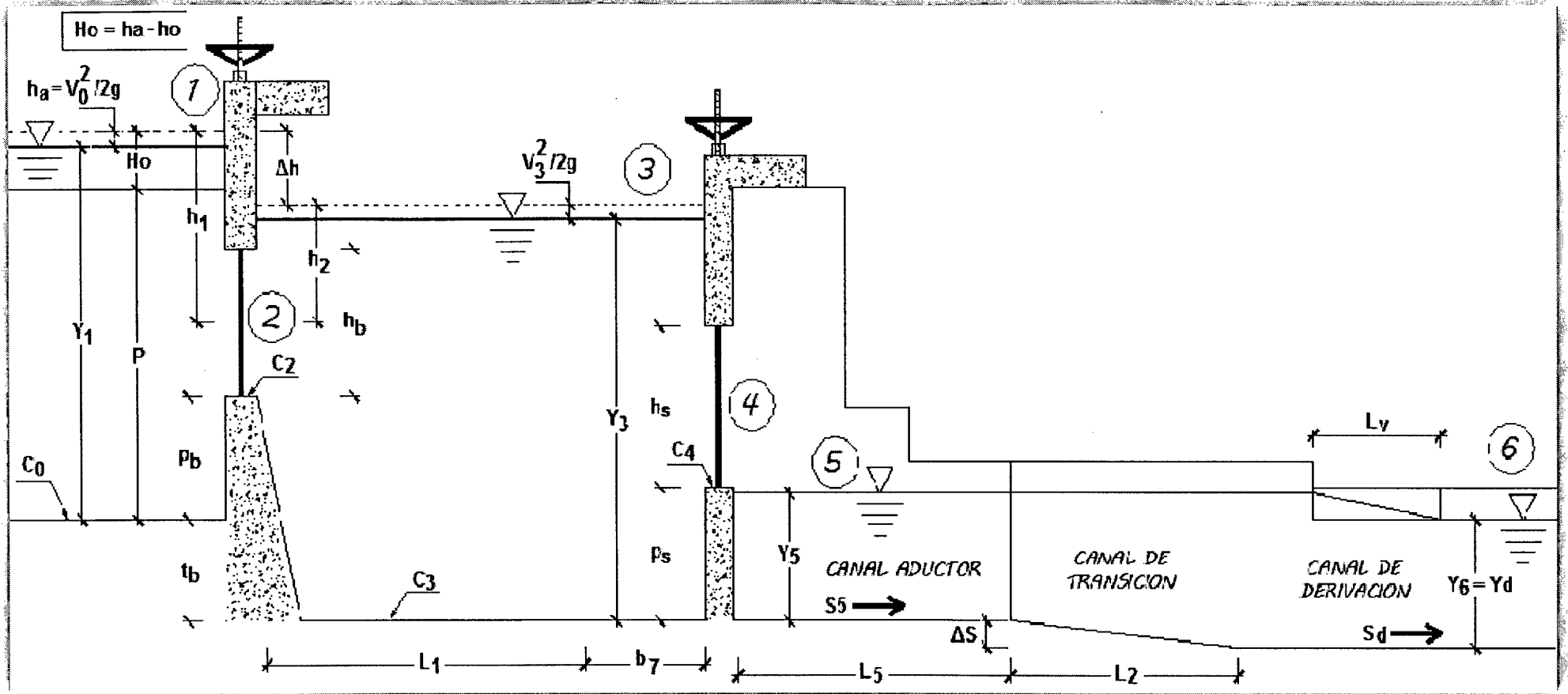
$$H_0 + P + t_b = Y_3 + \frac{V_3^2}{2g} + \Delta h \quad \dots 7.15$$

Dónde:

P : Altura del barraje, en metros.

t_b : Diferencia de cotas entre fondo del río delante de la ventana, y cota de la base del desripiador.

Figura N° 7.07: Vista de perfil sección ventana de captación – canal de derivación.



7.4.1) Dimensionamiento de la compuerta de admisión

Por continuidad tenemos lo siguiente:

$$Q_d = V_3 * A_3 \quad \dots 7.16$$

$$V_3 = \frac{Q_d}{Y_3 * b_3} \quad \dots 7.17$$

Donde:

V_3 : Velocidad del flujo en la sección 3, en m/s. Debe evitarse en lo posible que la velocidad sea mayor de 3.0m/s.

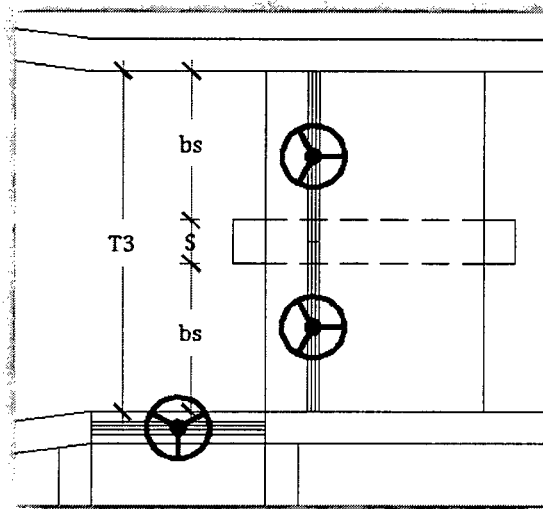
Q_d : Caudal de desviación, en m³/s.

Y_3 : Tirante del agua en la sección 3, en m.

Para definir el ancho de la sección 3, debe considerarse una velocidad no mayor de 2.5m/s.

$$b_3 = N_s * (b_s + S) - S \quad \dots 7.18$$

Figura N° 7.08: Longitudes en compuerta de admisión.



Aplicando Bernoulli entre 3 y 4:

$$Z_3 + \frac{P_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} = Z_4 + \frac{P_4}{\gamma} + \frac{V_4^2}{2g} \quad \dots 7.19$$

$$V_4 = \sqrt{2g * (y_3 - p_s - \frac{h_s}{2} + \frac{V_3^2}{2g})} \quad \dots 7.20$$

Aplicando continuidad en la sección 4, se obtiene lo siguiente:

$$Q_d = C_s * N_s * b_s * h_s * \sqrt{2g * (y_3 - p_s - \frac{h_s}{2} + \frac{V_3^2}{2g})} \quad \dots 7.21$$

Donde:

C_s : Coeficiente de descarga a través de la compuerta.

N_s : Numero de compuertas de admisión.

b_s : Ancho de la compuerta de admisión, en m.

h_s : Altura de la compuerta de admisión, en m.

p_s : Alfeizar de la compuerta de admisión, en m.

7.4.2) Dimensionamiento del canal de aducción

En la sección 5 se cumple las siguientes condiciones:

$$b_5 = b_3 \quad \dots 7.22$$

$$Y_5 = Y_6 \quad \dots 7.23$$

Donde:

b_5 : Ancho de solera en la sección 5, en m.

b_3 : Ancho de solera en la sección 3, en m.

Y_5 : Tirante en la sección 5, en m.

Y_6 : Tirante en la sección 6 (canal de derivación), en m.

Para que los tirantes en la sección 1 y 6 sean iguales debe cumplirse la fórmula de Manning en la sección 5.

$$S_5 = \left(\frac{Q_{md} * n}{R^{2/3} * A} \right)^2 \quad \dots 7.24$$

Donde:

S_5 : Pendiente del canal aductor, en m/m.

Q_{md} : Caudal máximo de derivación, en m³/s.

A : Área hidráulica del canal aductor, en m².

R : Radio hidráulico del canal aductor, m.

7.5) DIMENSIONAMIENTO DEL DESRIPIADOR

Después de la ventana de captación se acostumbra dejar una cámara que se llama desripiador y que sirve para detener las piedras que alcanzaron pasar entre los barrotes y que no deben entrar al canal. Con este objeto la velocidad en el desripiador debe ser relativamente baja.

Para poder eliminar las piedras que se depositan en el fondo del desripador, debe dejarse una compuerta que conecta con el canal de purga. El canal debe tener un gradiente suficiente para conseguir una velocidad de lavado alta y que sea capaz de arrastrar todas las piedras.

También se procura eliminar todos los ángulos rectos y unir las paredes con curvas que converjan hacia a la compuerta para que las piedras no se queden en las esquinas.

En el desripador se cumple las siguientes condiciones:

$$T_3 = b_3 \quad \dots 7.25$$

$$T_2 = N_b * (L_b + b) - b \quad \dots 7.26$$

Donde:

N_b : Numero de ventanas de captación.

L_b : Longitud de la ventana de captación, en m.

b : Ancho de pilar de separación en ventanas.

$T_3 = b_3$: Ancho de la sección 3.

La sección 2 (zona de las ventanas de captación) y la sección 3 (zona de admisión), son geoméricamente distintas, por lo que es necesaria la implementación de una transición. Se recomienda hacer uso del criterio de Hind, y la proporcionada por la irrigación Mexicana.

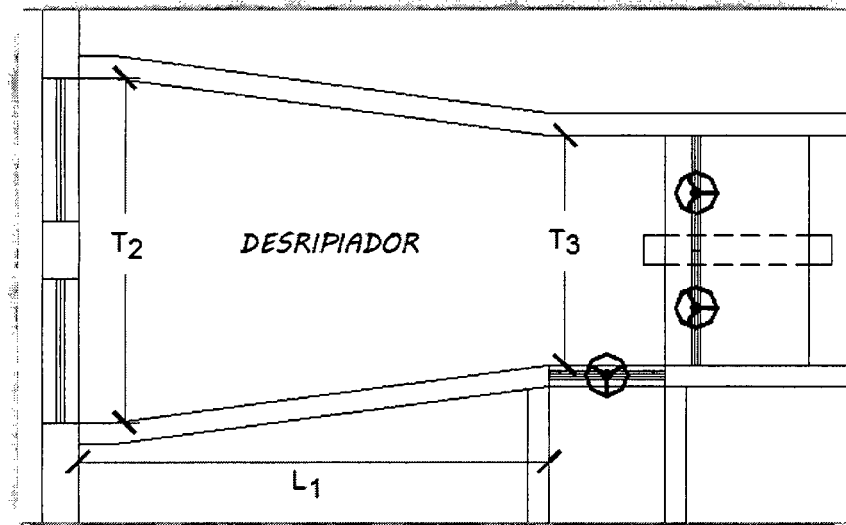
✓ Criterio de Hind:

$$L_1 = \frac{|T_2 - T_3|}{2 * tg(12^\circ 30')} \quad \dots 7.27$$

✓ Criterios de Irrigación México

$$L_1 = \frac{|T_2 - T_3|}{2 * tg(22^\circ 30')} \quad \dots 7.28$$

Figura N° 7.09: Dimensiones características del desripiador.



7.6) DIMENSIONAMIENTO DEL CANAL DE TRANSICIÓN

Si la sección 5 (zona de canal aductor) y la sección 6 (zona canal de derivación) son geoméricamente diferentes, es necesaria la utilización de transiciones, la longitud L_2 puede ser calculada con las ecuaciones 7.27 ó 7.28.

$$T_5 = b_3 \quad \dots 7.29$$

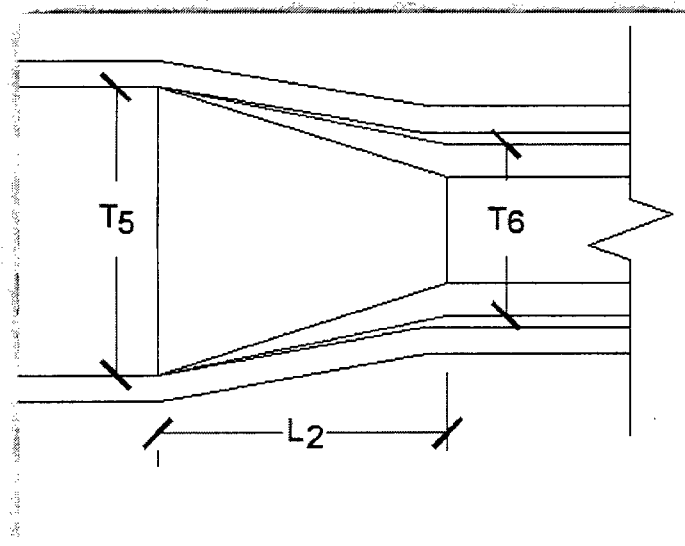
$$T_6 = E \quad \dots 7.30$$

Donde:

T_5 : Ancho de la sección 3.

$T_6 = E$: Espejo de agua en canal de derivación.

Figura N° 7.10: Dimensiones características de la transición.



7.6.1) Definición del desnivel en transición

El análisis hidráulico realizado para la obra de captación, recomienda que la compuerta de admisión debe siempre trabajar como un orificio, con descarga libre. Cuando se produce una descarga máxima en el río, también se produce un caudal máximo derivado, la cual genera un tirante máximo en el canal aductor, y hace que la compuerta de admisión trabaje como orificio sumergido. Para evitar esta situación se considera un desnivel ΔS en el canal de transición. Bajo este escenario, la compuerta de admisión trabajará siempre a descarga libre.

$$\Delta S = Y_{md} - Y_d \quad \dots 7.31$$

Donde:

Y_{md} : Tirante para un caudal máximo derivado, en canal de derivación.

Y_d : Tirante normal, en canal de derivación.

7.7) CAUDAL MÁXIMO DE DERIVACIÓN

Para la determinación del caudal máximo de derivación se tiene en consideración el caudal máximo instantáneo del río en la cual se establecerá la obra de captación.

Aplicando la fórmula de vertedero se determina la carga de agua sobre el barraje, de la siguiente manera:

$$H_{max} = \left(\frac{Q_{max} - Q_d}{C * L_p} \right)^{2/3} \quad \dots 7.32$$

Dónde:

C : Coeficiente de descarga, en $m^{1/2}/s$

H_{max} : Carga máxima sobre barraje, incluye carga de velocidad de llegada, en m.

L_p : Longitud del barraje, en m.

Q_{max} : Caudal máximo instantáneo, en m^3/s .

Q_d : Caudal de derivación, en m^3/s .

Teniendo en consideración la ecuación N° 7.14, se obtiene la siguiente relación:

$$\Delta h = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_{md}}{C_b * N_b * L'_b * h_b} \right)^2 \quad \dots 7.33$$

Donde:

Q_{md} : Caudal máximo de derivación, en m³/s.

Δh : Perdida de carga entre las secciones 1 y 3.

C_b : Coeficiente de descarga en ventana de captación.

h_b : Altura de la ventana de captación, en m.

N_b : Numero de ventanas de captación, en m.

L'_b : Ancho de ventana de captación, en m.

Despejando la ecuación N° 7.15, se obtiene lo siguiente:

$$Y_3 = H_{max} + P + t_b - \Delta h - \frac{V_3^2}{2g} \quad \dots 7.34$$

Donde:

P : Altura del barraje, en m.

t_b : Desnivel entre la cota 0 y la cota 2, en m.

Y_3 : Tirante en la sección 3, en m.

Remplazando la ecuación 7.33 en 7.34:

$$Y_3 = H_{max} + P + t_b - \frac{1}{2g} \left(\frac{Q_{md}}{C_b * N_b * L'_b * h_b} \right)^2 - \frac{V_3^2}{2g} \quad \dots 7.35$$

Remplazando la ecuación 7.35 en 7.21, se obtiene:

$$Q_{md} = \sqrt{\frac{2g \left(H_{max} + P + t_b - p_s - \frac{h_s}{2} \right)}{\frac{1}{(C_s * N_s * b_s * h_s)^2} + \frac{1}{(C_b * N_b * L'_b * h_b)^2}}} \quad \dots 7.36$$

Resolviendo la ecuación anterior, se obtiene el caudal máximo de derivación.

7.7.1) Diseño del vertedor de excedencias

a) Generalidades

El vertedor lateral ha sido estudiado experimentalmente por Schaffernak de 1915 a 1918, Engels de 1917 a 1918, Coleman y Smith en 1923 y

Eherenberger en 1934. En general, el interés fue determinar la relación entre el gasto que sale del canal, la longitud del vertedor, los tirantes al inicio y al final del mismo, y los coeficientes de descarga. Sin embargo, los resultados tuvieron poca aplicación, debido principalmente al desconocimiento de los intervalos y tipo de perfil a los que se aplicaban.

b) Definición

Estas estructuras consisten en escotaduras que se hacen en la pared o talud del canal para controlar el caudal, evitándose posibles desbordes que podrían causar serios daños, por lo tanto, su ubicación se recomienda en todos aquellos lugares donde exista este peligro. Los cuales de exceso a eliminarse, se originan algunas veces por fallas del operador o por afluencias, que durante las lluvias el canal recibe de las quebradas, estos excesos debe descargar con un mínimo de obras de arte, buscándose en lo posible cauces naturales para evitar obras adicionales, aunque esto último depende siempre de la conjugación de diferentes aspectos locales (topografía, ubicación del vertedero, etc.)

c) Criterios de diseño

- El caudal de diseño de un vertedero se puede establecer como aquel caudal que circula en el canal por encima de su tirante normal, hasta el nivel máximo de su caja hidráulica o hasta el nivel que ocupa en el canal, el caudal considerado como de máxima derivación.
- El vertedero lateral no permite eliminar todo el excedente de caudal, siempre quedará un excedente que corresponde teóricamente a unos 10 cm encima del tirante normal.
- La altura del vertedor o diferencia entre la cresta de éste y el fondo del canal, corresponde al valor Y_d .
- Para dimensionar el vertedero existen gran variedad de fórmulas, a continuación se describe la fórmula de Forchheiner.

$$Q_v = C * L_v * h^{\frac{3}{2}} \quad \dots 7.37$$

Donde:

Q_v : Caudal a evacuar por el aliviadero, en m³/s.

C : Coeficiente de descarga del vertedor, tabla N° 7.01.



L_v : Longitud del vertedor, en m.

h : Carga promedio encima de la cresta, en m.

El flujo en el canal, deberá ser siempre subcrítico, entonces:

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad \dots 7.38$$

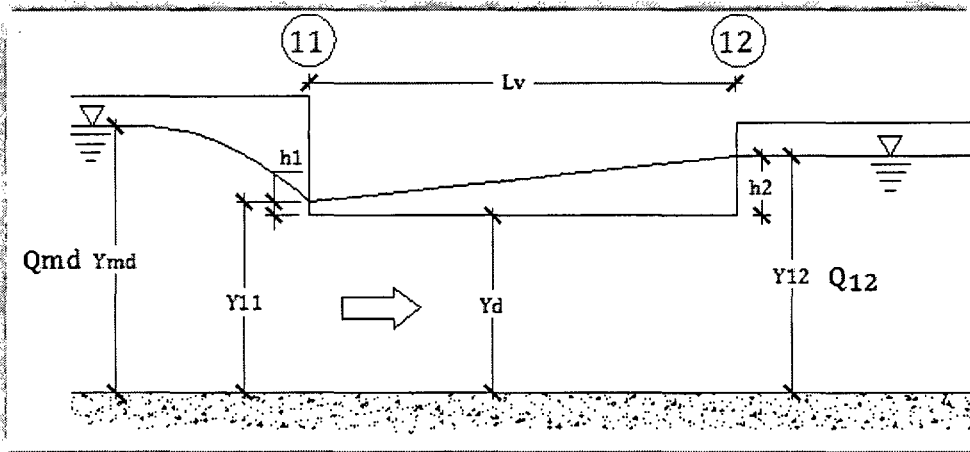
$$h_1 = 0.8 * h_2 \quad \dots 7.39$$

$$h = 0.9 * h_2 \quad \dots 7.40$$

La fórmula 7.37 da buena aproximación cuando se cumple:

$$F_{11} = \frac{V_{11}}{\sqrt{g * \frac{A_{11}}{T_{11}}}} \leq 0.75 \quad \dots 7.41$$

Figura N° 7.11: Detalle del vertedor de excedencias



- Un método alternativo para dimensionar el vertedero es la de Weisbach. Considera un 60% del borde libre, como criterio de diseño. Los vertedores de este tipo dan longitudes mucho más cortos que Forchheimer, razón por la cual se recomienda, además ésta ha sido utilizada con buenos resultados en diferentes lugares del Perú.

$$h = 0.6 * (Y_{md} - Y_d) \quad \dots 7.42$$

Donde:

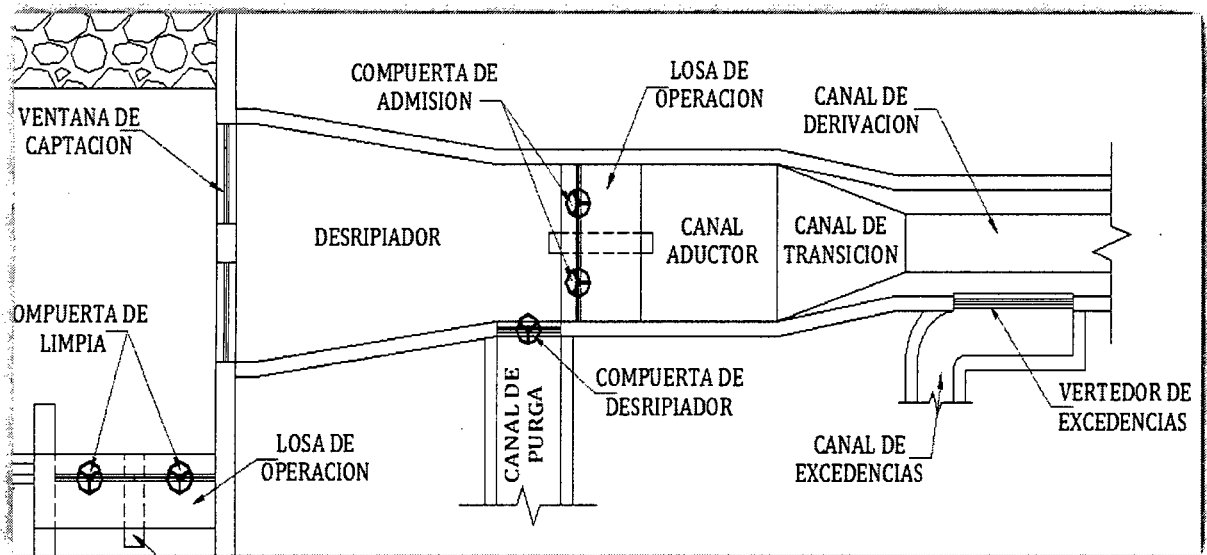
Y_{md} : Tirante para caudal máximo de derivación, en m.

Y_d : Tirante normal en el canal de derivación, en m.

7.8) COMPUERTA DE DESRIPIADOR

La compuerta de limpia ubicada en el desripiador, se instala con la finalidad de eliminar los sólidos que lograron pasar a través de las ventanas de captación. Esta debe tener la capacidad de arrastrar los sedimentos hacia el canal de purga y finalmente hacia el río. El caudal de descarga de la compuerta debe ser por lo menos el caudal de derivación.

Figura N° 7.12: Ubicación de la compuerta de desripiador.



Las compuertas son un caso de orificios grandes, es decir, aquellos en los que la dimensión "hn" es apreciable, comparada con la carga "Y7" sobre el centro de gravedad. Generalmente se consideran como tales aquellos en los que esta relación hn/Y7 es mayor de 0.1.

En este caso la carga en distintos puntos de la sección del orificio es diferente y ya no puede admitir la suposición de la igualdad de velocidades tal como se hace en los orificios.

Por simplicidad de cálculo se utilizan formulas aproximadas para las compuertas cuya forma es igual que para orificios. El caudal está dado por:

$$Q_d = 0.97 * e * N_n * b_n * h_n * \sqrt{2g \left(Y_7 + \frac{V_7^2}{2g} - e * h_n \right)} \quad \dots 7.43$$

Donde:

Q_d : Caudal en canal de derivación, en m³/s.

N_n : Numero de compuertas de limpia en desripiador.

b_n : Ancho de la compuerta de limpia en desripiador, en m.

h_n : Altura de la compuerta de limpia en desripiador, en m.

e : Coeficiente obtenido de la tabla 7.02.

Coeficiente de descarga:

$$C_n = 0.97 * e \quad \dots 7.44$$

Calculo del coeficiente de velocidad:

$$C_v = 0.96 + 0.0979 * \frac{h_n}{Y_7} \quad \dots 7.45$$

Calculo del coeficiente de contracción:

$$C_c = \frac{1}{2} * \frac{h_n}{Y_7} * \left(\frac{C_n}{C_v}\right)^2 + \sqrt{\left[\frac{1}{2} * \frac{h_n}{Y_7} * \left(\frac{C_n}{C_v}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{C_n}{C_v}\right)^2} \quad \dots 7.46$$

Figura N° 7.13: Perfil del flujo a través de compuerta de limpia.

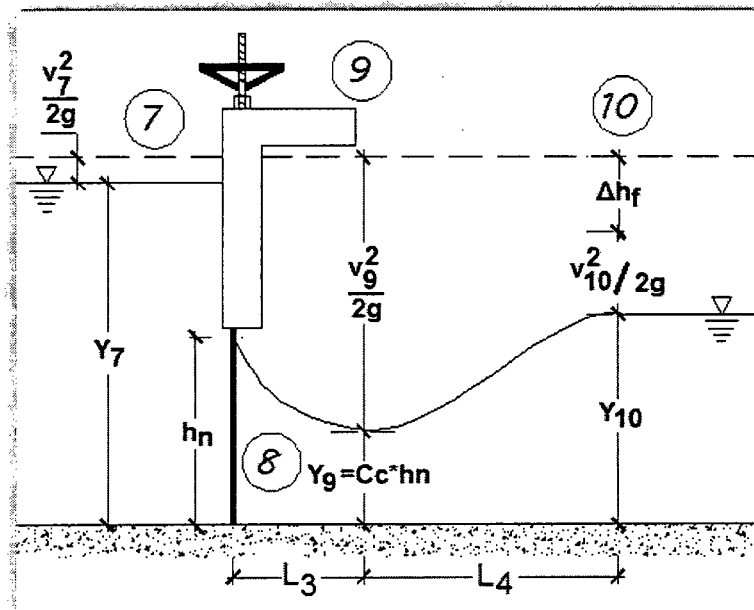


Tabla N° 7.02: Valores de “e”, en función de la carga de agua y altura de compuerta.

| h_n/Y_7 | e |
|-----------|-------|
| 0.00 | 0.611 |
| 0.10 | 0.615 |
| 0.15 | 0.618 |
| 0.20 | 0.620 |
| 0.25 | 0.622 |
| 0.30 | 0.625 |
| 0.35 | 0.628 |
| 0.40 | 0.630 |
| 0.45 | 0.638 |
| 0.50 | 0.645 |
| 0.55 | 0.650 |
| 0.60 | 0.660 |
| 0.65 | 0.675 |
| 0.70 | 0.690 |
| 0.75 | 0.705 |
| 0.80 | 0.720 |
| 0.85 | 0.745 |
| 0.90 | 0.780 |
| 0.95 | 0.835 |
| 1.00 | 1.000 |

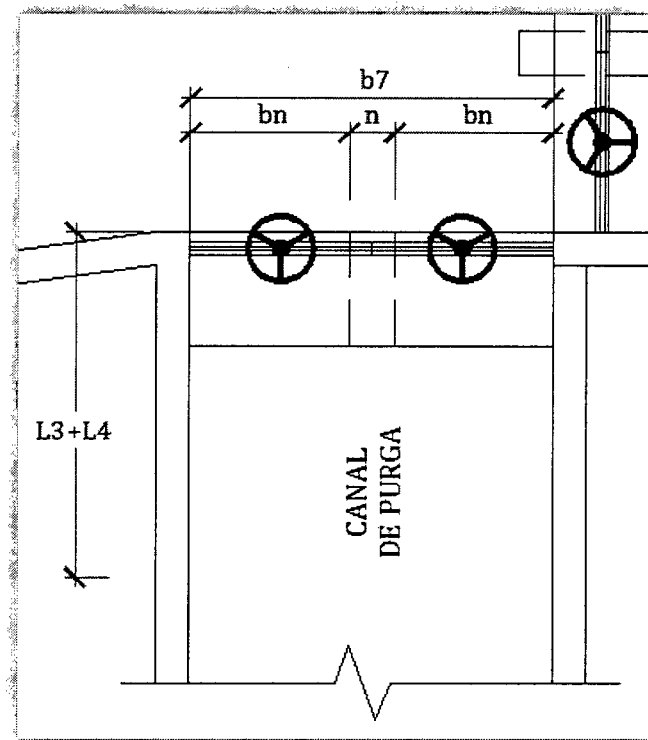
De acuerdo a cálculos de V.V. Vedernikov basados en las fórmulas de N.E. Joukovski (1936) los valores de “e” están dados en la tabla N° 7.02.

Determinación de las longitudes L3:

$$L_3 = \frac{h_n}{C_c} \quad \dots 7.47$$

Entre las secciones 9 y 10 se genera un resalto hidráulico, la determinación de la longitud L4 se realizará en base a la ecuación N° 10.28, propuesta por Safranetz.

Figura N° 7.14: Vista en planta de compuerta de limpia en desripiador.



7.9) PRINCIPALES COTAS VENTANA DE CAPTACIÓN – CANAL DE DERIVACIÓN

La definición de las principales cotas en los muros se realiza para un evento extremo (caudal máximo instantáneo), mientras que el dimensionamiento de la compuerta de admisión se realiza para un caudal mínimo, con la finalidad de que la compuerta tenga la capacidad de derivar el caudal de diseño.

Definición de las principales cotas:

$$C_1 = C_0 + P + H_{max} + BL_p \quad \dots 7.48$$

$$C_2 = C_0 + p_b \quad \dots 7.49$$

$$C_3 = C_0 - t_b \quad \dots 7.50$$

$$C_4 = C_3 + p_s \quad \dots 7.51$$

$$C_5 = C_3 + Y_{3max} + BL_s + \frac{V_3^2}{2g} \quad \dots 7.52$$

$$C_6 = C_3 + Y_5 + BL_5 \quad \dots 7.53$$

$$C_7 = C_3 \quad \dots 7.54$$

$$C_8 = C_7 - S_5 * L_5 \quad \dots 7.55$$

$$C_9 = C_8 - \Delta S \quad \dots 7.56$$

$$C_{10} = C_6 \quad \dots 7.57$$

Donde:

BL_p : Borde libre en muro de encauzamiento.

BL_s : Borde libre en muro de desripador, y compuertas de admisión.

BL_5 : Borde libre en canal de aducción.

H_{max} : Carga de agua sobre el barraje, para caudal máximo instantáneo.

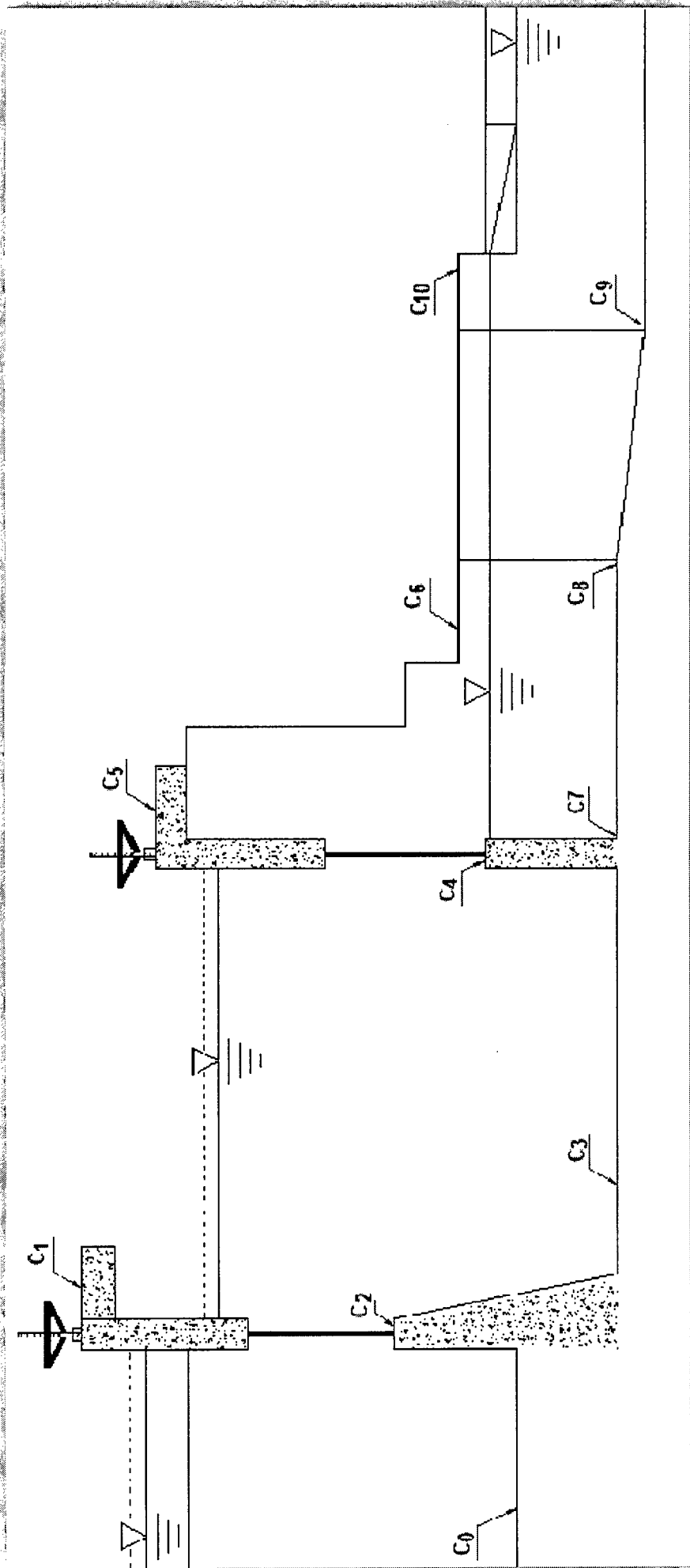
Y_5 : Tirante de agua Y_5 , en canal de aducción.

S_5 : Pendiente en el canal de aducción, en m/m.

L_5 : Longitud del canal de aducción, en m.

ΔS : Desnivel en el canal de transición, en m.

Figura N° 7.15: Principales cotas ventana – Canal de derivación.

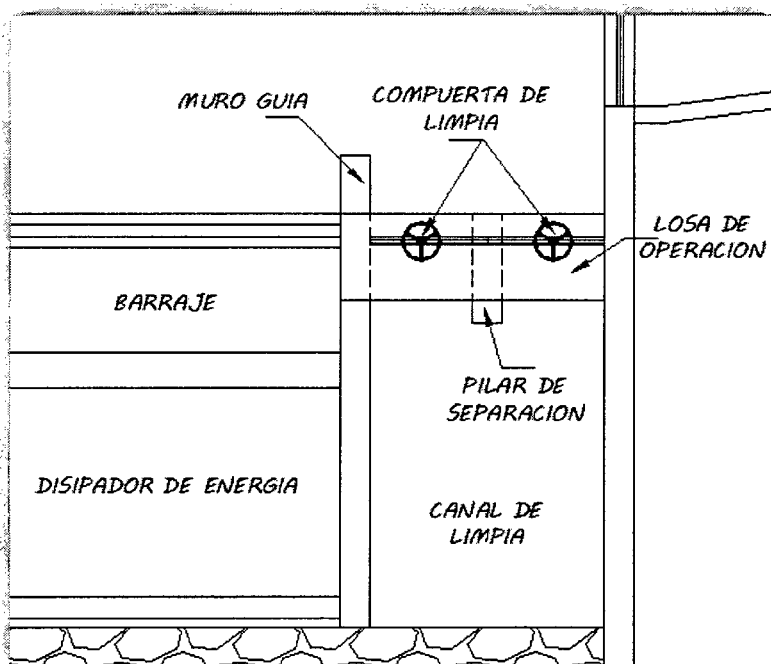


8.0 DISEÑO DE LA ZONA DE LIMPIA

8.1) GENERALIDADES

El canal de limpia es la estructura que se instala en las obras de captación con el objeto de eliminar los sedimentos que se depositan al ingreso del bocal de toma y que permite mejorar la captación en las épocas de estiaje especialmente en ríos con gran variación de caudales.

Figura N° 8.01: Vista en planta canal de limpia.



8.2) DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO

La zona de limpia de gruesa está controlada por compuertas, las cuales permiten la eliminación de sedimentos acumulados delante de las ventanas de captación. Se hará la comprobación del caudal que pasa por debajo de las compuertas, justificando la elección de las dimensiones.

8.2.1) Ancho de la compuerta de limpia

El ancho del canal de limpia debe tener las siguientes características:

- El caudal debe ser por lo menos el doble de la capacidad de la toma o derivar el caudal medio del río.
- La velocidad del agua en el canal de limpia debe variar entre 1.50 y 3.00m/s o por lo menos debe ser igual a la velocidad de arrastre.

- Se recomienda que su ancho sea un décimo de la longitud del barraje. Este ancho sirve de referencia y es recomendable que se disponga de un ancho que no se obstruya con el paso de los materiales de arrastre sobre todo al de suspensión (truncos, ramas basura, etc.)
- Para ríos con anchos de encauzamiento grandes, se recomienda que tenga un mínimo de 5.0 metros o múltiplos de esta medida con el objeto de normalizar el ancho de compuertas y pilares de separación.

El ancho de la compuerta se define de la siguiente manera:

$$B_L = N_L * (b_L + t) \quad \dots 8.01$$

$$B_e = N_L * (b_L + t) - t \quad \dots 8.02$$

Donde:

B_L : Ancho total del canal de limpia, incluye muro guía, en m.

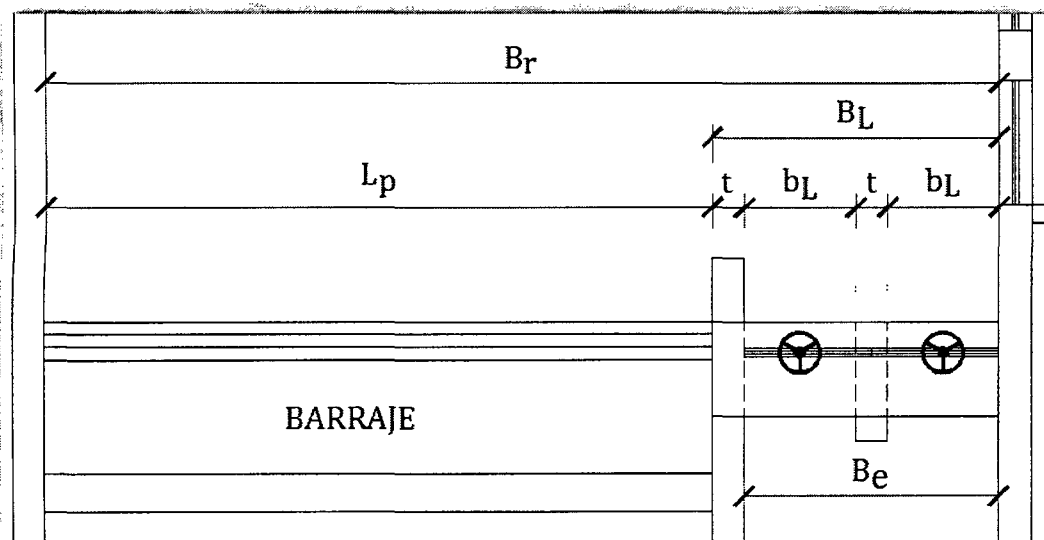
B_e : Ancho efectivo del canal de limpia, en m.

N_L : Numero de compuertas de limpia.

b_L : Ancho de la compuerta, en m.

t : Ancho de pilar de separación en compuertas de limpia.

Figura N° 8.02: Distribución de compuertas en canal de limpia.



Una vez definido el ancho del canal de limpia, puede definirse la longitud del barraje, de la siguiente manera:

$$L_p = B_r - B_L \quad \dots 8.03$$

Donde:

L_p : Longitud del barraje, en m.

B_r : Ancho de encauzamiento, en m.

8.2.2) Altura de la compuerta de limpia

Para el análisis se considera que todo el caudal máximo instantáneo pasa por el barraje, la zona de las compuertas completamente abiertas, y las ventanas de captación se mantienen cerradas.

Podemos establecer la siguiente relación:

$$Q_{max} = Q_b + Q_L \quad \dots 8.04$$

Donde:

Q_{max} : Caudal máximo instantáneo, en m³/s.

Q_b : Caudal sobre el barraje, en m³/s.

Q_L : Caudal por las compuertas de limpia, en m³/s.

La carga de agua sobre el barraje está dada por la fórmula del vertedero:

$$H_0 = \left(\frac{Q_{max} - Q_L}{C_p * L_p} \right)^{2/3} \quad \dots 8.05$$

Dónde:

C_p : Coeficiente de descarga, en m^{1/2}/s

H_0 : Carga de agua sobre el barraje, incluye carga de velocidad.

L_p : Longitud del barraje, en m.

La descarga a través de la compuerta es sumergido, aplicando Bernoulli entre la sección 11 y debajo de la compuerta se obtiene, el caudal de descarga, de la siguiente manera:

$$Q_L = C_L * N_L * b_L * h_L * \sqrt{2g * \Delta Z} \quad \dots 8.06$$

$$h_L = \frac{Q_L}{C_L * N_L * b_L * \sqrt{2g * \Delta Z}} \quad \dots 8.07$$

Dónde:

C_L : Coeficiente de descarga de la compuerta ($C_L = 0.97 * e$)

e : Coeficiente obtenido de la tabla N° 7.02.

h_L : Altura de la compuerta, en m.

ΔZ : Perdida de carga, en m.

La energía en la sección 13 es igual a:

$$E_{13} = t_L + Y_{13} + \frac{V_{13}^2}{2g} \quad \dots 8.08$$

Entre las secciones 11 y 13 se cumple la siguiente relación:

$$t_L + P + H_0 = E_{13} + \Delta Z \quad \dots 8.09$$

$$\Delta Z = t_L + P + H_0 - E_{13} \quad \dots 8.10$$

Dónde:

t_L : Profundidad de la poza, en m.

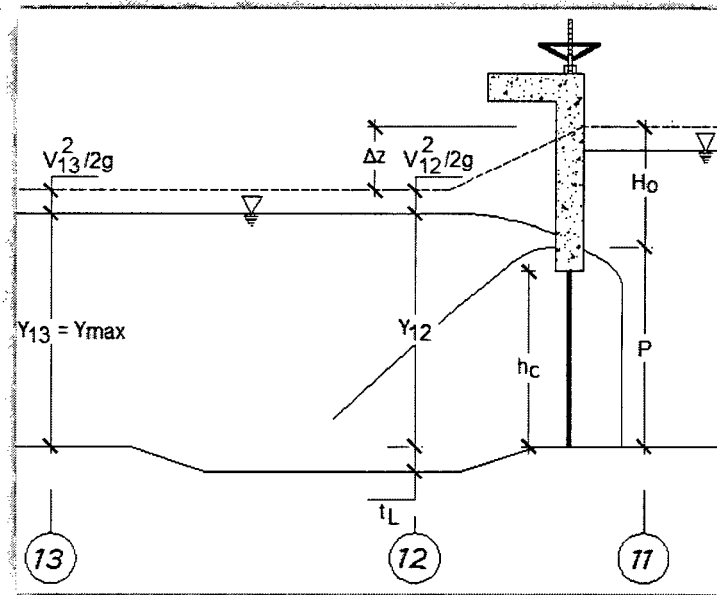
P : Altura del barraje, en m.

H_0 : Carga de agua sobre barraje, en m.

$Y_{13} = Y_{max}$: Tirante del río para caudal máximo instantáneo, en m.

La altura de la compuerta se obtiene a partir de la ecuación N° 8.07, previo a esto debe obtener la pérdida de carga a partir de la ecuación N° 8.10.

Figura N° 8.03: Perfil canal de limpia.



8.2.3) Pendiente del canal de limpia

Es recomendable que el canal de limpia tenga una pendiente que genere la velocidad apropiada de limpia. La fórmula recomendada para calcular la pendiente crítica es:

$$S_L = \frac{n_L^2 * g^{10/9} * B_e^{2/9}}{Q_L^{2/9}} \quad \dots 8.11$$

Donde:

S_L : Pendiente del canal de limpia, en m/m.

n_L : Coeficiente de rugosidad de Manning.

B_e : Ancho efectivo del canal de limpia, en m.

g : Aceleración de la gravedad, en m/s².

Q_L : Caudal que discurre por el canal de limpia, en m³/s.

El fondo o nivel del canal de limpia debe estar por lo menos de 0.60 a 1.20 metros más abajo que el bocal de toma, y el extremo del canal debe coincidir con el extremo de la poza de tranquilización el barraje fijo.

8.2.4) Velocidad en canal de limpia

La velocidad en el canal de limpia es definida con la fórmula de Manning, para esto determinaremos el tirante de la siguiente manera:

$$V_L = \frac{1}{n} * R_L^{2/3} * S_L^{1/2} \quad \dots 8.12$$

El tirante en el canal de limpia es determinado en función a iteraciones de la siguiente ecuación:

$$Y_L = \frac{1}{B_e} * \left[\frac{Q_L * n * (2Y_L + B_e)^{2/3}}{S_L^{1/2}} \right]^{3/5} \quad \dots 8.13$$

Donde:

V_L : Velocidad en el canal de limpia, en m/s.

S_L : Pendiente del canal de limpia, en m/m.

B_e : Ancho efectivo del canal de limpia, en m.

Y_L : Tirante en el canal de limpia, en m/m.

8.3) RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Su trazo es perpendicular al eje del barraje y su flujo en el mismo sentido del río, puede formar ángulos entre 60° y 90° con el eje de captación.

Para separar el canal de limpia del tramo de barraje fijo se construye un muro guía que permite encauzar mejor las aguas hacia el canal de limpia.

8.3.1) Velocidad de arrastre en canal limpia

En lo referente al material que se acumula en el canal de limpia, el flujo existente en el canal debe tener una velocidad V'_L capaz de arrastrar estos sedimentos depositados. La magnitud de V'_L está dada por la siguiente formula:

$$V'_L = 1.5 * C * \sqrt{d} \quad \dots 8.14$$

Donde:

V'_L : Velocidad requerida para iniciar el arrastre, en m/s.

C : Coeficiente en función del tipo de material, 3.2 para arena y grava redondeada, grava rectangular 3.9, de 3.5 a 4.5 para mezcla de arena y grava.

d : Diámetro del grano mayor, en m.

Para que el dimensionamiento de la zona de limpia sea aceptado, debe cumplirse la siguiente relación.

$$V_L > V'_L \quad \dots 8.15$$

Donde:

V_L : Velocidad en el canal de limpia, en m/s.

V'_L : Velocidad requerida para iniciar el arrastre, en m/s.

8.3.2) Consideraciones finales en el canal de limpia

El canal de limpia o barraje móvil tiene generalmente un muro guía que separa el barraje fijo del móvil y permite encauzar mejor el flujo hacia el canal de limpia, y continua hacia aguas abajo separando la poza de disipación en dos segmentos.

9.0 PERFIL DEL BARRAJE VERTEDOR

9.1) ASPECTOS GENERALES

Los vertedores de cimacio consisten de una cresta de control de pared gruesa, cuyo perfil tiene aproximadamente la forma de la superficie inferior de una lámina ventilada que vierte libremente sobre la cresta, esto permite alcanzar un mejor coeficiente de descarga y mantener la estabilidad estructural a través del peso del concreto o mampostería utilizado en el cuerpo de la obra. El perfil puede abandonar dicha forma, una vez que se garantiza poco cambio en el coeficiente de descarga. Normalmente continúa con una rápida tangente, de gran pendiente y relativamente corta, que remata en otra superficie de curvatura contraída a la de la cresta y termina en tangente a la plantilla de un canal de conducción tanque de amortiguamiento o a un salto de esquí.

El cimacio descrito constituye una “sección de control” cuya descarga puede ser libre o controlada. En la descarga libre no se utilizan elementos adicionales para regular las descargas, y el vertido se produce libremente sobre la cresta, permitiendo que su forma en planta pueda ser recta o curva. En el de descarga controlada se utilizan diferentes tipos de compuertas sobre la cresta y su forma en planta sólo puede ser recta poligonal, con pilas intermedias para apoyo de las compuertas.

9.2) CONDICIONES DE DISEÑO

El caudal que vierte sobre un cimacio y la carga sobre la cresta son, en general, variables, según la magnitud de los excedentes que se desea desalojar de la presa derivadora. Sin embargo, es evidente que el perfil del cimacio puede adaptarse de manera óptima a la lámina vertiente que corresponde a un solo caudal o carga, y funciona con mayor o menor eficiencia en otras condiciones de operación. Es motivo de análisis establecer qué caudal o condición de descarga debe elegirse como la “condición de diseño” del perfil del cimacio.

Con frecuencia dicha condición se elige de manera que corresponda a la de gasto o carga máxima que se espera descargue el vertedor; en otros casos

puede ser una intermedia, pero en la elección final debe tratar de lograrse el mejor funcionamiento de la obra para cualquier condición de operación.

El diseño del perfil del barraje implica entonces elegir una "carga de diseño" H_0 o un "gasto de diseño" Q_d , de los que dependen la forma y dimensiones de dicho perfil. Según se indica en la figura N° 9.01, la carga de diseño incluye la carga de velocidad de llegada en el canal de acceso (correspondiente al caudal de diseño), la que a su vez depende de las dimensiones y profundidad P (respecto a la cresta) en dicho canal. Esto es:

$$H_0 = h_0 + h_a \quad \dots 9.01$$

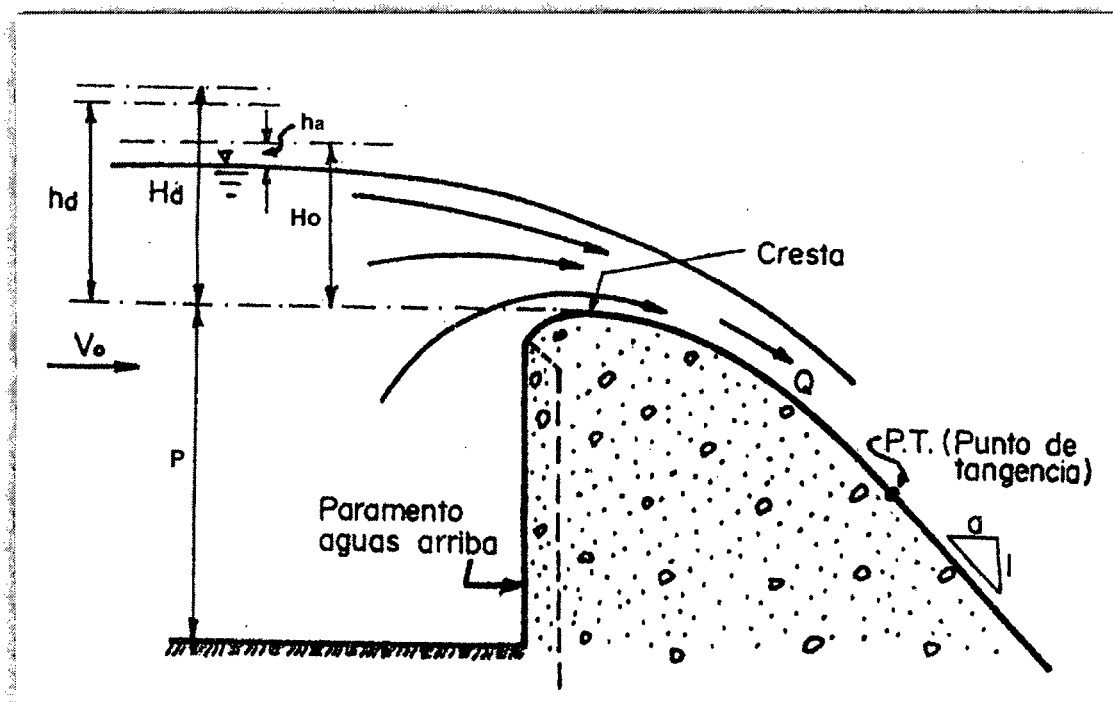
$$h_a = \frac{V_0^2}{2g} \quad \dots 9.02$$

Dónde:

h_0 : Carga de agua sobre barraje.

h_a : Altura de velocidad en canal de aproximación.

Figura N° 9.01: Vertido libre sobre un Barraje.



9.3) CAPACIDAD DE DESCARGA

La capacidad de descarga de un barraje, para la condición de diseño o para otra cualquier condición de operación, es función de la longitud efectiva de la cresta vertedora, de la carga real con que opere, de la geometría del perfil y de las dimensiones y profundidad del canal del acceso.

En el caso de vertido libre (figura N° 9.01); con o sin pilas intermedias, la ecuación para el cálculo de la capacidad de descarga es la general de vertederos.

$$Q = C_p * Le * H_0^{3/2} \quad \dots 9.03$$

Dónde:

C_p : Coeficiente de descarga del barraje vertedor, en $m^{1/2}/s$

H_0 : Carga total de operación, incluye carga de velocidad de llegada, en m.

Le : Longitud efectiva de cresta, en m.

Q : Caudal de descarga, en m^3/s .

En el cálculo de H_0 se considera que:

$$H_0 = h_0 + \frac{V_0^2}{2g} \quad \dots 9.04$$

$$V_0 = \frac{Q}{Le * (P + h_0)} \quad \dots 9.05$$

Dónde:

P : Altura del barraje.

La ecuación N° 9.05 es la velocidad de llegada y Q es la descarga en el canal de llegada.

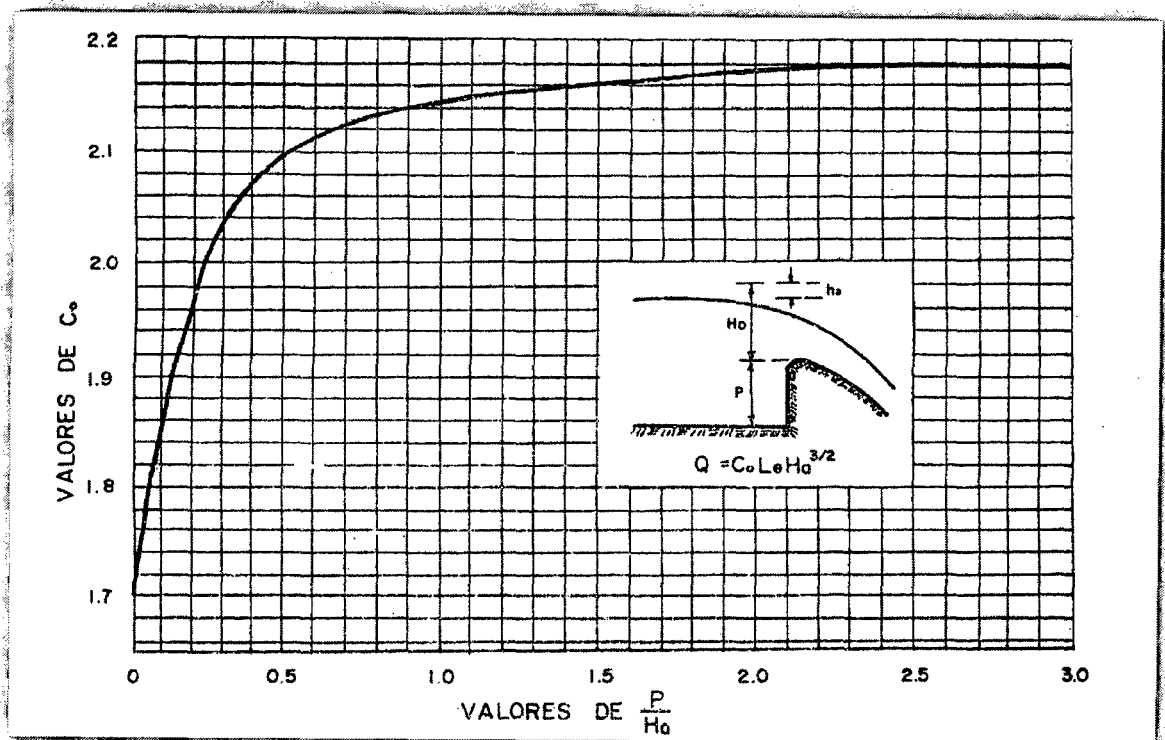
9.4) COEFICIENTE DE DESCARGA

9.4.1) Método de U.S. Bureau of Reclamation

El coeficiente C_p de la ecuación N° 9.03 depende principalmente de la carga H con que opera el vertedor en un momento dado, de la carga H_0 elegida

para diseñar el perfil del cimacio, de la profundidad del canal de acceso, del talud de la cara aguas arriba y del grado de ahogamiento de la descarga. La interrelación de C_p con todos estos elementos ha sido obtenida únicamente de manera experimental y la que se presenta a continuación corresponde al U.S. Bureau of Reclamation.

Grafico N° 9.01: Coeficiente de descarga en cimacios de paramento aguas arriba vertical, vertiendo con la carga de diseño.

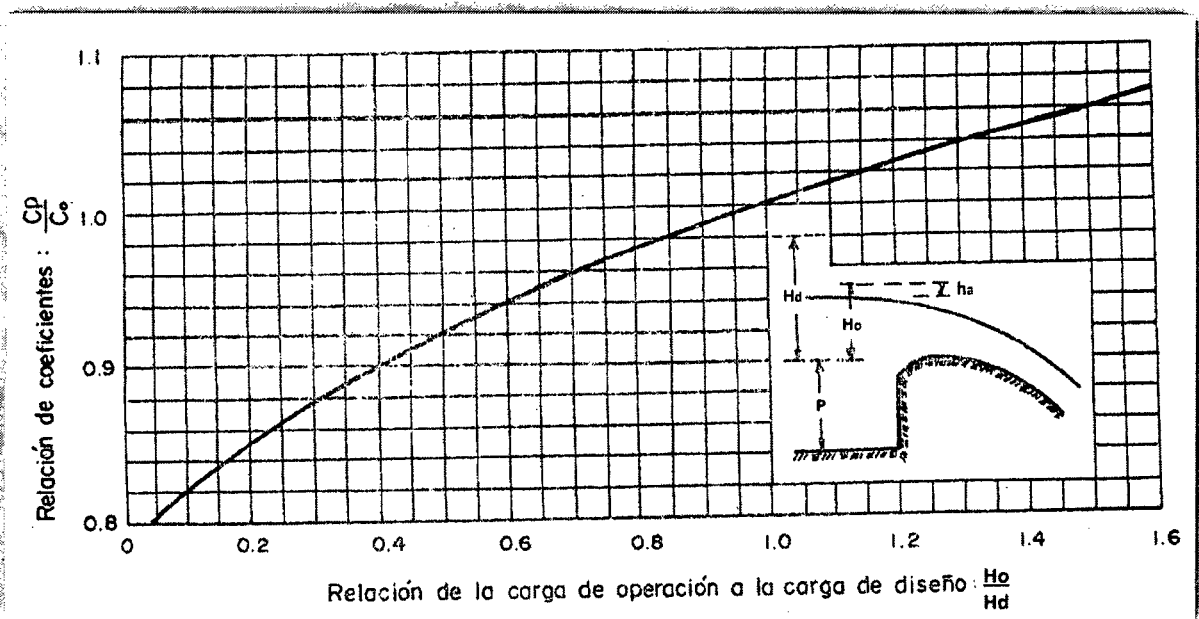


El grafico N° 9.01 muestra la gráfica principal que relaciona el valor de C_p , que en este caso adquiere el valor C_0 , con el de P/H_0 (profundidad del canal de acceso entre carga de diseño) para el caso en que la carga de operación sea igual a la de diseño ($H_0/H_d = 1$) y que el paramento aguas arriba del cimacio sea vertical. Aquí se observa que cuando $P = 0$, $C_0 = 1.705$, que corresponde a un vertedor de cresta ancha y que cuando P crece, C_0 también, hasta un máximo de 2.182, a partir del cual se mantiene constante.

Cuando la carga de operación es distinta de la de diseño y se mantiene vertical la cara aguas arriba, el coeficiente de descarga varía con la relación H_0/H_d , como lo muestra el grafico N° 9.02. Es interesante observar que el

coeficiente C_p es mayor que C_0 cuando la carga de operación es mayor que la de diseño. Esto implica que es conveniente elegir una carga de diseño que sea menor que la máxima con que opere el cimacio, a fin de lograr mejores condiciones de operación cuando la última se presente, esto tiene la limitación de presión negativa máxima tolerable sobre la espalda del cimacio.

Grafico N° 9.02: Coeficiente de descarga en cimacios de paramento aguas arriba vertical, vertiendo con cargas diferentes a la de diseño.



De esta manera, el valor final del coeficiente C en la ecuación N° 9.03 resulta del producto de C_0 obtenido del grafico N° 9.01, por la corrección del grafico N° 9.02.

9.4.2 Método de Gehy (1982)

Otra manera de determinar el coeficiente de descarga C_p , es a través del uso de ecuaciones propuestas por Gehy (1982), en función de la relación P/h_0 , donde P es la altura del paramento de aguas arriba, y h_0 la carga de diseño sobre el vertedero, siendo válido si $H_0 \approx h_0$ del Cimacio.

$$\text{Si } 0 \leq \frac{P}{H_0} \leq 0.5 \quad ; \quad C_p = -2.025 * \left[\frac{P}{H_0} \right]^2 + 1.8 * \left[\frac{P}{H_0} \right] + 1.704 \quad \dots 9.6$$

$$\text{Si } 0.6 \leq \frac{P}{H_0} \leq 2.5 \quad ; \quad C_p = -0.034 * \left[\frac{P}{H_0} \right]^2 + 0.145 * \left[\frac{P}{H_0} \right] + 2.031 \quad \dots 9.7$$

$$\text{Si } \frac{P}{H_0} \geq 2.5 \quad ; \quad C_p = 2.18$$

9.5) LONGITUD EFECTIVA DE LA CRESTA

La longitud real o neta de la cresta vertedora reduce su magnitud por efecto de las contracciones que experimenta el flujo debidas a la presencia de estribos y pilas sobre el cimacio. Los estribos son muros laterales verticales que sirven para confinar el flujo; la presencia de pilas intermedias obedece a la necesidad de construir un puente sobre el vertedor y normalmente de utilizar compuertas para controlar la descarga.

La longitud que resulta después de considerar dichos efectos se conoce como longitud efectiva y bale:

$$Le = L_p - 2 * (ka + N_p * kp) * H_0 \quad \dots 9.08$$

Donde:

H_0 : Carga total de operación, en m.

ka : Coeficiente de contracción por efecto de estribos.

kp : Coeficiente de contracción por efecto de pilas

L_p : Longitud total de la cresta, en m.

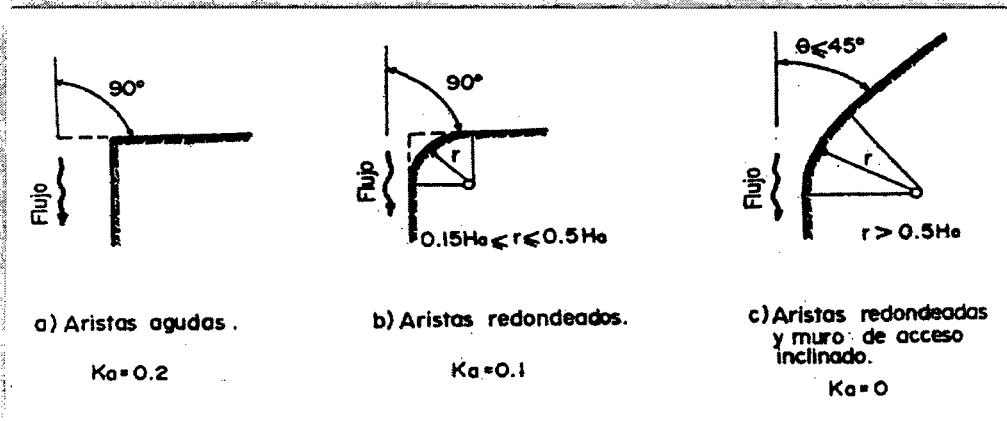
Le : Longitud efectiva de la cresta, en m.

N_p : Numero de pilas colocadas sobre el cimacio.

En el cálculo del caudal descargado por vertedores, con o sin pilas intermedias, la longitud efectiva de cresta corresponde a la obtenida de la ecuación N° 9.08, siendo el coeficiente de descarga el mismo en ambos casos.

El coeficiente de contracción por estribos se vé afectado por la forma del estribo, por el ángulo que forma el muro de acceso aguas arriba con la dirección del flujo, por la relación entre carga de operación y carga de diseño y por la magnitud de la velocidad de llegada. Para condiciones de operación con la carga de diseño, el U.S. Bureau of Reclamation recomienda los valores medios que de indican en la figura N° 9.02.

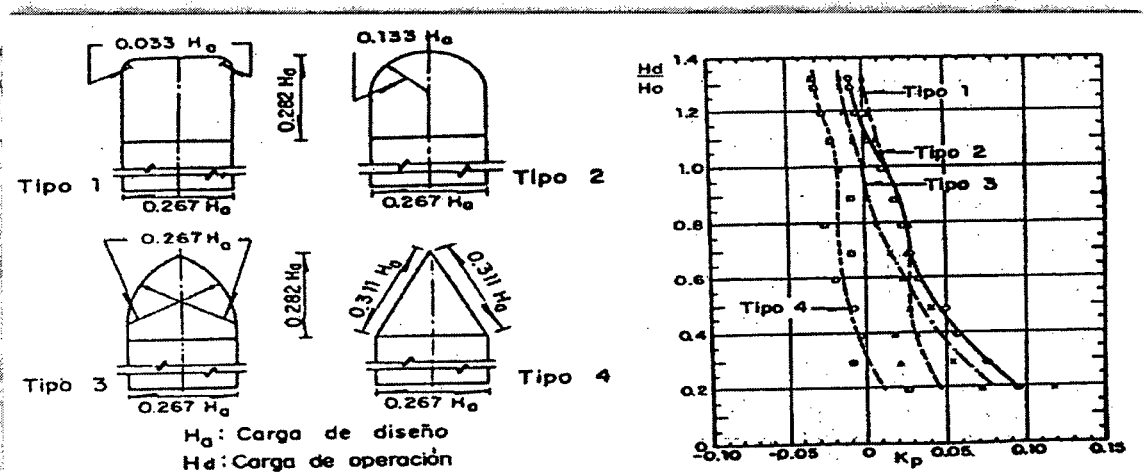
Figura N° 9.02: Coeficiente de contracción en estribos, según U.S. Bureau of Reclamation.



El coeficiente de contracción por pilas varía principalmente con la forma y posición del tajamar, su espesor, la carga de operación respecto de la de diseño, el tirante del flujo de llegada (aguas arriba).

Los resultados experimentales del U.S. Army Engineers (WES), relativos a contracción por pilas, se presentan en la figura N° 9.03 para diferentes formas del tajamar, con su extremo coincidiendo en planta con el inicio del perfil del cimacio de la forma WES. En dicha figura los valores de k_p se obtienen a partir de la relación H_o/H_d . Aunque la pila tipo 4 es la más favorable desde el punto de vista de la contracción, induce presiones negativas, por lo que se recomiendan los tipos 2 y 3.

Figura N° 9.03: Coeficiente de contracción por pilas de formas diferentes, con el tajamar coincidiendo con el plano vertical del paramento aguas arriba de un cimacio de perfil WES y velocidad de llegada despreciable.

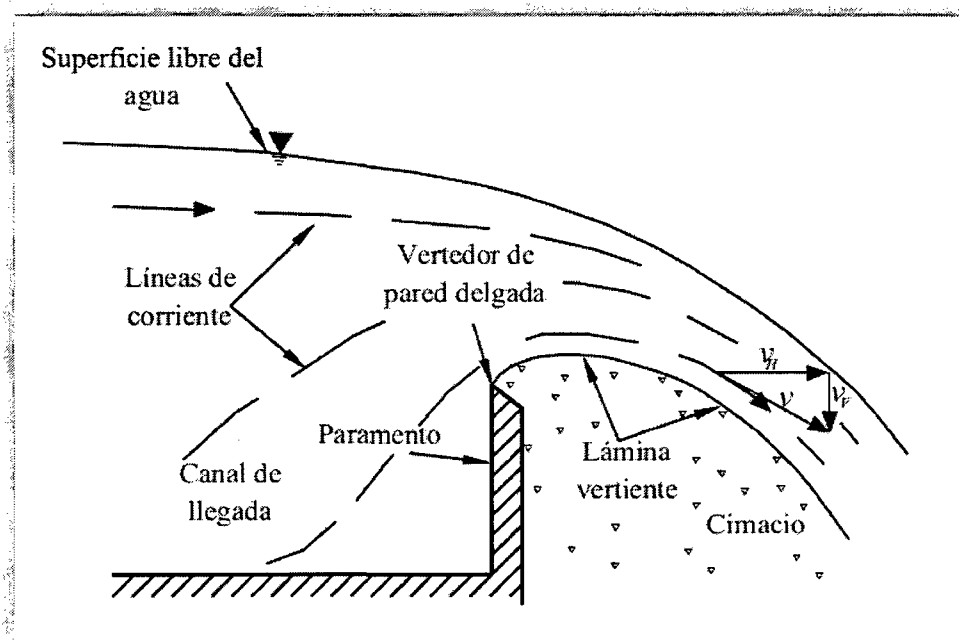


9.6) PERFIL DEL CIMACIO

Creager fué uno de los primeros que estudiaron la forma del perfil de un cimacio y al que obtuvo, por muchos años, se le conoció como "perfil de Creager". Posteriormente, muchos investigadores y dependencias estudiaron el perfil para diferentes condiciones geométricas y de operación.

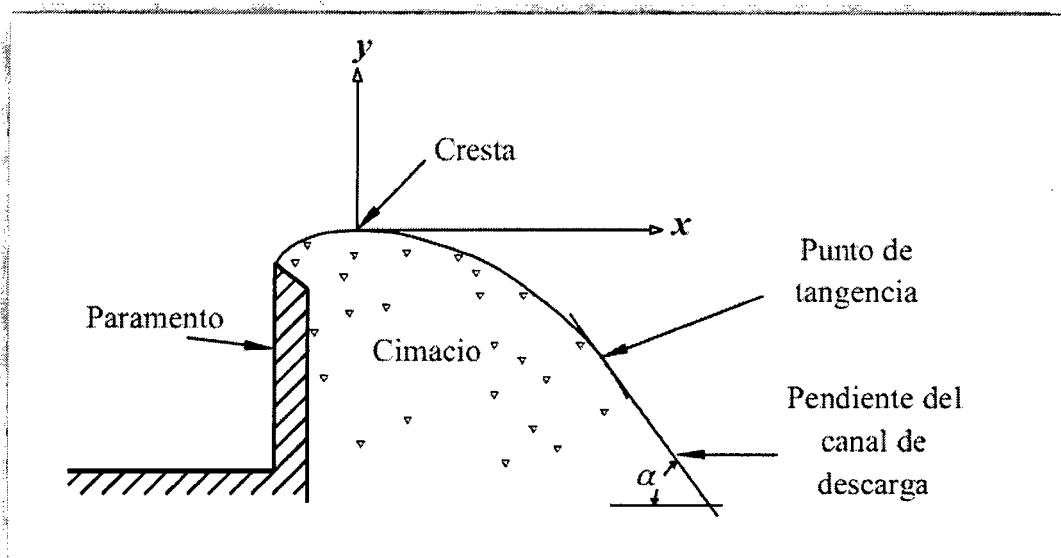
Este tipo de vertedores a los cuales se les ha dado el nombre de cimacios, donde la forma más eficiente y óptima en que funcionan, es la que se aproxima a la de la superficie inferior de la lámina que se produce por un vertedor en pared delgada como la mostrada en la figura N° 9.04. La forma de esta sección depende de la carga y de la inclinación del paramento, los criterios más utilizados para este tipo de cimacios son; el de U.S. Bureau of Reclamation en adelante en el texto USBR y el de Waterways Experiment Station en adelante en el texto WES.

Figura N° 9.04: Vertedor de pared delgada.



Para ambos criterios el perfil de un cimacio se diseña en dos secciones limitadas por la cresta vertedora, aguas arriba y aguas debajo de la cresta. El diseño del perfil del cimacio considera los ejes coordenados x y y sobre la cresta, como se muestra en la figura N° 9.05.

Figura N° 9.05: Eje de coordenadas.



El perfil aguas debajo de la cresta del cimacio se obtiene mediante la ecuación N° 9.09 que describe el perfil del agua de acuerdo con la experimentación:

$$y = -k * H_0 * \left(\frac{x}{H_0}\right)^n \quad \dots 9.09$$

Donde:

k, n : Coeficientes experimentales que dependen del criterio a emplear, y son adimensionales.

x, y : Coordenadas del perfil de acuerdo con el sistema de ejes mostrada en la figura N° 9.05.

H_0 : Carga de diseño elegido, incluye altura de velocidad, en metros.

El perfil aguas debajo de la cresta inicia desde el origen de coordenadas hasta un punto donde se une con el canal de descarga con pendiente constante, el punto donde el perfil abandona la curva del cimacio y adquiere una pendiente constante es un punto de tangencia. El punto único donde la pendiente dada del canal es tangente a la curvatura del perfil de un cimacio es el punto de tangencia y su ubicación depende de las condiciones aguas debajo de la cresta. También, ese punto surge de la necesidad de terminar la parte curva aguas debajo de la cresta para unirla con una pendiente que así lo requiera el

diseño. Obviamente el ángulo de inclinación α de esa línea respecto de un plano horizontal afecta la ubicación del punto de tangencia (ver figura N° 9.06).

Por tanto, el rango de x para la ecuación aguas debajo de la cresta es:

$$0 \leq x \leq x_t \quad \dots 9.10$$

Donde x_t , es la coordenada sobre el eje x del punto de tangencia y se obtiene derivando la ecuación N° 9.09 e igualando a la pendiente, lo que da:

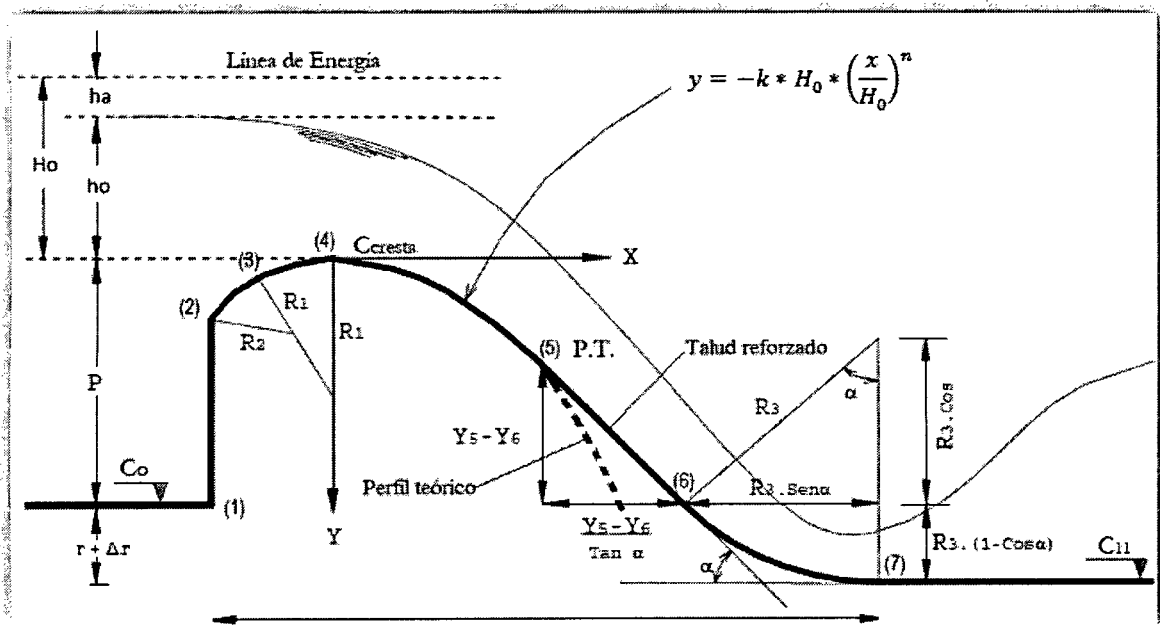
$$\tan(\alpha) = \frac{1}{a} \quad \dots 9.11$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{kn}{H_0^{n-1}} * x_t^{n-1} = \tan(\alpha) \quad \dots 9.12$$

$$x_t = \frac{H_0}{\left[k * n * \left(\frac{1}{\tan(\alpha)} \right) \right]^{\frac{1}{n-1}}} \quad \dots 9.13$$

Y y_t se obtiene al sustituir el valor de x_t en la ecuación N° 9.09 que describe el perfil del cimacio.

Figura N° 9.06: Ubicación de punto de tangencia en cimacio.



9.6.1) Perfil de cimacio criterio de diseño según el US Bureau of Reclamation (USBR)

El cuerpo de ingenieros del USBR realizó una serie de investigaciones sobre los cimacios y después de un análisis basado en una gran recopilación de datos y resultados de campo, presentaron los resultados en gráficas adimensionales para obtener las variables necesarias para el diseño de cimacios de manera general, dependen de la carga de velocidad ha , de la carga de diseño Ho y de la inclinación del paramento aguas arriba de la cresta.

Los valores de k y n para obtener las ecuaciones del perfil aguas abajo de la cresta del cimacio, se obtienen de las figuras N° 9.08 y 9.09 respectivamente y el valor de las variables involucradas (x_c , y_c , R_1 , R_2) en el trazo del cimacio aguas arriba de la cresta, se obtiene mediante el uso de las figuras N° 9.10, 9.11, y 9.12.

Figura N° 9.07: Elementos de los perfiles de cimacio con la forma de la lámina vertical.

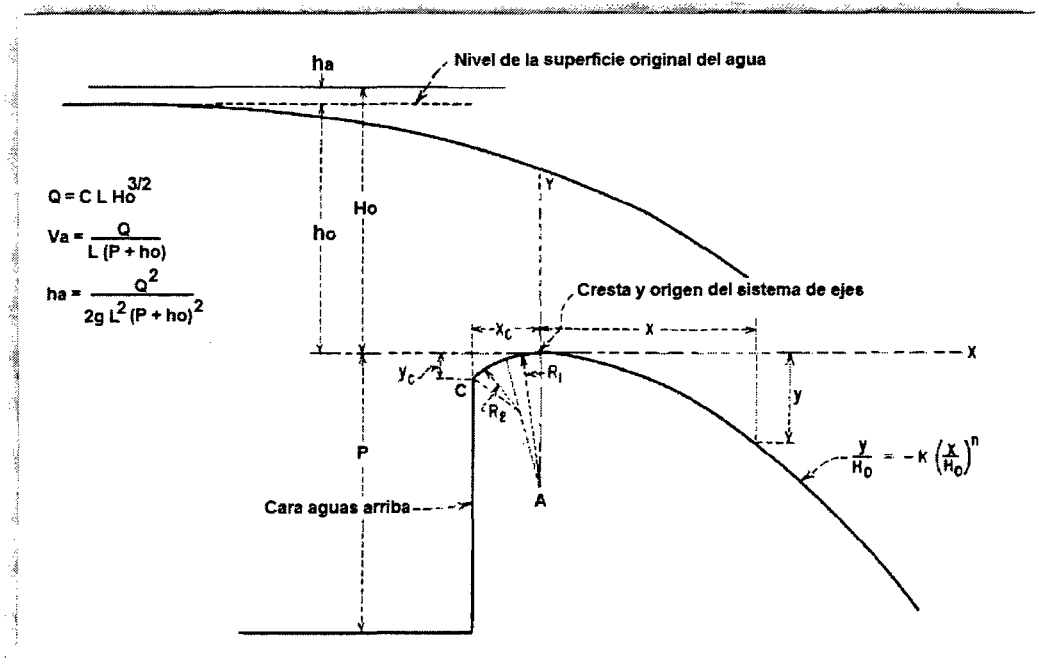


Figura N° 9.08: Valor de k para el diseño del perfil de un cimacio.

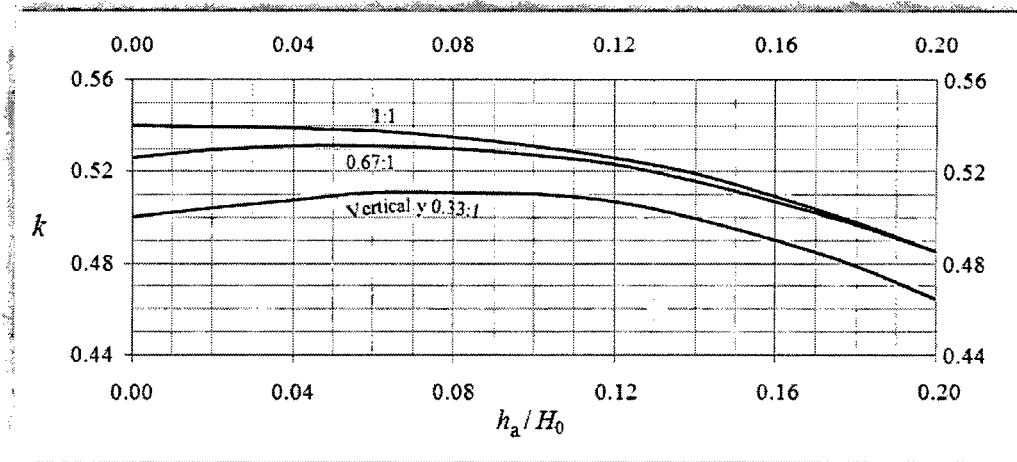


Figura N° 9.09: Valor de n para el diseño del perfil de un cimacio.

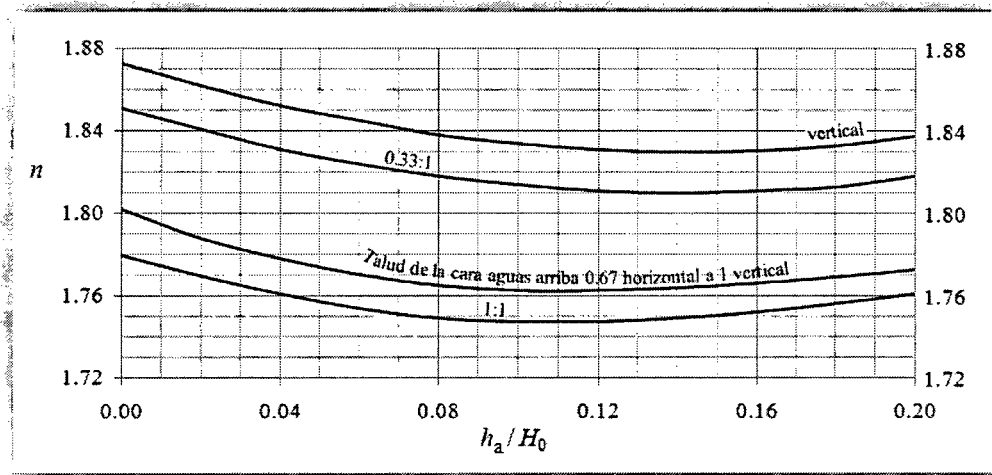


Figura N° 9.10: Valor de x_c/H_0 para el diseño del perfil de un cimacio.

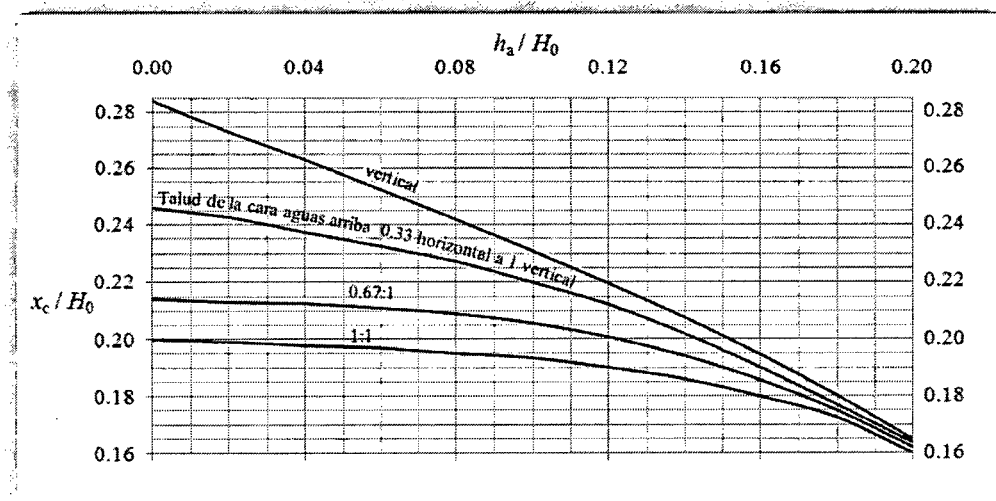


Figura N° 9.11: Valor de y_c/H_0 para el diseño del perfil de un cimacio.

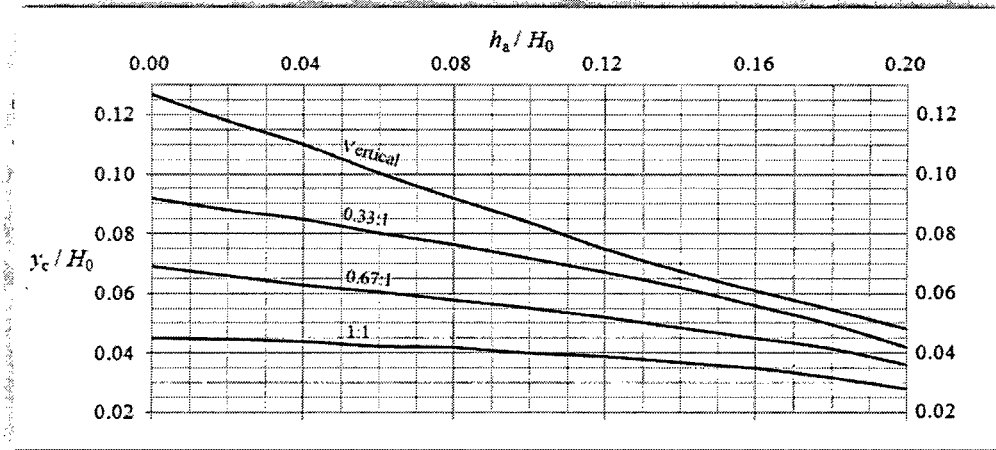
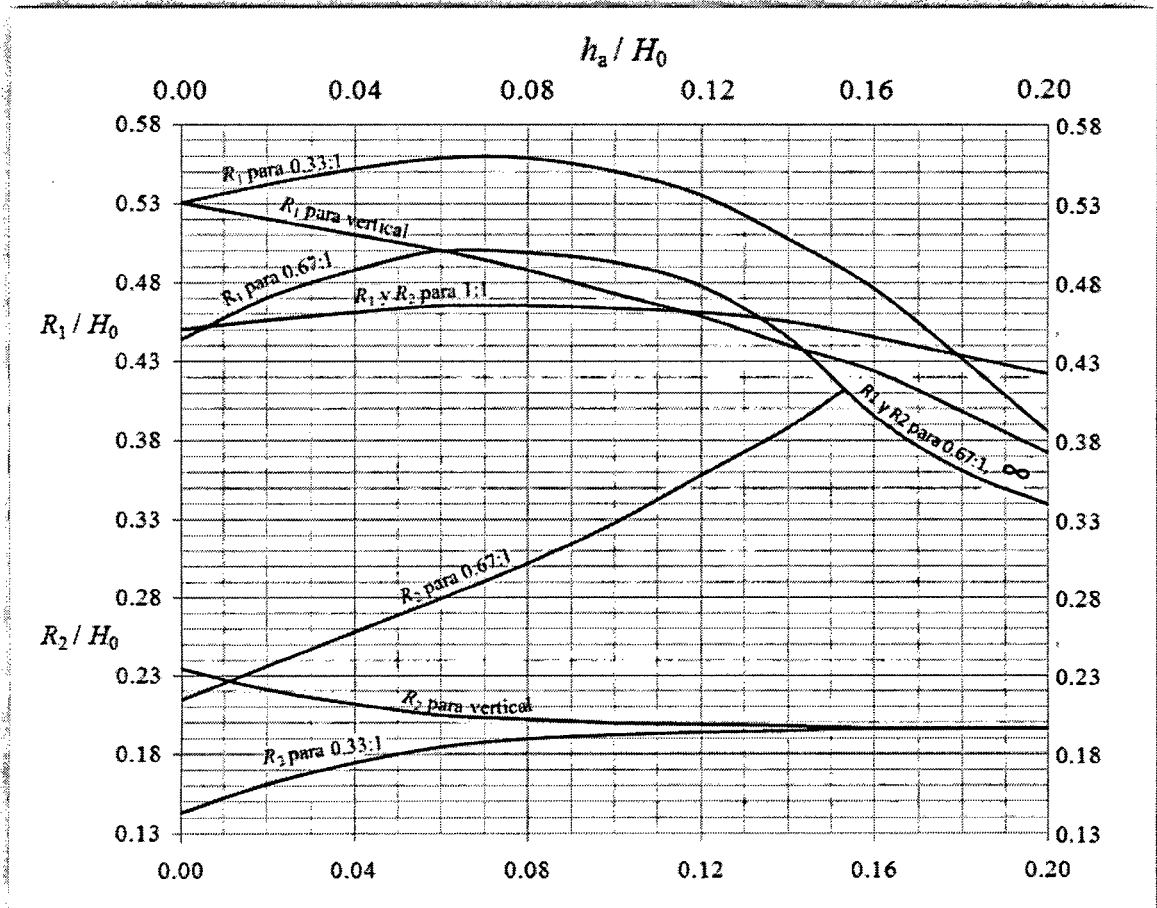


Figura N° 9.12: Valor de $\frac{R_1}{H_0}, \frac{R_2}{H_0}$ para el diseño del perfil de un cimacio.



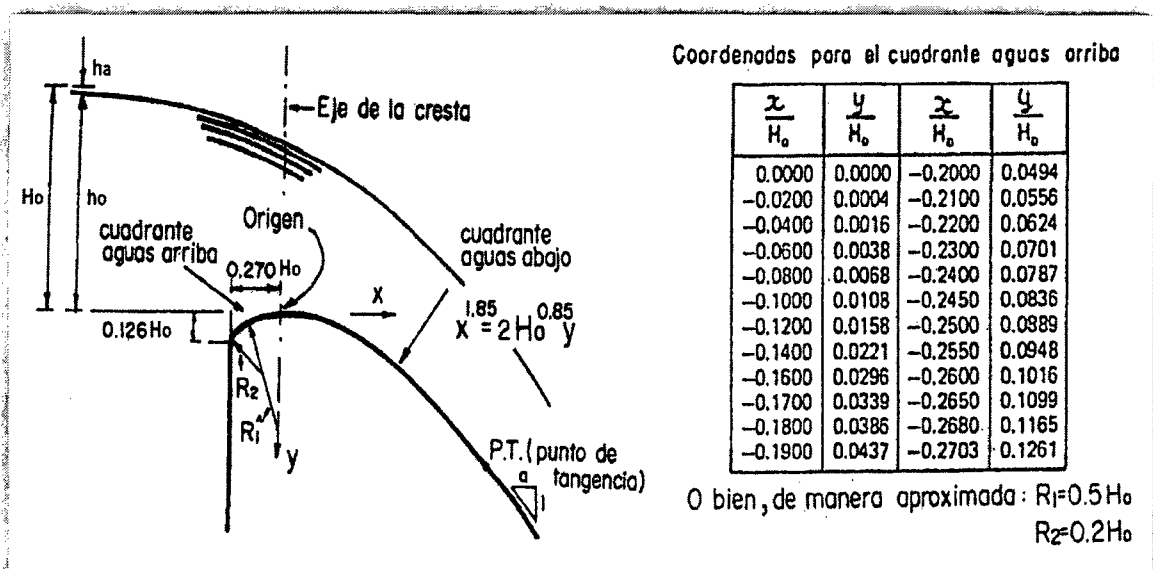
9.6.2) Perfil de cimacio criterio de diseño según la Waterways Experiment Station (WES)

El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América de la Waterways Experiment Station, WES estableció otro criterio de diseño que

depende de la relación que hay entre la altura de la cresta y el canal de llegada y la carga total de diseño H_0 , donde $P/H_0 > 1$, para profundidades del canal de llegada grandes, cargas de velocidad de diseño despreciable $H_0 = h_0$, $ha = 0$ y para paramentos verticales, figura N° 9.13. El criterio WES puede verse como un caso particular del criterio USBR.

Para este criterio, los valores de k y n de la ecuación N° 9.09 son constantes y valen: $k = 0.5$ y $n = 1.85$ si el paramento de aguas arriba es vertical y la profundidad P es grande $P/H_0 \geq 1$.

Figura N° 9.13: Perfil de un cimacio tipo WES con velocidad de llegada despreciable y paramento aguas arriba vertical $P/H_0 \geq 1$.



Por otra parte, los valores de R_1 , R_2 , x_c y y_c se obtienen de las ecuaciones siguientes:

$$R_1 = 0.5 * H_0 \quad \dots 9.14$$

$$R_2 = 0.2 * H_0 \quad \dots 9.15$$

$$x_c = -0.27 * H_0 \quad \dots 9.16$$

$$y_c = -0.126 * H_0 \quad \dots 9.17$$

9.6.3) Radio de la curva de descarga (R_3), ángulo del arco de círculo (α)

El radio de la curva de descarga R_3 , (ver figura N° 9.06), se calcula mediante la siguiente expresión:

➤ Formula 01:

$$R_3 = 10 \frac{V_1 + 6.4 * H_0 + 16}{3.6 * H_0 + 64} \quad \dots 9.18$$

Donde:

R_3 : Radio del arco del círculo, en pies.

V_1 : Velocidad al pie del barraje, en m/s.

H_0 : Carga total de operación, incluye carga de velocidad de llegada, en pies.

➤ Formula 02:

$$R_3 = 0.5 * H_0 \quad \dots 9.19$$

Donde:

H_0 : Carga total de operación, incluye carga de velocidad de llegada, en m.

Para el cálculo del ángulo del arco de círculo de la curva de descarga, emplearemos dos criterios, la primera igualando a la profundidad de la poza de disipación, y la segunda en función del talud de refuerzo.

➤ Altura de la curva de descarga del círculo igual a la profundidad del pozo de amortiguación:

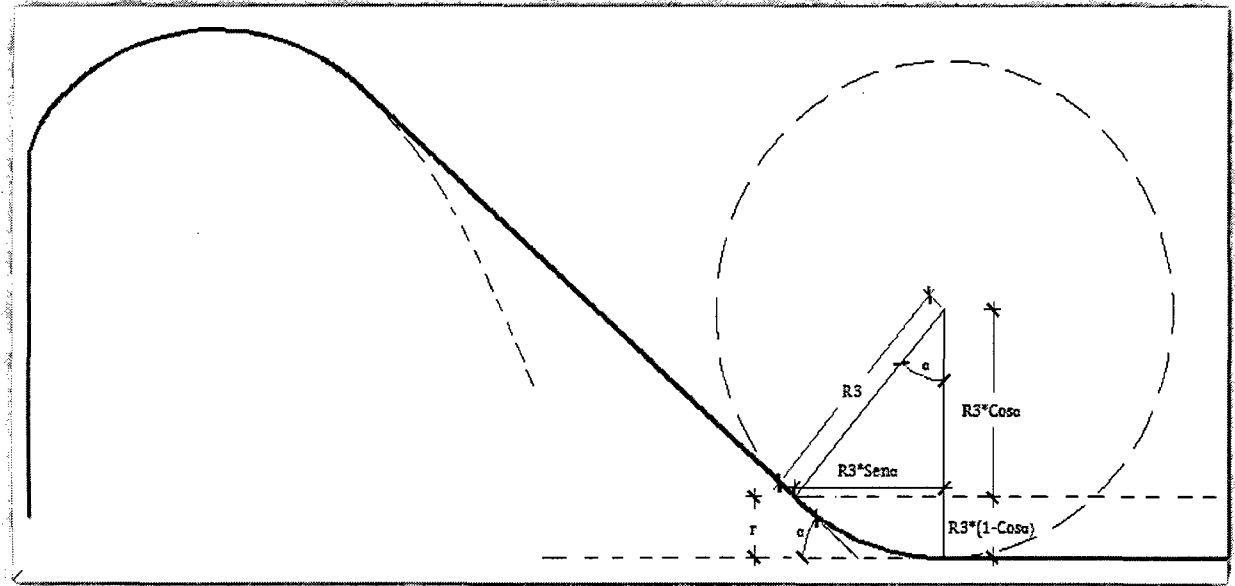
$$r = R_3 * (1 - \cos\alpha) \quad \dots 9.20$$

Donde:

R_3 : Radio del arco del círculo, en m.

r : Profundidad de la poza de disipación de energía, en m.

Figura N° 9.14: Altura de curva de descarga igual a la profundidad de la poza de disipación de energía



- Definiendo el talud de refuerzo del canal de descarga con pendiente constante, se recomienda los siguientes taludes 1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:1.5 (Figura N° 9.15).

$$\tan\alpha = \frac{1}{Z_b} \quad \dots 9.21$$

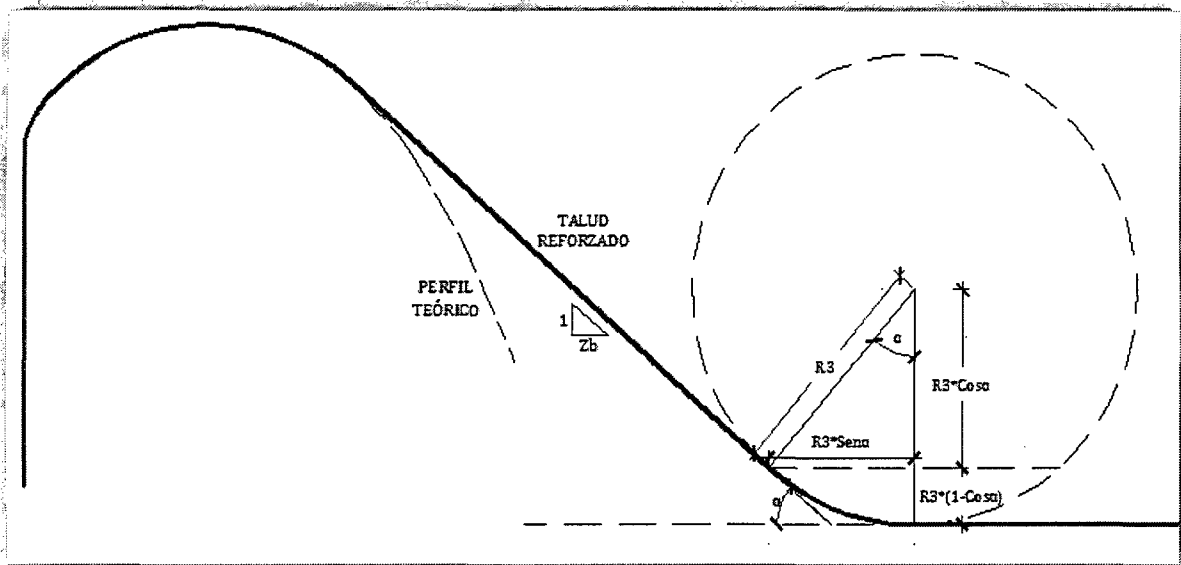
Donde:

Z_b : Talud del canal de fuerte pendiente.

9.7) DEFINICIÓN DEL PERFIL DE CIMACIO AGUAS ARRIBA DE LA CRESTA

El perfil del cimacio aguas arriba de la cresta según la práctica usual, se puede obtener mediante el método semigráfico que se describe a continuación. El método consiste en dos curvas tangentes entre si y tangentes a la cresta del cimacio (origen de los ejes) figura N° 9.05. El procedimiento para poder obtener el perfil del cimacio aguas arriba de la cresta es:

Figura N° 9.15: Curva de descarga en función del talud del canal de pendiente constante



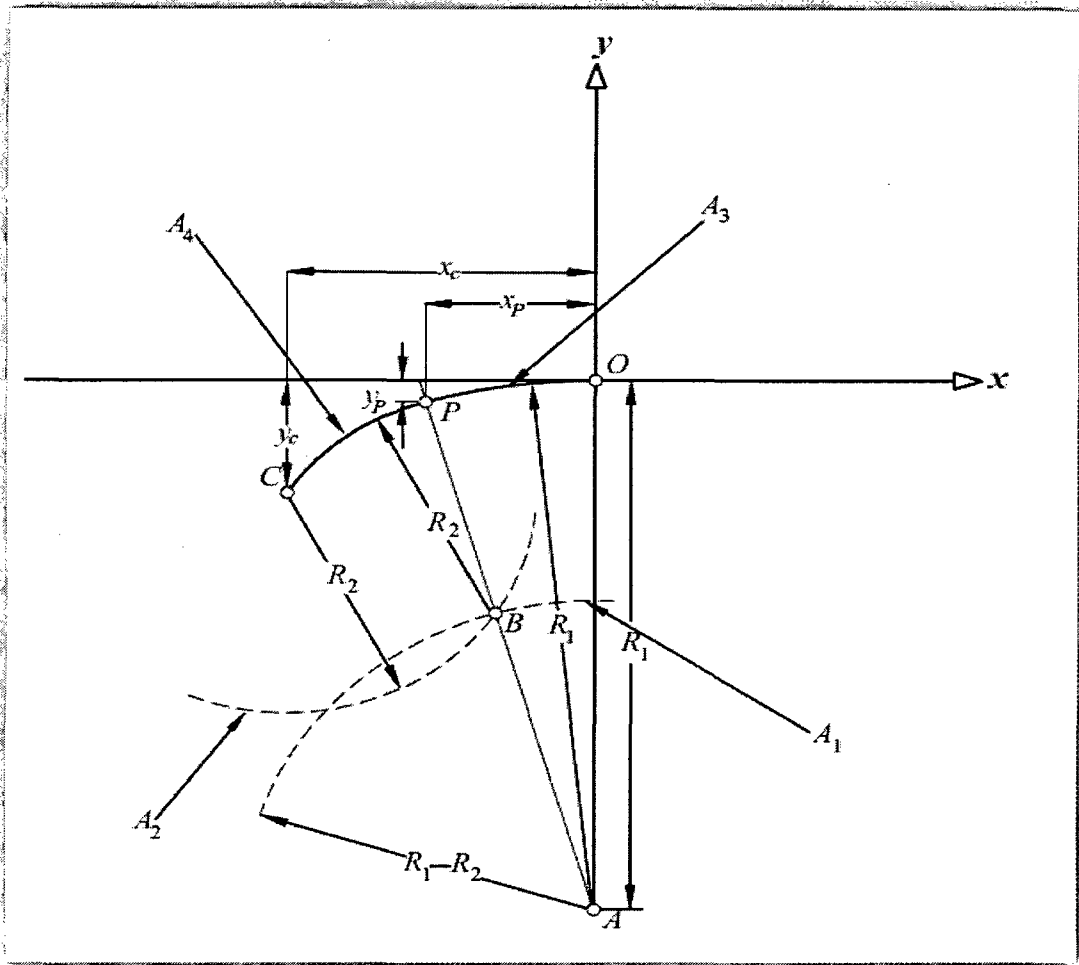
9.7.1) Trazos preliminares

- Localizar el centro de la curvatura A del primer círculo $A(0, -R_1)$.
- Trazar un arco A_1 de radio $R = R_1 - R_2$ con centro en A .
- Localizar el punto C de coordenadas $C(x_c, y_c)$.
- Trazar un arco A_2 de radio R_2 con centro en C .
- Identificar el punto B en la intersección de los arcos A_1 y A_2 , el cual se ubica dentro del triángulo OAC .
- Trazar la línea AB del punto A hasta B extendiéndola hasta el eje x .

9.7.2) Trazos Definitivos

- Trazar un arco A_3 de radio R_1 con centro en A , desde el origen O hasta la línea AB .
- Trazar un arco A_4 de radio R_2 con centro en B desde C hasta la línea AB . El punto P es el punto tangente de las dos curvas A_3 y A_4 por donde pasa la línea AB .

Figura N° 9.16: Perfil de cimacio aguas arriba de la cresta



Las variables R_1, R_2, x_t, y_t del método semigráfico dependen del criterio de diseño a emplear, las cuales han sido explicadas en los subcapítulos 9.6.1 y 9.6.2.

9.7.3) Geometría del perfil del cimacio aguas arriba de la cresta

El objetivo de este sub capítulo es encontrar las ecuaciones que gobiernan las curvas del cimacio que se encuentran aguas arriba de la cresta. Para esto se aplicaron conocimientos de Álgebra elemental, Geometría Analítica y Plana, se resolvieron sistemas de ecuaciones para obtener los puntos de intersección.

La ecuación N° 9.22 es la ecuación general de un circunferencia con centro en i, j y x, y son coordenadas que describen la circunferencia y r es el radio del círculo.

$$(x - i)^2 + (y - j)^2 = r^2 \quad \dots 9.22$$

Los trazos definitivos del perfil buscado son dos arcos de círculo por lo que ambos círculos tendría la forma de la ecuación N° 9.22 pero, al no ser círculos completos, el rango de x que describe el trazo está limitado.

El primer trazo definitivo tiene centro C de coordenadas $(0; -R_1)$, con un radio r de magnitud R_1 , sustituyendo en la ecuación N° 9.22 y de acuerdo con los ejes coordenados mostrados en la figura N° 9.05, se obtiene:

$$(x - 0)^2 + (y - (-R_1))^2 = R_1^2 \quad \dots 9.23$$

De forma similar para la ecuación del segundo trazo definitivo se tiene el segundo arco de circunferencia con centro en C de coordendos (x_B, y_B) , con un radio r de magnitud R_2 y con el mismo sistema de ejes coordenados se tiene la siguiente ecuación.

$$(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = R_2^2 \quad \dots 9.24$$

Los trazos auxiliares se obtienen mediante la solución del sistema de ecuaciones siguientes:

El punto B corresponde a una de las intersecciones de los círculos A_1 y A_2 cuyas ecuaciones son:

$$A_1 = (x - 0)^2 + (y - (-R_1))^2 = (R_1 - R_2)^2 \quad \dots 9.25$$

$$A_2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R_2^2 \quad \dots 9.26$$

Resolviendo ese sistema de ecuaciones, resultan dos soluciones para el punto $B(x_B, y_B)$ y la correcta es el punto que se encuentra comprendido dentro del triángulo OCA de la figura N° 9.16, la otra solución no es de interés en el trazo.

La línea AB debe pasar por los puntos A y B y está limitado por los ejes x y y y está dada por:

$$AB = \frac{y - (-R_1)}{x - 0} = \frac{y_B - (-R_1)}{x_B - 0} \quad \dots 9.27$$

Esta línea corresponde a la frontera entre los trazos definitivos de los arcos A_3 y A_4 . El punto P corresponde al cruce de la línea AB , con el arco A_3 ; es indispensable resolver el sistema de ecuaciones para obtener las coordenadas del punto $P(x_p, y_p)$.

A continuación se muestra un resumen de las ecuaciones de los trazos definitivos con sus respectivos rangos:

Curva A_3 :

$$y = \sqrt{R_1^2 - x^2} - R_1 \quad \dots 9.28$$

$$x_p \leq x \leq 0 \quad \dots 9.39$$

Curva A_4 :

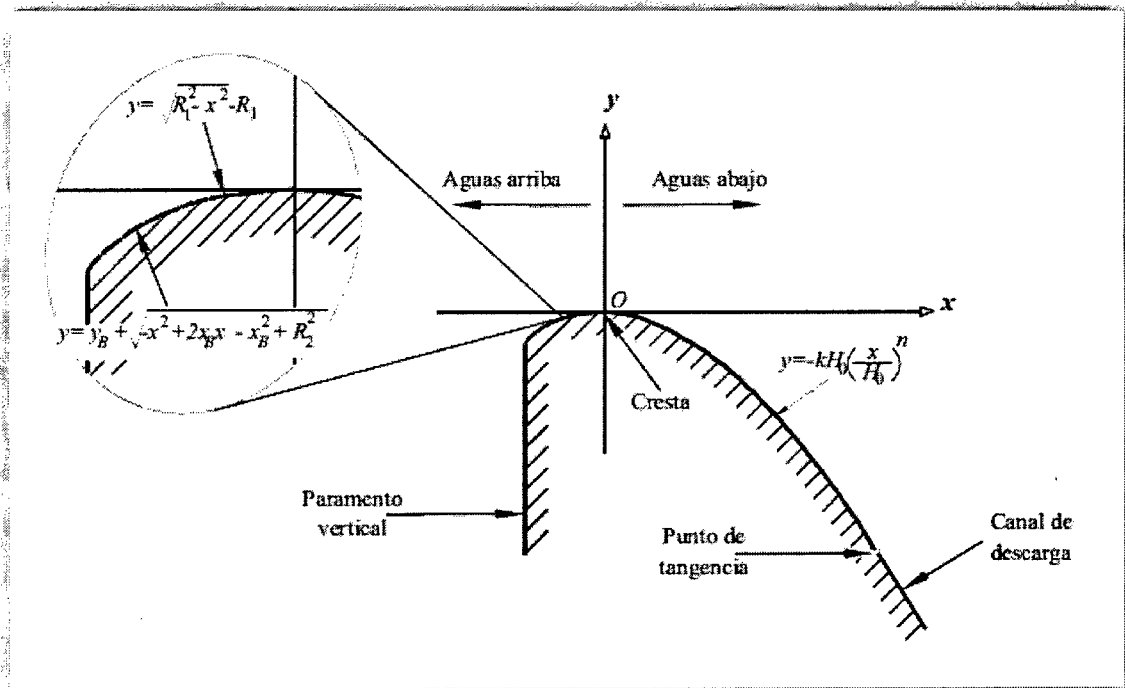
$$y = y_B + \sqrt{-x^2 + 2 * x * x_B - x_B^2 + R_1^2} \quad \dots 9.30$$

$$x_c \leq x \leq x_p \quad \dots 9.31$$

Para el criterio WES es evidente que su aplicación se restringe pero en cambio las variables que intervienen en el criterio se calculan de manera sencilla y los cálculos proporcionan una ventaja sobre el criterio USBR, por ejemplo en la ecuación del perfil del cimacio aguas abajo de la cresta la ecuación que lo define sólo depende de las variables x y y que son coordenadas que lo definen, por otro lado, donde el criterio WES no es aplicable, el criterio USBR se puede aplicar ya que éste se puede aplicar para cualquier valor de la velocidad del flujo, pero el número de los cálculos se incrementa.

Finalmente el criterio a emplear queda al juicio del ingeniero que diseñe el cimacio de acuerdo con la pericia que tenga para el diseño. En la figura N° 9.17 se muestra el perfil completo del cimacio y las ecuaciones que describen cada tramo del perfil y los puntos de mayor importancia:

Figura N° 9.17: Perfil completo de un cimacio con las ecuaciones que lo gobiernan.



10.0 DISIPACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA

10.1) ASPECTOS GENERALES

Al presentarse el agua de un río por efecto de un obstáculo interpuesto en él, como lo es una presa derivadora, sube de nivel el caudal y adquiere energía de altura. Cuando se produce una avenida y el agua alcanza mayores elevaciones, rebasa la cresta vertedora, resultando un desnivel importante entre la superficie del agua antes de la presa y el lecho del río, y que produce un incremento en la velocidad del caudal, por lo que, si no se toman las precauciones adecuadas, pueden presentarse erosiones importantes inmediatamente aguas debajo de la presa o en el cauce del río que continua.

Si esa erosión se produce inmediatamente después de la caída, puede ser “regresiva” y dejar a la presa en condiciones de inestabilidad.

Si se producen erosiones más adelante de la presa, puede llegar a cambiar la pendiente del fondo del río, y a la larga, reflejarse regresivamente hasta la presa, con el mismo resultado. También pueden producir erosiones en los taludes de las márgenes del río, en detrimento de las propiedades ribereñas o provocando desbordamiento del río.

Por lo tanto, se procura en disipar la energía adquirida, hasta alcanzar como máximo, las mismas condiciones que se tenían antes de construir la presa, con lo cual se evitan muchas dificultades y consecuencias. No es posible obtener mayor protección, porque para aguas abajo, el río va a imponer su propio modo de correr.

10.2) DISIPADORES DE ENERGÍA

Cuando el agua que pasa por el cimacio y cae del nivel del embalse al nivel del río aguas abajo, la carga estática se convierte en energía cinética. Esta energía se manifiesta en la forma de altas velocidades que si se trata de disminuirlas producen grandes presiones. Por lo tanto, generalmente deben disponerse medios que permitan descargar el agua en el río sin erosiones o socavaciones peligrosas en la presa derivadora y que no produzcan daño en las estructuras adyacentes.

Cuando no se puede tolerar la erosión, se puede hacer un estanque artificial para la formación del resalto, construyendo una presa auxiliar aguas debajo de la estructura principal o excavando un estanque que se recubra de concreto.

La disipación de energía en vertederos tipo Creager se alcanza principalmente al resalto hidráulico que se produce luego del impacto del agua en el tanque de amortiguación.

10.3) EL RESALTO HIDRÁULICO

La transición de flujo supercrítico ($F > 1$) a subcrítico ($F < 1$) se conoce como “Resalto Hidráulico” y se caracteriza por el desarrollo de turbulencia de gran escala, por ondas superficiales y por rocío, así como por la disipación de energía y entrapamiento de aire.

- Si el Número de Froude es mayor a la unidad ($F > 1$), el flujo se denomina supercrítico.
- Si el Número de Froude es igual a la unidad ($F = 1$), el flujo se denomina crítico.
- Si el Número de Froude es menor a la unidad ($F < 1$), el flujo se denomina subcrítico.

10.3.1) Resalto en canales rectangulares horizontales

Para el flujo supercrítico en un canal horizontal, la energía del flujo se disipa a través de la resistencia friccional a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo. Un resalto hidráulico se formará en el canal si el número de Froude F_1 del flujo, la profundidad de flujo y_1 y la profundidad y_2 aguas abajo satisfacen la ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8 * F_1^2}}{2} \quad \dots 10.01$$

Donde:

F_1 : Numero de Froude al pie del barraje.

y_1 : Tirante al pie del barraje.

y_2 : Tirante conjugado.

10.3.2) Tipos de resalto hidráulico

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

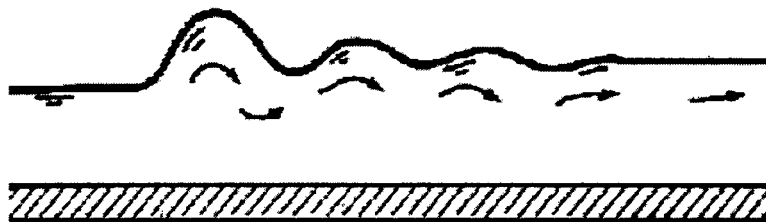
- ✓ Si $F_1 = 1$, el flujo es crítico y por consiguiente no se forma resalto.

Figura N° 10.01: $F_1 = 1$, No se forma resalto



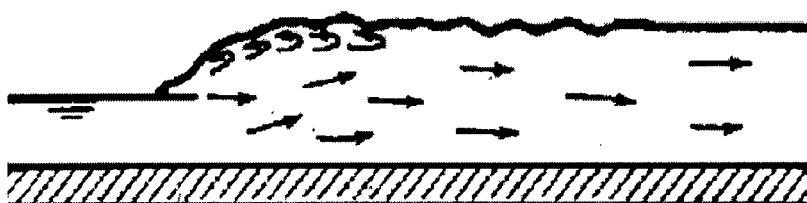
- ✓ Si $F_1 = 1$ a 1.7 , la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta el resalto ondulante.

Figura N° 10.02: $F_1 = 1$ a 1.7 , Resalto ondulante



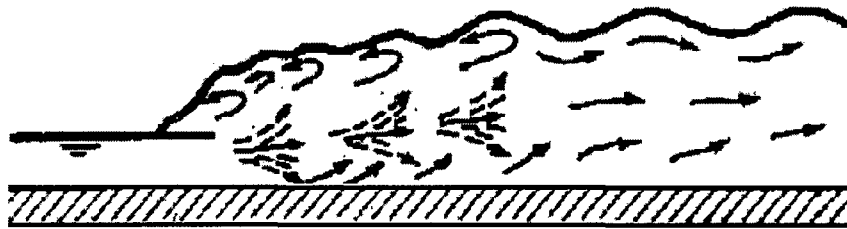
- ✓ Si $F_1 = 1.7$ a 2.5 , se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, pero la superficie del agua hacia aguas abajo permanece uniforme. La velocidad a través de la sección es razonablemente uniforme y la pérdida de energía es baja. Se presenta entonces el resalto débil.

Figura N° 10.03: $F_1 = 1.7$ a 2.5 , Resalto débil



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

Figura N° 10.04: $F_1 = 2.5$ a 4.5 , Resalto oscilante



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

Figura N° 10.05: $F_1 = 4.5$ a 9 , Resalto estable



- ✓ Si $F_1 = 9.0$ y mayores, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, generando ondas hacia aguas abajo, y puede prevalecer una superficie rugosa. La acción del resalto es brusca pero efectiva debido a que la disipación de energía puede alcanzar un 85%. Se produce entonces el resalto fuerte.

Figura N° 10.06: $F_1 = 4.5$ a 9 , Resalto fuerte



Nótese que los rangos del número de Froude dados arriba para los diferentes tipos de resalto no están claramente demarcados sino que se traslapan en cierto modo según las condiciones locales.

10.3.3) Características hidráulicas del resalto

En el movimiento permanente y uniforme del agua en cauces abiertos el paso de régimen lento al rápido se realiza de forma progresiva, sin pérdida de carga.

Pero el paso inverso de régimen rápido al lento se produce de forma brusca, con una fuerte disipación de energía, que se manifiesta por un conjunto de remolinos, previos a la elevación del calado correspondiente al régimen lento. Este efecto se conoce como “**resalto hidráulico**”.

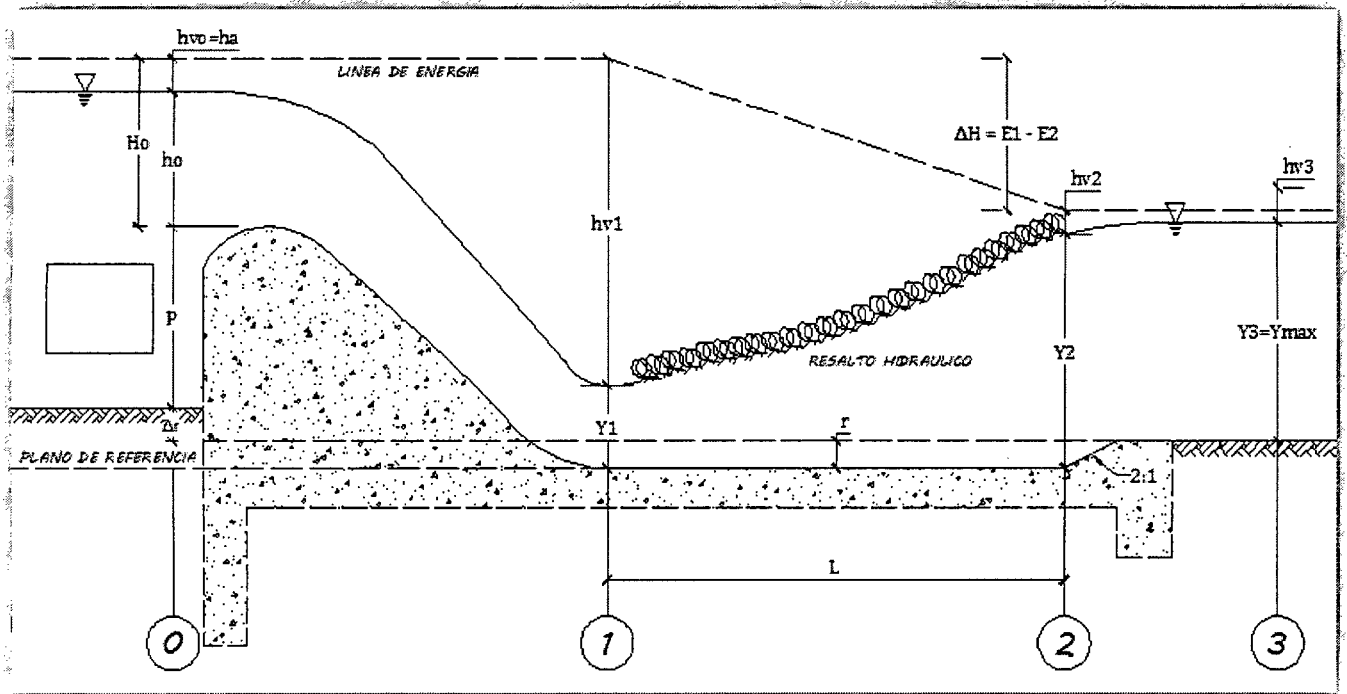
Para la obtención de los calados conjugados Y_1 (rápido) e Y_2 (lento) en este proceso, se aplica la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento (segunda ley de Newton).

$$\bar{F} = m * a \quad \dots 10.02$$

$$\bar{F} = m * \frac{d\bar{v}}{dt} \quad \dots 10.03$$

Sean dos secciones (de unidad anchura) situadas (1) aguas arriba y (2) aguas abajo de la formación del resalto hidráulico, según muestra la Figura N° 10.07.

Figura N° 10.07: Resalto hidráulico



Aplicando la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento:

$$\rho(y_1 v_1 dt) v_1 + \frac{1}{2} \gamma y_1^2 dt = \rho(y_2 v_2 dt) v_2 + \frac{1}{2} \gamma y_2^2 dt \quad \dots 10.04$$

Donde:

$$m_1 = \rho(y_1 v_1 dt) v_1 \quad \dots 10.05$$

$$F_1 = P_1 S_1 = \int_0^{y_1} y \gamma dy \quad \dots 10.06$$

$$m_2 = \rho(y_2 v_2 dt) v_2 \quad \dots 10.07$$

$$F_2 = P_2 S_2 = \int_0^{y_2} y \gamma dy \quad \dots 10.08$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad \dots 10.09$$

Operando y simplificando la ecuación N° 10.04:

$$v_1^2 y_1 + g \frac{y_1^2}{2} = v_2^2 y_2 + g \frac{y_2^2}{2} \quad \dots 10.10$$

Aplicando la ecuación de continuidad:

$$v_1 y_1 = v_2 y_2 \rightarrow v_2 = v_1 \left(\frac{y_1}{y_2} \right) \quad \dots 10.11$$

Sustituyendo la ecuación (10.11) en la ecuación (10.10):

$$v_1^2 y_1 + g \frac{y_1^2}{2} = v_1^2 \left(\frac{y_1}{y_2} \right)^2 y_2 + g \frac{y_2^2}{2}$$

$$v_1^2 \left(1 - \frac{y_1}{y_2} \right) y_1 = g \frac{1}{2} (y_2^2 - y_1^2)$$

$$v_1^2 (y_2 - y_1) \frac{y_1}{y_2} = g \frac{1}{2} (y_2 - y_1) (y_2 + y_1)$$

$$v_1^2 \frac{y_1}{y_2} = g \frac{1}{2} (y_2 + y_1)$$

$$v_1^2 = g \frac{y_2}{2y_1} \left(\frac{y_2}{y_1} + 1 \right) y_1 \quad \dots 10.12$$

$$v_1 = \sqrt{g \frac{y_2}{2y_1} \left(\frac{y_2}{y_1} + 1 \right) y_1} \quad \dots 10.13$$

El número de Froude es:

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g y_1}} \quad \dots 10.14$$

Reemplazando la ecuación N° 10.13 en 10.14, obtenemos lo siguiente:

$$F_1 = \sqrt{\frac{y_2}{2y_1} \left(\frac{y_2}{y_1} + 1 \right)} \quad \dots 10.15$$

$$2F_1^2 = \left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \frac{y_2}{y_1} \quad \dots 10.16$$

$$\left(\frac{y_2}{y_1} \right)^2 + \frac{y_2}{y_1} - 2F_1^2 = 0 \quad \dots 10.17$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2} \quad \dots 10.01$$

La ecuación N° 10.01 representa la relación de calados conjugados en el resalto hidráulico.

a) Pérdidas de energía: ΔH

En el resalto la pérdida de energía es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto. Para la determinación del valor del resalto hidráulico ΔH se aplica la ecuación de Bernoulli entre las dos secciones (1) y (2) de la Figura N° 10.07.

$$y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \quad \dots 10.18$$

$$\Delta H = (y_1 - y_2) + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \quad \dots 10.19$$

Introduciendo la ecuación de continuidad (10.11) en la ecuación (10.19):

$$\Delta H = (y_1 - y_2) + \frac{v_1^2}{2g} \left(1 - \frac{y_1^2}{y_2^2} \right) \quad \dots 10.20$$

Considerando el valor de v_1 (ecuación N° 10.13) en la ecuación anterior (10.20):

$$\Delta H = (y_1 - y_2) + g \frac{y_2}{2y_1} \left(\frac{y_2}{y_1} + 1 \right) y_1 \left(1 - \frac{y_1^2}{y_2^2} \right) \frac{1}{2g} \quad \dots 10.21$$

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad \dots 10.22$$

b) Eficiencia

La relación entre la energía específica antes y después del resalto se define como la eficiencia del resalto, y depende solo del número de Froude:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad \dots 10.23$$

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

c) Altura del resalto

La diferencia entre las profundidades antes y después del resalto, es la altura del resalto:

$$h_j = y_2 - y_1 \quad \dots 10.24$$

10.3.4) Longitud del resalto

La longitud del resalto hidráulico (L) se define como la distancia entre la cara frontal del inicio del resalto, hasta un punto inmediato donde finaliza. Esta longitud se ha determinado en forma experimental, en base a las alturas, antes y después del resalto. De todos los datos experimentales sobre la longitud del resalto, la curva F_1 versus L/y_2 es la más conveniente debido a que la curva resultante muestra la regularidad de una parte plana para el rango de los resaltos bien establecidos. En la Figura N° 10.08 se muestra una curva F_1 versus L/y_2 basada en los datos experimentales de seis canaletas de prueba realizadas por la USBR, para canales rectangulares.

Adicionalmente se pueden utilizar las siguientes ecuaciones para calcular la longitud del Resalto:

$$USBR - 1: \quad L = 9.75 * y_1 (F_1 - 1)^{1.01} \quad \dots 10.25$$

$$USBR - 2: \quad L = y_2 (3.491 + 0.73F_1 - 0.06F_1^2 + 0.001441F_1^3) \quad \dots 10.26$$

$$Pavloski: \quad L = 2.5 * (1.4 * y_2 - y_1) \quad \dots 10.27$$

$$Safranetz: \quad L = 5.9 * y_1 * F_1 \quad \dots 10.28$$

$$Baklmnetev - Martzke: L = 5 * (y_2 - y_1) \quad \dots 10.29$$

$$Smetana: \quad L = 6 * (y_2 - y_1) \quad \dots 10.30$$

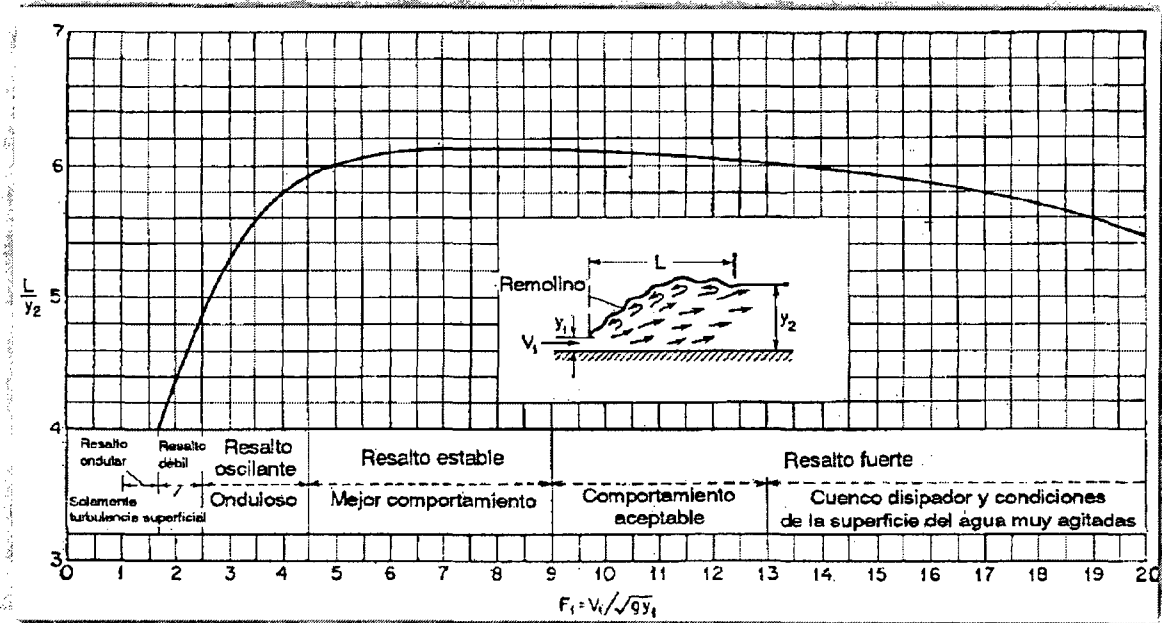
$$Einwachter: \quad L = 8.3 * y_1 * (F_1 - 1) \quad \dots 10.31$$

$$Wóycicki: \quad L = (y_2 - y_1) \left(8 - 0.05 * \frac{y_2}{y_1} \right) \quad \dots 10.32$$

$$Chertusov: \quad L = 10.3 * y_1 * (F_1 - 1)^{0.81} \quad \dots 10.33$$

$$Sieñchin: \quad L = 10.6 * (y_2 - y_1) \quad \dots 10.34$$

Figura N° 10.08: Longitud de Resalto en términos de profundidad secuente y2 en canales horizontales según la USBR



10.4) EL RESALTO HIDRÁULICO COMO DISIPADOR DE ENERGÍA

Para un flujo supercrítico en una canal rectangular horizontal, la energía del flujo se disipa a través de la resistencia friccional a lo largo del canal, dando como resultado un descenso en la velocidad y un incremento en la profundidad en la dirección del flujo. Un resalto hidráulico se formará en el canal si el número de Froude F_1 del flujo, la profundidad de flujo y_1 y la profundidad y_2 aguas abajo satisfacen la ecuación:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8F_1^2}}{2} \quad \dots 10.01$$

Desde un punto de vista práctico, el resalto hidráulico es un medio útil para disipar el exceso de energía en un flujo supercrítico. Su mérito está en prevenir la posible erosión aguas abajo de presas derivadoras y compuertas deslizantes, debido a que reduce rápidamente la velocidad del flujo sobre un piso protegido hasta un punto donde el flujo pierde su capacidad de socavar el lecho del canal natural aguas abajo.

El resalto hidráulico utilizado para la disipación de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de

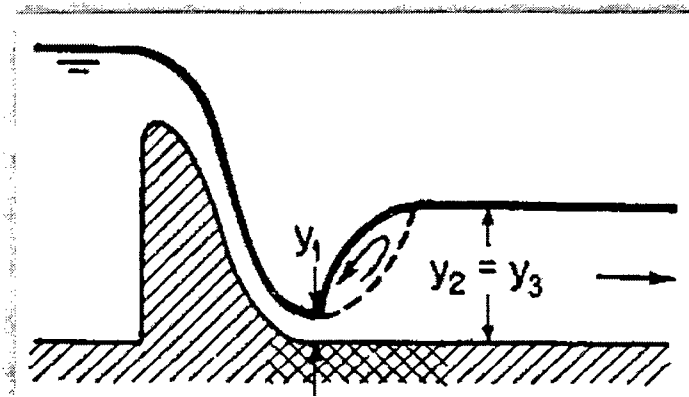
disipación o cuenco de quietamiento, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación.

En la práctica, el cuenco disipador rara vez se diseña para confinar toda la longitud de un resalto hidráulico libre sobre la zona revestida, debido a que sería muy costoso. En consecuencia, a menudo se instalan accesorios para controlar el resalto dentro del cuenco. El principal propósito de este control es acortar el rango dentro del cual el resalto ocurrirá y por consiguiente reducir el tamaño y el costo del cuenco disipador.

En el diseño de un cuenco disipador con un resalto hidráulico como disipador de energía, debe considerarse la posición del resalto, para esto existen tres modelos alternativos que permiten que un resalto se forme aguas abajo de una fuente (tal fuente puede ser una presa derivadora, compuerta deslizante).

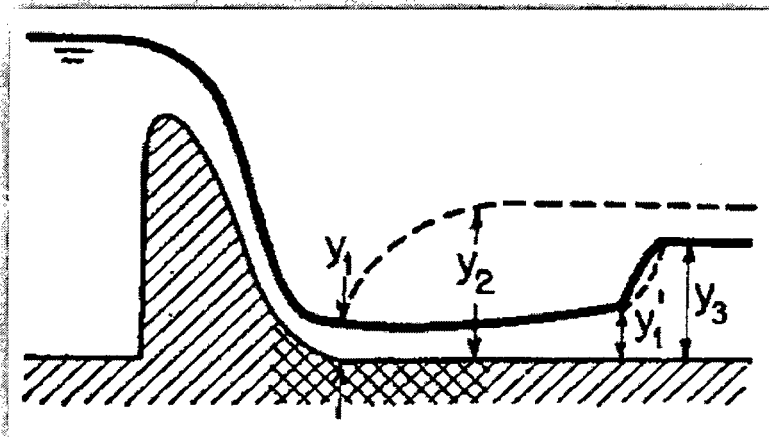
Caso 1: El caso 1 representa el modelo para el cual la profundidad de aguas abajo y_3 es igual a la profundidad y_2 seciente a y_1 . En este caso los valores de F_1 , y_1 y y_2 ($= y_3$) satisfacen la ecuación N° 10.01 y el resalto ocurrirá sobre un piso sólido inmediatamente adelante de la profundidad y_1 . Para propósitos de protección contra la socavación, éste es un caso ideal. Una objeción importante a este modelo, sin embargo, es que una pequeña diferencia entre los valores reales y supuestos de los coeficientes hidráulicos relevantes puede causar que el resalto se mueva hacia aguas abajo desde su posición estimada. En consecuencia, siempre es necesario algún dispositivo para controlar su posición.

Figura N° 10.09: Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 1). “Resalto Hidráulico Normal”.



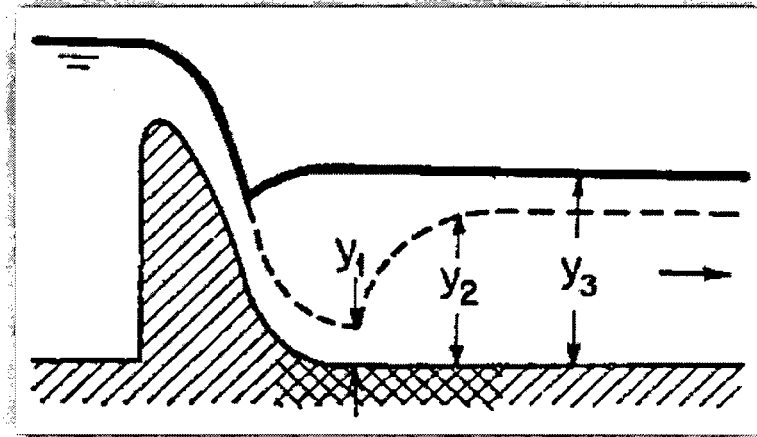
Caso 2: El caso 2 representa el patrón para el cual la profundidad de salida y_3 es menor que y_2 . Esto significa que la profundidad de salida del caso 1 se disminuye. Como resultado, el resalto se desplazará hacia aguas abajo hasta un punto donde se satisfaga nuevamente la ecuación N° 10.01. En lo posible, este caso debe evitarse en el diseño, debido a que el resalto es rechazado fuera de la zona resistente a la socavación dando como resultado una erosión. La solución para el diseño es utilizar cierto control en el fondo del canal, el cual incrementará la profundidad de agua a la salida y asegurará un resalto dentro de la zona protegida.

Figura N° 10.10: Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 2). “Resalto Hidráulico Desplazado”.



Caso 3: El caso 3 representa un modelo en el cual la profundidad de salida y_3 es mayor que y_2 . Esto significa que la profundidad de salida con respecto al caso 1 se incrementa. Como resultado, el resalto se verá forzado hacia aguas arriba, y finalmente puede ahogarse en la fuente y convertirse en un resalto sumergido. Éste tal vez es el caso más seguro para el diseño, debido a que la posición del resalto sumergido puede fijarse con rapidez. Infortunadamente el diseño no es eficiente, debido a que se disipará muy poca energía.

Figura N° 10.11: Disipador por Resalto Hidráulico (Caso 3). “Resalto Hidráulico Sumergido”.



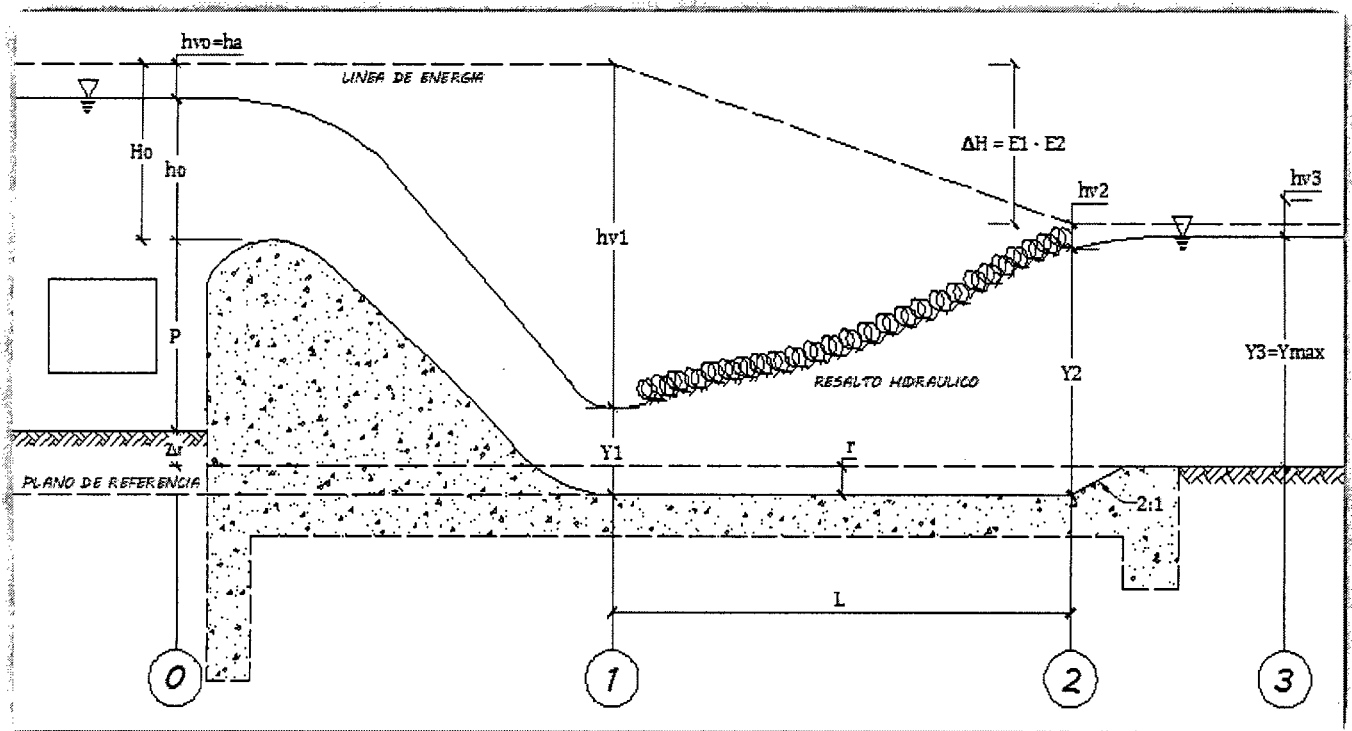
10.5) TIPOS DE DISIPADORES DE ENERGÍA

10.5.1) Tanques amortiguadores

El tanque de amortiguación es el sistema más común de disipación de energía que convierte el flujo supercrítico del vertedero en un flujo subcrítico compatible con el régimen de río aguas abajo. El método para lograr esta transición del flujo consiste en un simple resalto sumergido (caso 3, ítem 10.4), formado en un tanque de amortiguación de sección transversal rectangular. Pueden producirse variando la altura que cae el agua del vertedero, o cambiando el ancho al pie de la estructura vertedora.

En el caso de las presas derivadoras se hace difícil el aumento en el ancho, ya que por un lado se encuentra el canal de limpia, y por el otro lado la margen del río, la cual está dimensionada para un ancho estable, o de acuerdo a las condiciones topográficas del lugar. Por esta razón es necesario aumentar solo la profundidad en el tanque amortiguador (r).

Figura N° 10.12: Disipador de energía tipo tanque amortiguador



- a) **Profundidad de la poza de disipación de energía (r):** En la figura anterior aplicamos Bernoulli entre las secciones 0 y 1, entonces obtendremos la siguiente relación:

$$r + \Delta r + P + h_0 + \frac{V_0^2}{2g} = Y_1 + h_{v1} \quad \dots 10.35$$

Donde:

r : Profundidad de la poza de disipación de energía, en m.

P : Altura del barraje vertedor, en m.

h_0 : Carga de agua sobre barraje, en m.

Y_1 : Tirante contraído del resalto, en m.

h_{v1} : Altura de velocidad en la sección 1, en m.

Δr : Diferencia de altura entre la sección de entrada y salida.

Bernoulli entre las secciones 2 y 3:

$$Y_2 + h_{v2} = r + Y_3 + h_{v3} \quad \dots 10.36$$

Donde:

Y_2 : Tirante conjugado, en m.

Y_3 : Tirante del río para un caudal máximo instantáneo, en m.

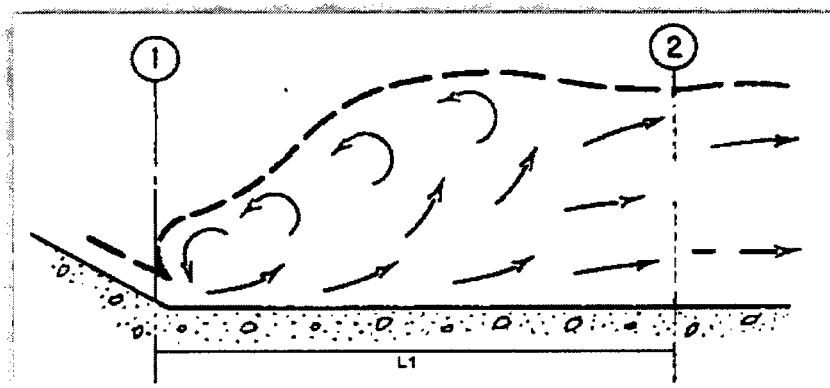
10.5.2) Estructuras del U.S. Bureau of Reclamation (USBR)

a) Cuenco disipador tipo I (Resalto Hidráulico en Plataformas Horizontales)

- ✓ *Cuencos para número de Froude ≤ 1.7* : El calado conjugado es aproximadamente el doble que el de entrada o alrededor del 40% mayor que el crítico. La velocidad de salida, v_2 es aproximadamente la mitad de la velocidad de entrada o 30% menor que la velocidad crítica. Si F_1 es menor que 1.7 no es necesario ningún dispositivo excepto que la longitud del canal, a partir del punto en que empieza a cambiar el calado, debe ser por lo menos $4d_2$. No son necesarios dados de impacto ni ningún otro elemento de amortiguación.
- ✓ *Cuencos para números de Froude comprendidos entre 1.7 y 2.5*: El comportamiento del caudal está representado en la figura N° 10.03. puesto que la corriente no es muy turbulenta, no son necesarios dados ni umbrales. El cuenco deberá ser suficientemente largo para contener el caudal mientras dura el proceso de desaceleración.

La longitud del resalto hidráulico puede ser calculada haciendo uso la figura N° 10.08. Un método alternativo para la determinación de la longitud del resalto hidráulico es el uso de la las ecuaciones N° 10.25 a 10.34.

Figura N° 10.13: Cuenco disipador tipo I



b) Cuenco disipador tipo IV (Cuencos disipadores para estructuras de canal y descargas)

- ✓ *Cuencos para números de Froude comprendidos entre 2.5 y 4.5:*
Cuando el número de Froude está comprendido entre 2.5 y 4.5 no se produce un verdadero resalto hidráulico y la corriente se llama entonces resalto oscilante, tal como se muestra en la figura N° 10.4. Los cuencos que deben construirse para este tipo de corriente no son muy efectivos para asegurar la amortiguación, ya que los dispositivos ordinarios no pueden controlar el oleaje superficial. Las olas que se producen se propagan más allá del extremo del cuenco y es necesario amortiguadores con otros medios.

La figura N° 10.14 representa el cuenco tipo IV, que ha demostrado ser el más eficiente, cuando el número de Froude está en este intervalo, para disipar la mayor parte de la energía. Algunas veces es necesario emplear amortiguadores de ondas para asegurar una corriente tranquila aguas abajo.

Figura N° 10.14: Dimensiones del cuenco tipo IV USBR

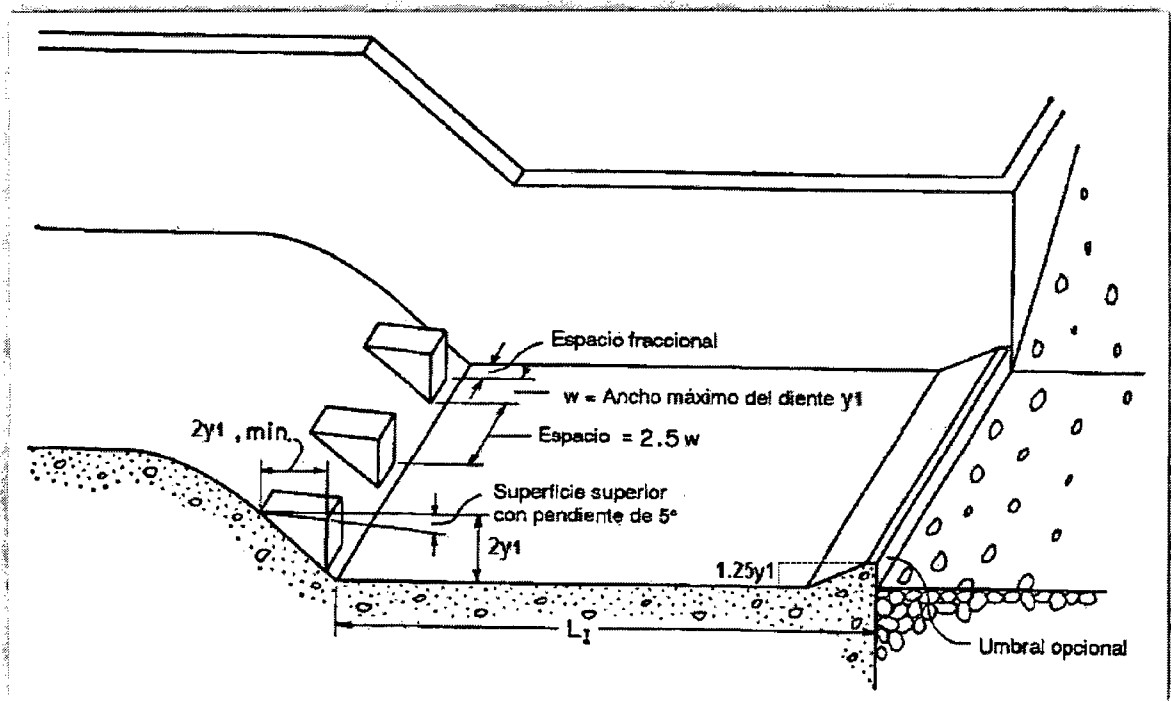
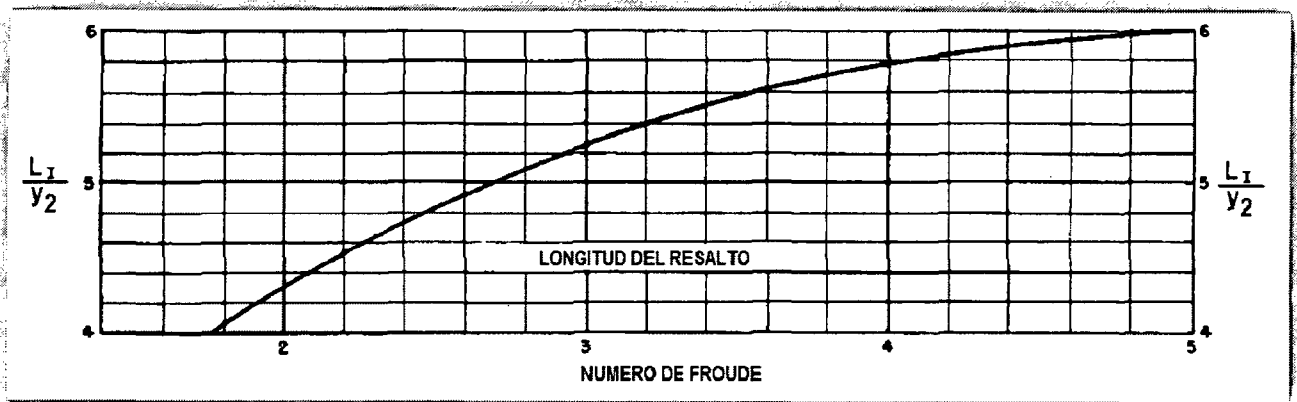


Figura N° 10.15: Longitud del resalto hidráulico para cuenco tipo IV



c) Cuenco dissipador tipo III (Cuenco Corto para Estructuras en Canales para Pequeñas Descargas y Pequeños Vertederos)

- ✓ *Cuencos de número de Froude mayor que 4.5, y velocidad < 18m/s:*
En estos cuencos se forma un verdadero resalto hidráulico. Los elementos del resalto varían con el número de Froude, como muestra la figura N° 10.05 y 10.06. La instalación de dispositivos accesorios, tales como dados, bloques y umbrales a lo largo del cuenco, produce en el resalto un efecto estabilizador, que permite reducir su longitud y crear un factor de seguridad contra vertidos causados por un calado inadecuado aguas abajo.

En la figura N° 10.16 se representa el cuenco tipo III, que puede adoptarse si la velocidad de entrada no sobrepasa los 18m/s. El tipo III de cuenco amortiguador utiliza dientes, bloques de impacto y umbral de salida continuo, para disminuir la longitud del resalto y disipar el caudal a alta velocidad en la longitud reducida del cuenco. Este cuenco actúa disipando la energía en los bloques de impacto y también mediante la turbulencia propia del resalto. Su uso debe limitarse a velocidades no superiores a 18m/s, ya que existe el peligro de destrucción de los bloques, debido a los esfuerzos de impacto si la velocidad es demasiada alta, así como la posibilidad de que aparezcan fenómenos de cavitación en los bloques o en la solera.

Figura N° 10.16: Dimensiones del cuenco tipo III USBR

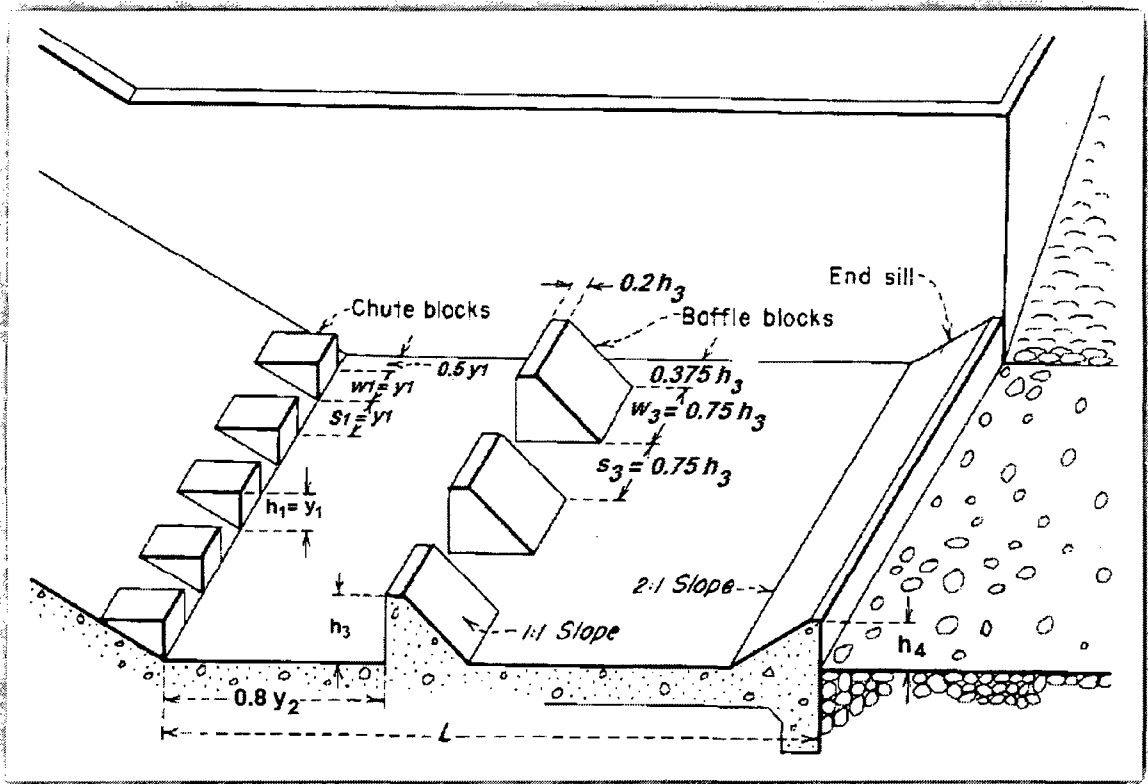


Figura N° 10.17: Altura de los bloques de impacto y del umbral

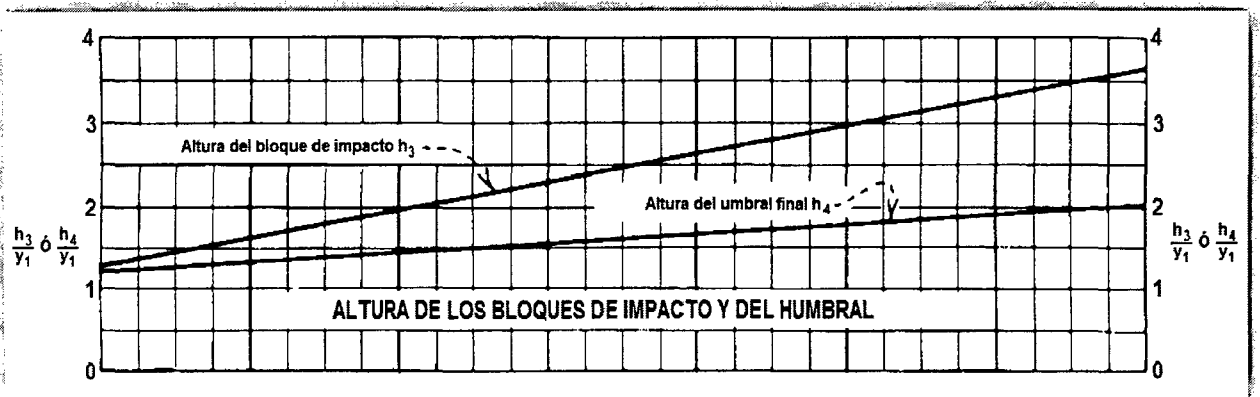
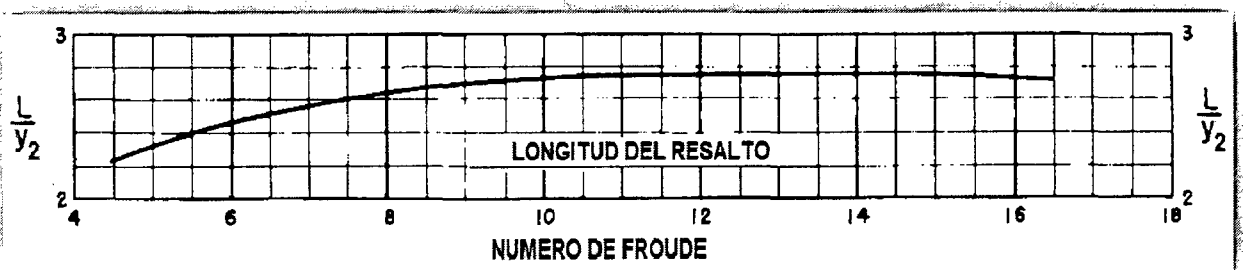


Figura N° 10.18: Longitud del resalto USBR tipo III



- ✓ *Cuencos de número de Froude mayor que 4.5, y velocidad $\geq 18\text{m/s}$:
El cuenco tipo II (figura N° 10.20) se emplea cuando la velocidad de llegada es mayor de 18m/s y cuando no se emplean bloques de impacto. Su longitud es mayor que la del tipo III porque la disipación de energía se debe fundamentalmente al resalto hidráulico. Sin embargo, los dados en el inicio del cuenco y el umbral final dentado todavía son eficaces para reducir la longitud. Teniendo en cuenta el reducido margen de seguridad contra la posibilidad de que el resalto salga fuera del cuenco, la profundidad del agua en él deberá tomarse aproximadamente un 5% mayor que el calado conjugado.*

Figura N° 10.19: Longitud del resalto USBR tipo II

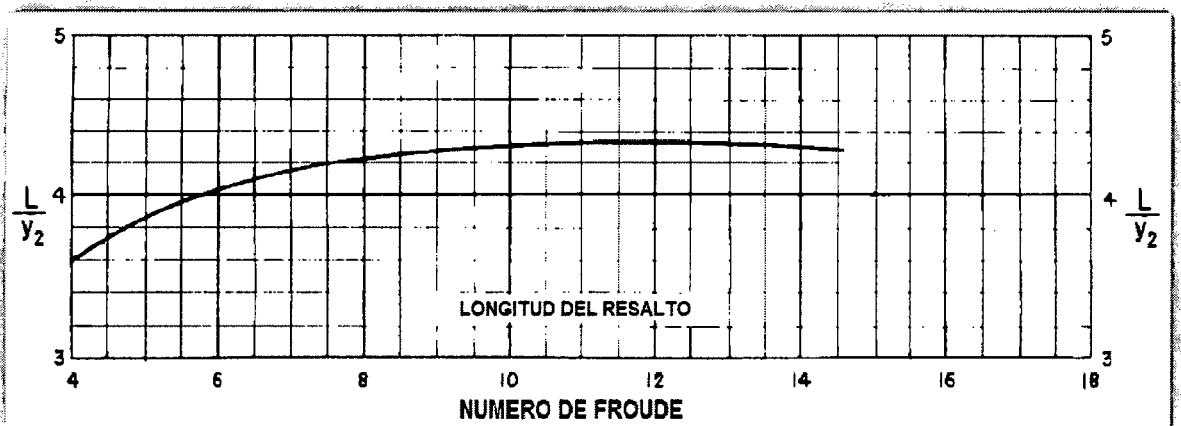
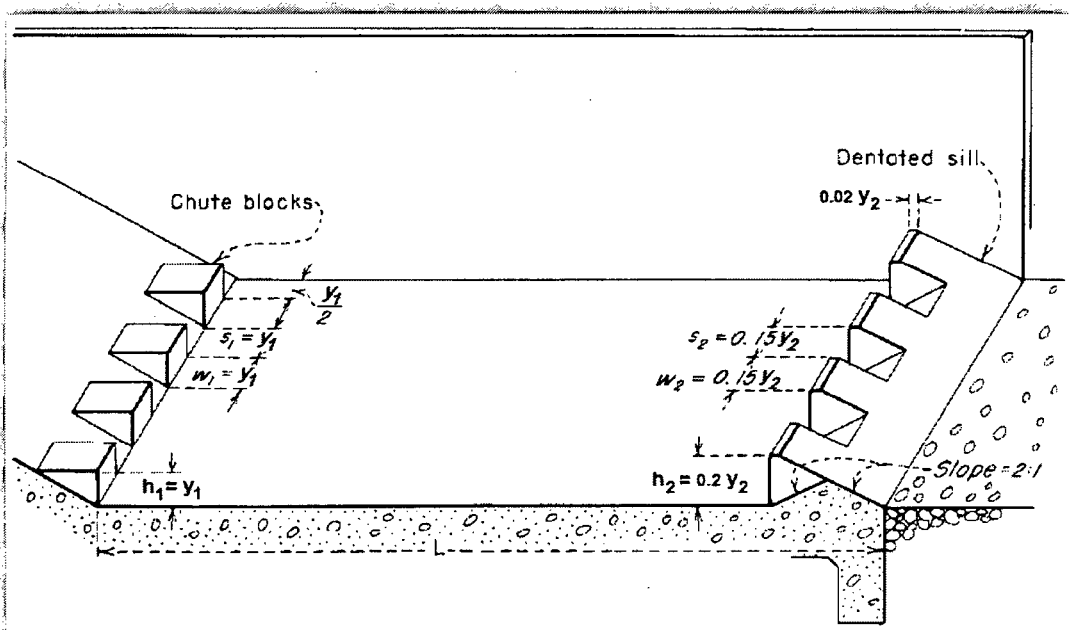


Figura N° 10.20: Dimensiones del cuenco tipo II USBR



11.0 MOVIMIENTO DEL AGUA BAJO LA PRESA

11.1) ASPECTOS GENERALES

En los capítulos anteriores se ha determinado las dimensiones de la parte externa de la presa derivadora, llámese el perfil del cimacio, el dissipador de energía, etc. En este capítulo definiremos el perfil de la presa que estará en contacto con el terreno de fundación. Así como de los dispositivos de seguridad que darán estabilidad y sostenibilidad a la presa.

11.2) ECUACIÓN DE DARCY EN MEDIOS POROSOS

Henry Darcy en 1856 formuló la ley fundamental que describe el movimiento del agua de la zona saturada a través del suelo.

Las velocidades del agua en el régimen laminar son muy pequeñas, para el cálculo de las pérdidas de carga o del gasto de filtración a través de medios porosos, se emplea la ecuación de Darcy.

$$Q = k * i * A \quad \dots 11.01$$

Donde:

Q : Gasto de agua de filtración, en m³/s.

k : Coeficiente de permeabilidad del material de cimentación, en m/s.

i : Gradiente hidráulico.

A : Área bruta de la cimentación a través de la cual se produce filtración, en m².

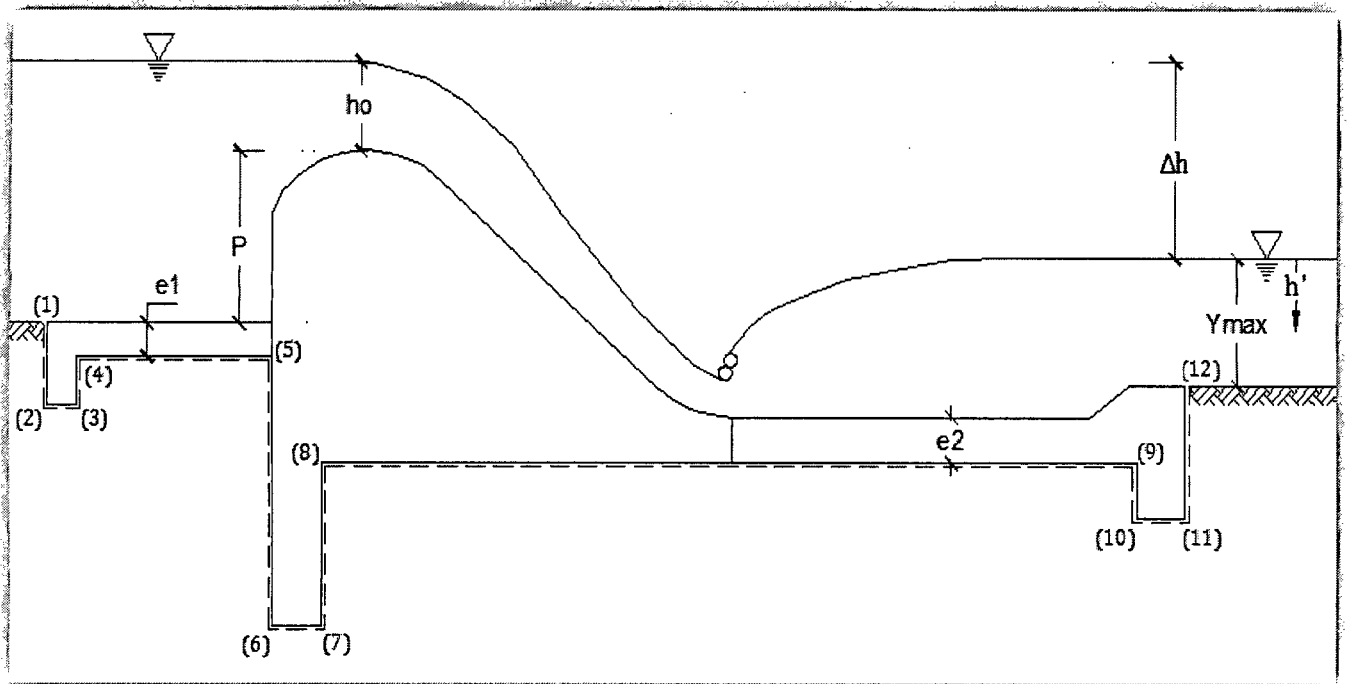
$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad \dots 11.02$$

Donde:

Δh : Diferencia máxima del nivel de la superficie aguas arriba y aguas abajo, en m.

L : Longitud de recorrido de filtración, en m.

Figura N° 11.01: Filtración en presa derivadora.



Cuando la velocidad en un medio poroso aumenta grandemente, deja de tener validez la ley de Darcy.

Los valores de "k" varían generalmente de 10^2 a 10^{-10} , uno de los mayores valores se presenta en las arenas gruesas, en cambio las arcillas tienen coeficientes muy pequeños, o sea que poseen gran impermeabilidad. El proyecto de presas derivadoras se basa en el estudio del régimen laminar.

11.3) DIMENSIONAMIENTO DE DENTELLONES

Los dentellones deben tener suficiente longitud, de tal forma prolongar el camino de la filtración, de tal forma que la mayor parte de la carga de presión del agua sea agotada por la resistencia del suelo de la fundación en el camino desde aguas arriba hacia aguas abajo. La prolongación o desarrollo del contorno subterráneo de la presa busca alargar las líneas de corriente, disminuir velocidades de filtración y evitar el peligro de erosión.

- Construir aguas arriba de la estructura banquetas impermeables. Su longitud aproximada está definida de la siguiente forma:

$$L_1 = \text{Hasta } 6 * \Delta h \quad \dots 11.07$$

11.4) EVALUACION DEL MOVIMIENTO DE AGUA BAJO LAS PRESAS

Los suelos que sirven de fundación a obras hidráulicas son permeables en la mayoría de los casos, pues solamente suelos rocosos y arcillas compactas pueden ser considerados impermeables.

La mayoría de las presas derivadoras están cimentadas sobre mantos permeables que constituyen el lecho del río (cantos rodados, grava, arenas, arcillas, etc.). Las presas derivadoras por lo general son de poca altura originando esfuerzos reducidos en la cimentación, que pueden ser tomados por los materiales del lecho del río, por lo que no es necesario desplantarla hasta encontrar roca sana.

Normalmente los azudes se construyen sobre suelos permeables y la sobre elevación del agua en el paramento superior produce filtración debajo de la presa. Es indispensable que la cantidad de agua que se filtra no sea excesiva, que la velocidad de salida sea pequeña para que no se produzca la "tubificación" y que la supresión que actúa sobre el zampeado no llegue a levantarlo ni a resquebrajarlo.

Estos resultados se consiguen alargando el recorrido del agua debajo del azud para disminuir el gradiente hidráulico. Con este objeto se puede aumentar la longitud del zampeado, revestir el río aguas arriba del azud o poner pantallas impermeables verticales (dentellones) debajo de las fundaciones. Normalmente se hacen las tres cosas. Otra posibilidad es, en vez de disminuir la velocidad, hacerla inofensiva por medio de filtros y proveer al zampeado de drenes para disminuir la subpresión.

Por lo tanto en el cálculo de azudes uno de los primeros problemas que hay que resolver es la longitud necesaria y el espesor del zampeado para que la estructura funcione satisfactoriamente. Para el análisis del recorrido de filtración y supresiones en presas derivadoras, se han adoptado tres

procedimientos empíricos que llevan el nombre de sus autores y son: El método de E.W. Lane, Bligh, y el de Kamov.

11.4.1) Método de Bligh

Se asume que el gradiente hidráulico de las aguas subterráneas es constante a lo largo de todo el contorno de la fundación. En el método de Bligh se desarrolla la longitud total L de la fundación a lo largo de una recta y se dibuja la variación lineal de la presión de desde Δh hasta 0. La longitud L_t es igual a 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12, tal como se muestra en la figura N° 11.01.

Aplicando la ecuación N° 11.01 de Darcy se obtiene:

$$v = k * \frac{\Delta h}{L_t} \quad \dots 11.08$$

Siendo v la velocidad de flujo subterráneo y k el coeficiente de permeabilidad del suelo.

Una excesiva velocidad arrastraría las partículas del suelo socavando la fundación y ocasionando con el tiempo el colapso de la estructura. Este fenómeno se conoce con el nombre de "tubificación" o a veces "sifonamiento".

Para la aplicación del método de Bligh debe cumplirse siempre la condición siguiente:

$$L_t = L_{1-2} + L_{2-3} + \dots + L_{10-11} + L_{11-12} \geq C * \Delta h \quad \dots 11.09$$

El coeficiente C depende de la clase de terreno y de la fórmula empleada, ha sido obtenida experimentalmente por varios autores, tabla N° 11.01.

El fin buscado por el método de Bligh no es impedir la filtración sino alargar el recorrido de agua lo suficiente para conseguir una velocidad inofensiva.

Cumplida esta condición se calcula el espesor del zampeado tomando en cuenta que su peso debe ser mayor que la subpresión para que esta no la pueda levantar y agrietar.

Tabla N° 11.01: Coeficiente de Bligh

| <i>MATERIAL</i> | <i>VALORES DE C</i> |
|-----------------------------------|---------------------|
| <i>Arenas finas y limos</i> | <i>15-18</i> |
| <i>Arenas comunes</i> | <i>9-12</i> |
| <i>Canto rodado grava y arena</i> | <i>4-9</i> |
| <i>Suelos arcillosos</i> | <i>6-7</i> |

Si se tiene dentellones al comienzo y al final de la fundación tal como se muestra en la figura N° 11.01, el agua sigue la trayectoria 7-8-9-10 siempre y cuando la distancia 8-9 sea por lo menos dos veces más que la suma de las profundidades 7-8 y 9-10.

Si el valor de 8-9 disminuye, entonces la trayectoria del agua pasa a ser 7-10 con la consecuencia del aumento del gradiente hidráulico y de la velocidad.

O sea que si se tiene dos filas de dentellones y se clava entre ellas una tercera fila, se puede llegar al resultado contradictorio y paradójico de aumentar la velocidad en vez de disminuirla.

La supresión por el método de Bligh en cada uno de los puntos de control de la presa derivadora, se determina de la siguiente manera:

$$S_p = c' * \gamma_a * \left(\Delta h + h' - \frac{L_x}{L_t} * \Delta h \right) \quad \dots 11.10$$

Donde:

S_p : Supresión en un punto calculado, en kg/m².

γ_a : Peso específico del agua, en kg/m³.

c' : Factor de subpresión que depende del terreno, varía entre 0 y 1.

Δh : Carga efectiva que produce la filtración, igual a la diferencia del nivel hidrostático entre aguas arriba y aguas debajo de la cresta, en m.

h' : Desnivel entre el agua abajo del azud y el punto en estudio.

L_x : Longitud de filtración hasta el punto deseado, en m.

L_t : Longitud compensada total del paso de filtración, en m.

11.4.2) Método de Lane

El método de Bligh asume que la permeabilidad del suelo es igual en el sentido vertical y horizontal. En realidad muy rara vez esto es así. Los suelos sedimentarios se forman por depósitos sucesivos de diferentes materiales y

generalmente consisten de capas horizontales de diferente espesor y diferente permeabilidad.

En 1922 Pavlovski demostró teórica y experimentalmente que la permeabilidad vertical y horizontal no son las mismas. Según Pavlovski en la filtración vertical se disipa de 1.5 a 2 veces más de energía y en ciertos casos este valor puede llegar a 6. Estos datos fueron comprobados en 1925 por Terzaghi.

Basándose en eso y en el examen de 336 presas Lane propuso en 1935 el valor de 3, es decir la siguiente relación:

$$L_t = \frac{1}{3} * \sum L_H + \sum L_V \geq C * \Delta h \quad \dots 11.11$$

Donde:

C : Coeficiente propuesto por Lane y que depende del terreno de fundación, tabla N° 11.02.

$\sum L_V$: Sumatoria de longitudes de contacto vertical o que hacen un ángulo mayor de 45° con la horizontal.

$\sum L_H$: Sumatoria de longitudes de contacto horizontal o que hacen un ángulo menor de 45° con la horizontal.

$$\sum L_V = L_{1-2} + L_{3-4} + L_{5-6} + L_{7-8} + L_{9-10} + L_{11-12} \quad \dots 11.12$$

$$\sum L_H = L_{2-3} + L_{4-5} + L_{6-7} + L_{8-9} + L_{10-11} \quad \dots 11.13$$

Tabla N° 11.02: Coeficiente de Lane

| <i>MATERIAL</i> | <i>VALORES DE C</i> |
|-----------------------------------|---------------------|
| <i>Arenas finas y limos</i> | <i>7-8-5</i> |
| <i>Arenas comunes</i> | <i>5-6</i> |
| <i>Canto rodado grava y arena</i> | <i>2-5-4</i> |
| <i>Suelos arcillosos</i> | <i>1-6-3</i> |

Aplicando el método de Lane, la supresión sobre la estructura queda definida de la forma siguiente:

$$S_p = c' * \gamma_a * \left(\Delta h + h' - \frac{L_x}{L_t} * \Delta h \right) \quad \dots 11.14$$

Donde:

L_t : Longitud compensada total del paso de filtración, ecuación N° 11.11.

L_x : Longitud de filtración hasta el punto deseado, en m.

$$L_x = \frac{1}{3} * \sum L_{Hx} + \sum L_{Vx} \quad \dots 11.15$$

11.4.3) Método de Kamov

De acuerdo a este método la longitud de recorrido de la filtración está dada de la siguiente manera:

$$L = \sum L_H + k * \sum L_V \geq C * \Delta h \quad \dots 11.16$$

Siendo C el coeficiente que depende del tipo de material del terreno de fundación, k coeficiente que depende del número de dentellones de la presa derivadora.

$k = 1.5$ Para un dentellón.

$k = 2.5$ Para dos dentellones.

$k = 3.5$ Para tres dentellones.

Tabla N° 11.03: Coeficiente de Kamov

| <i>MATERIAL</i> | <i>VALORES DE C</i> |
|-----------------------------------|---------------------|
| <i>Arenas finas y limos</i> | <i>8-10</i> |
| <i>Arenas comunes</i> | <i>6-7</i> |
| <i>Canto rodado grava y arena</i> | <i>3-6</i> |
| <i>Suelos arcillosos</i> | <i>3-6</i> |

11.5) DEFINICIÓN DEL ESPESOR DEL SOLADO

El espesor del solado de la poza de disipación de energía está en función de la supresión que debe ser contrarrestada por el peso de la losa para que esta no pueda levantarla o agrietarla, es decir:

$$w \geq S_p \quad \dots 11.17$$

Donde: w , el peso y S_p , supresión.

O también:

$$\gamma_c * A * e = \gamma_a * A * h \quad \dots 11.18$$

Donde:

γ_c : Peso específico del concreto, en kg/m³.

A : Área de control, en m².

e : Espesor de solado, en m.

γ_a : Peso específico del agua, en kg/m³.

h : Carga hidrostática, en m.

Simplificando la ecuación N° 11.18:

$$e = \frac{\gamma_a * h}{\gamma_c} \quad \dots 11.19$$

La ecuación N° 11.19 se debe corregir por tratarse de un suelo saturado.

$$e = \frac{\gamma_a * h}{\gamma_c - \gamma_a} \quad \dots 11.20$$

$$h = S_p - S' \quad \dots 11.21$$

Donde:

S_p : Subpresión en el punto considerado, ecuación N° 11.10

S' : Presión en el punto considerado ($\gamma_a * h'$).

El espesor del solado dado en la ecuación anterior debe ser corregido por seguridad, entonces se tiene así:

$$e = \frac{4}{3} * \frac{\gamma_a * \left(\Delta h + h' - \frac{L_x}{L_t} * \Delta h \right) - \gamma_a * h'}{\gamma_c - \gamma_a} \quad \dots 11.22$$

$$e \geq 0.40m$$

Al comienzo del zampeado el espesor debe ser suficiente para resistir el impacto del agua que baja desde el azud. De acuerdo a Taraimovich, este valor está dado por:

$$e = 0.2 * \sqrt{\frac{Q_{max}}{L_p}} * \Delta h^{0.25} \quad \dots 11.23$$

Donde:

Q_{max} : Caudal máximo instantáneo, en m³/s.

L_p : Longitud total de la cresta, en m.

11.6) PROTECCIÓN AL FINAL DE LA ESTRUCTURA

Al final del dissipador de energía frecuentemente se presenta la erosión del fondo que puede ser peligrosa si el dissipador no dispone de una protección para evitar la socavación.

Entre las causas para la erosión tenemos principalmente los siguientes:

- La corriente tiene una alta capacidad de arrastre de sedimentos debido a su gran energía u desarrollada turbulencia como también por haber depositado aguas arriba del azud buena parte de los sedimentos que llevaba.
- El paso del agua de la sección lisa del zampeado al cauce natural con una rugosidad mucho mayor, produce remolinos especialmente cerca de las orillas, que remueven el material del fondo.

Como consecuencia y con el paso de sucesivas crecientes a continuación del dissipador de energía, el agua profundiza el cauce.

Dependiendo del gradiente hidráulico del río esta profundización puede reducir la velocidad en este sitio, deteniendo con el tiempo la erosión o por el contrario la excavación puede prolongarse hacia aguas abajo, degradando el fondo del río formando un salto a continuación del dissipador e intensificando progresivamente el fenómeno.

Para evitar esto último, conviene construir inmediatamente después del dissipador de energía una protección o escollera.

11.6.1) Profundidad de escollera o enrocado

Para asegurar la estabilidad del dissipador, conviene construir una escollera al final del mismo. La profundidad de esta escollera debe ser mayor que la profundidad de la socavación producida por la erosión.

Bale aclarar que la profundidad del dentellón al final del dissipador, debe ser también mayor que la profundidad de socavación, producida en este lugar.

$$r + h_3 \geq h_4 \quad \dots 11.24$$

Siendo, r profundidad de la poza de disipación de energía.

La magnitud de la erosión puede ser calculada con la fórmula de M.S. Vysgo (1947) según la cual:

$$h_4 + Y_{max} = 1.4 * \sqrt{\frac{Q_{max}}{B_r} * \sqrt{\Delta h}} \quad \dots 11.25$$

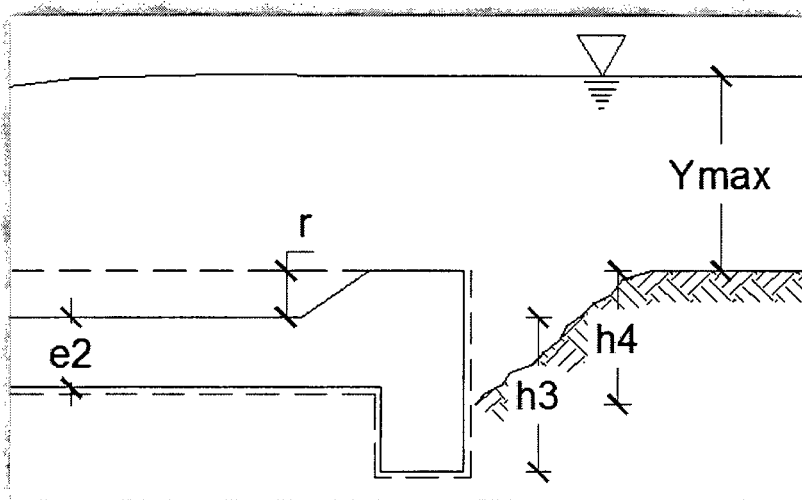
Donde:

Δh : Diferencia de altura entre la sección de entrada y salida.

Q_{max} : Caudal máximo instantáneo, en m³/s

B_r : Ancho de encauzamiento, en m.

Figura N° 11.03: Socavación al pie del dissipador de energía.



Esta fórmula no toma en cuenta las características del material que forma el cauce del río y el resto constituye su lado flaco.

11.6.2) Longitud de la escollera o enrocado

Como ya se mencionó anteriormente la escollera tiene la finalidad de reducir la erosión. La longitud de la escollera o enrocado recomendada viene dada por el método de Bligh.

$$L_e = L_0 - L_d \quad \dots 11.26$$

$$L_0 = 0.67 * C * \sqrt{D_b * \frac{Q_{max}}{L_p}} \quad \dots 11.27$$

$$L_d = 0.60 * C * \sqrt{D_1} \quad \dots 11.28$$

Donde:

L_e : Longitud de escollera, en m.

L_0 : Longitud total del dental, en m.

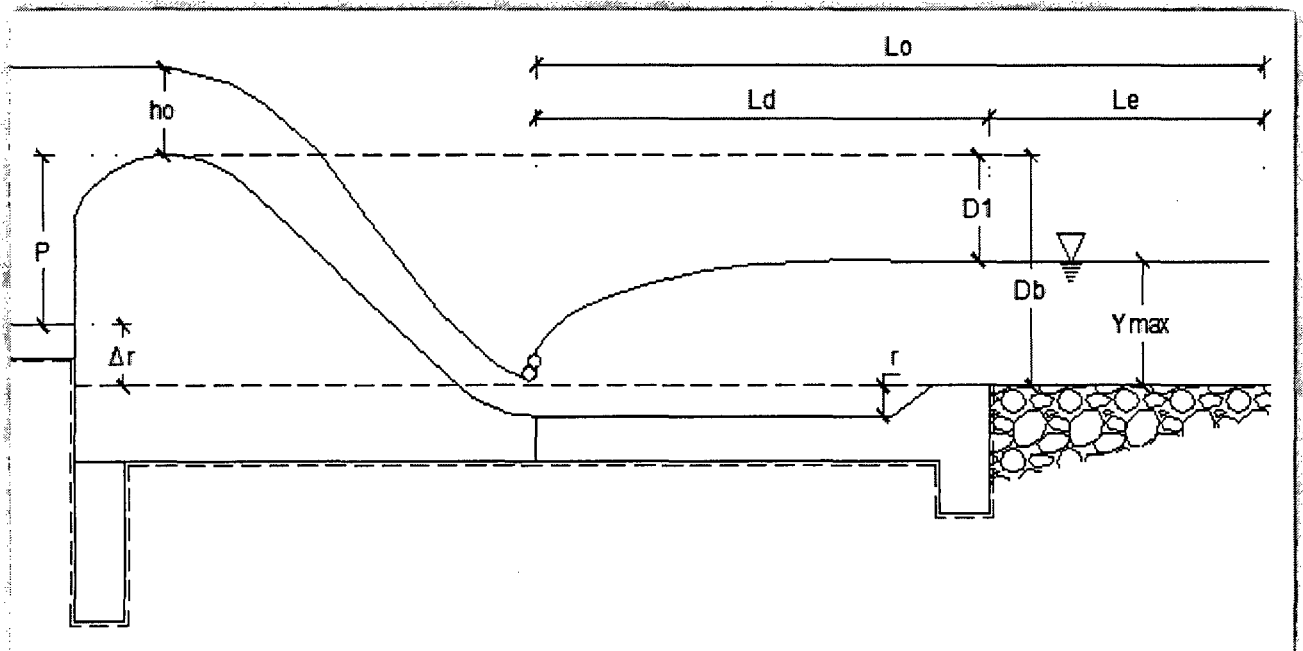
L_d : Longitud de la poza de disipación de energía, en m.

C : Coeficiente de Bligh, tabla N° 11.01.

D_b : Altura comprendida entre la cota de la cresta del barraje y la cota del extremo aguas abajo del dissipador de energía.

D_1 : Altura comprendida entre la cota de la cresta del barraje y la cota del extremo aguas abajo.

Figura N° 11.04: Longitud de la escollera.



Remplazando ecuación N° 11.27 y 11.28 en 11.26

$$L_e = 0.60 * C * \sqrt{D_1} * \left(1.12 * \sqrt{\frac{Q_{max} * D_b}{L_p * D_1}} - 1 \right) \quad \dots 11.29$$

11.7) FACTOR DE SEGURIDAD AL FENÓMENO DE TUBIFICACIÓN

El fenómeno de tubificación puede definirse como el movimiento de material de la cimentación por la velocidad del agua de filtración al salir del suelo que se encuentra bajo la presa. En otras palabras, el fenómeno se presenta cuando las filtraciones a través de un suelo se verifican con velocidades mayores de un cierto límite, al cual se le denomina "velocidad crítica".

Han sido establecidas diferentes fórmulas definiendo la velocidad requerida para levantar partículas de suelo de diferentes tamaños. Sin embargo, la tubificación incipiente ocurre cuando la presión del agua de filtración en cualquier punto de la cimentación, es mayor que el peso del suelo saturado en ese punto. Bajo tales condiciones el suelo llega a estar sobresaturado rápidamente e incapaz de soportar cualquier carga, la tubificación real es eminente.

Debido al arrastre de las partículas sólidas hacia aguas abajo del dissipador de energía, se van formando en la cimentación verdaderos túneles, por los que el agua fluye fácilmente.

Para que la estructura quede al margen de los efectos producidos por la tubificación, se introduce un factor de seguridad, que se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$FS = \frac{G_s - 1}{\frac{\Delta h}{L_t} * (1 + e)} \quad \dots 11.30$$

Este factor de seguridad debe ser igual o mayor que 4.

Donde:

G_s : Gravedad específica del material.

e : Relación de vacíos del mismo.

Δh : Diferencia máxima del nivel de la superficie aguas arriba y aguas abajo, en m.

L_t : Longitud de recorrido de filtración, en m.

12.0 MURO DE ENCAUZAMIENTO Y ESTUDIO DE LA CURVA DE REMANSO

12.1) ASPECTOS GENERALES

Estas estructuras permiten encauzar el flujo del río entre determinados límites para formar las condiciones de diseño preestablecidas (ancho, tirante, remanso, etc.). Se construyen aguas arriba y aguas abajo de la toma.

Los muros de encauzamiento pueden ser de concreto simple, armado, ciclópeo, diques de tierra o de enrocamiento según los materiales disponibles en zonas próximas a la toma. Su dimensionamiento es para controlar el posible desborde del máximo nivel del agua y de evitar que la socavación afecte las estructuras de captación.

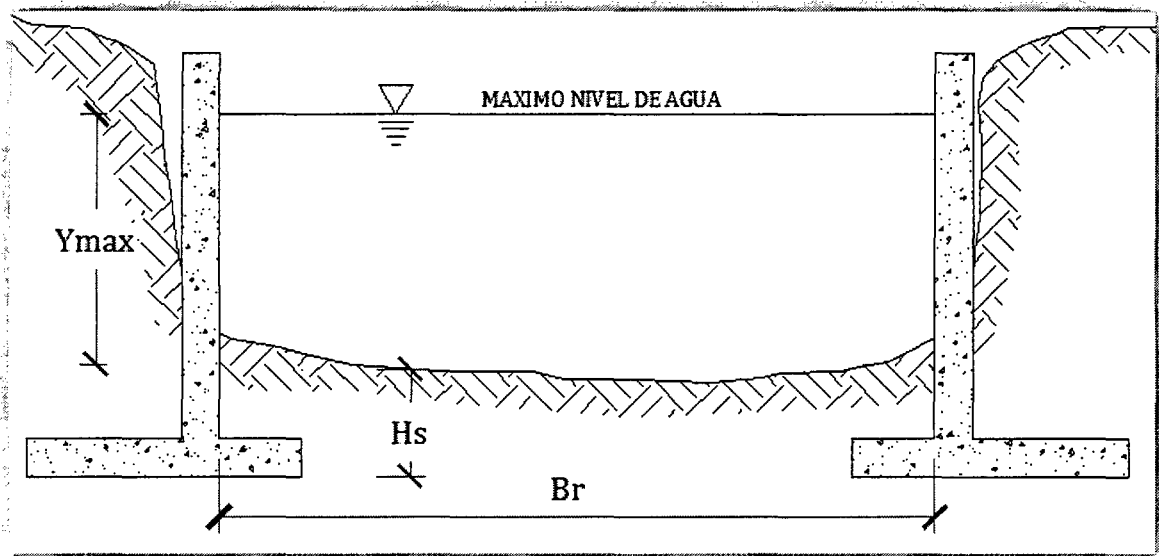
En lo referente a la altura del muro de encauzamiento, se recomienda que su cota superior esté por lo menos 0.50m por encima del nivel máximo de agua, para una máxima descarga instantánea y considerando un periodo de retorno apropiado, según la magnitud e importancia de la obra hidráulica.

Con respecto a su cota de cimentación, se recomienda que esta deba estar por debajo o igual a la profundidad de socavación, para asegurar su estabilidad.

Hacia aguas arriba el muro finaliza en el extremo de la curva de remanso, mientras que hacia aguas abajo coincide con el final de la poza de disipación. Para definir la longitud de los muros de encauzamiento se calcula la curva de remanso que se producirá como consecuencia de la implantación del barraje en el río, estos cálculos se deben efectuarse para el caudal máximo instantáneo.

Con las dimensiones definidas, se puede calcular los espesores necesarios para soportar los esfuerzos que transmiten el relleno y la altura de agua, es práctica común diseñar al volteo, deslizamiento y asentamiento.

Figura N° 12.01: Muro de encauzamiento.

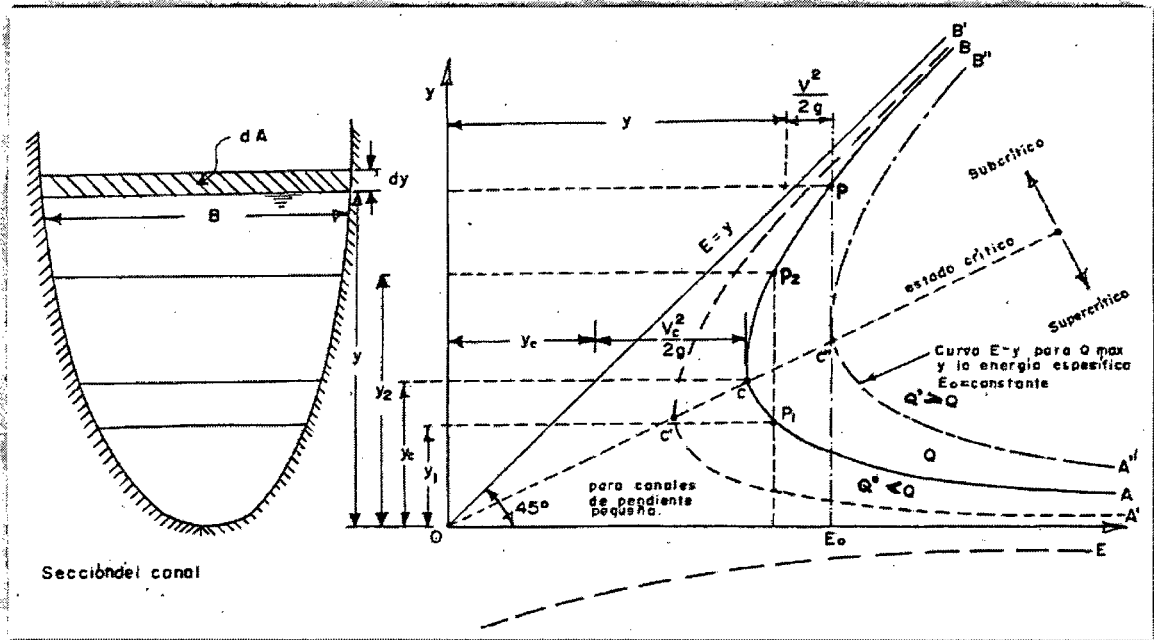


12.2) RÉGIMEN CRÍTICO

La ecuación de la energía permite resolver con relativa sencillez aquellos problemas de flujo a superficie libre en que se conoce el tirante de las dos secciones extremas del tramo en que se aplica. Este problema es, en esencia, similar al del cálculo del gasto en un tubo a partir de las presiones aguas arriba y el estrangulamiento de un venturímetro.

Cuando se tiene un cambio de área en un tubo a presión, la ecuación de continuidad permite determinar el cambio en la velocidad y carga de velocidad y de ella el cambio de presión, sin embargo, el mismo problema en un canal se toma más complicado, cuando se desconoce el tirante en alguna de las secciones y tiene que ser calculado a partir de los cambios en la sección transversal, ello conduce a dificultades especiales de mucho interés debido a que el tirante juega un doble papel al influir en las ecuaciones de energía y continuidad simultáneamente.

Figura N° 12.02: Curvas de energía específica.



La curva muestra que para una determinada energía específica existen dos valores de tirante, y_1, y_2 , que reciben el nombre de tirantes alternados; el alternado menor y_1 y el mayor y_2 . En el punto C la energía específica es la mínima con la cual puede pasar el gasto Q a través de la sección y para la cual existe un solo valor del tirante y_c , que recibe el nombre de tirante crítico y al cual corresponde una velocidad llamada crítica. El estado del flujo que se desarrolla con el tirante crítico recibe el nombre de estado o régimen crítico.

Cuando el tirante es mayor que el crítico, la velocidad es menor que la crítica para el gasto dado y en estas condiciones, el flujo se encuentra en estado o régimen subcrítico. Cuando el tirante es menor que el crítico, la velocidad es mayor que la crítica y el flujo se encuentra en estado o régimen supercrítico. En cada régimen, el tirante y la velocidad adquieren el nombre que corresponde (subcríticos o supercríticos).

12.2.1) Cálculo del tirante crítico

Las condiciones teóricas en las que se desarrolla en régimen crítico está dada por la ecuación N° 12.01, considerando $\alpha = 1$ en dicha ecuación.

$$\frac{Q}{\sqrt{g}} = \frac{A_c^{3/2}}{b_c^{1/2}} \quad \dots 12.01$$

La ecuación N° 12.01 indica que dada la forma de la sección en un canal y el gasto, existe un tirante crítico único y viceversa. Como un criterio general, dicho tirante queda definido al satisfacer dicha ecuación cualquiera sea la forma de la sección. Sin embargo, para las secciones más usuales se han desarrollado fórmulas más sencillas, o bien gráficas para un cálculo más rápido del tirante crítico.

Sección rectangular: Para un canal rectangular de ancho de plantilla b , la ecuación N° 12.01 se escribe:

$$\frac{Q}{\sqrt{g}} = \frac{b^{3/2} * y_c^{3/2}}{b^{1/2}} \quad \dots 12.02$$

De donde, al hacer $q = Q/b$ (gasto unitario) el tirante crítico vale:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad \dots 12.03$$

La ecuación anterior permite el cálculo directo del tirante crítico en una sección rectangular. Sustituyendo en ella $q = v_c * y_c$ resulta que:

$$\frac{y_c}{2} = \frac{v_c^2}{2g} \quad \dots 12.04$$

Finalmente la energía específica en condición de régimen crítico es como sigue:

$$E_{min} = y_c + \frac{y_c}{2} = \frac{3}{2} * y_c \quad \dots 12.05$$

Sección trapezoidal: Para un canal trapezoidal de ancho de plantilla b , y talud Z , la ecuación N° 12.01 resulta:

$$\frac{Q}{\sqrt{g}} = \left[\frac{(b + z * y_c)^3 * y_c^3}{b + 2z * y_c} \right]^{1/2} \quad \dots 12.06$$

Es posible obtener también una relación entre el tirante crítico y la energía específica mínima.

$$E_{min} = y_c + \frac{A_c}{2b_c} = \frac{2y_c * b_c + A_c}{2b_c} \quad \dots 12.07$$

$$E_{min} = \frac{2(b + 2Z * y_c) * y_c + (b + Z * y_c) * y_c}{2(b + 2Z * y_c)} \quad \dots 12.08$$

12.3) CÁLCULO DE LA CURVA DE REMANSO

Al construir el barraje en el cauce del río, causa la formación de una sobre elevación del nivel del agua delante del vertedero que puede generar inundaciones a los terrenos aledaños, y obras hidráulicas cercanas a la obra captación, por lo que es necesario determinar la curva de remanso formado.

Cuando hablamos del estudio de la curva de remanso nos estamos refiriendo a un flujo gradualmente variado y permanente, cuya profundidad varia gradualmente en la dirección del canal, de tal manera que las líneas de corriente son rectas y prácticamente paralelas y por lo mismo, la distribución hidrostática de presiones prevalece en cada sección.

12.3.1) Clasificación de las curvas de remanso

La clasificación de los perfiles de flujo variado está basada en la pendiente del canal y en la zona en que se localiza el perfil, en el caso de pendientes positivas (el fondo del canal descende en la dirección del flujo), se puede establecer un flujo uniforme de tirante Y_n , por lo cual dicha pendiente podría ser:

- Suave si $Y_n > Y_c$, curva tipo M.
- Suave si $Y_n = Y_c$, curva tipo C.
- Suave si $Y_c > Y_n$, curva tipo S.

En caso de pendiente cero (curva tipo H), o negativa (curva tipo A), no existe posibilidad de flujo uniforme.

12.3.2) Métodos de cálculo de la curva de remanso

Una vez definido el tipo de perfil de flujo y la sección de control, se procede al cálculo numérico de los tirantes reales a lo largo del escurrimiento. El cálculo de los perfiles del flujo gradualmente variado se realiza básicamente, dando solución a la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_E}{1 - \frac{Q^2 * T}{g * A^3}} \quad \dots 12.09$$

Donde:

S_0 : Pendiente del fondo del canal.

S_E : Pendiente de la línea de energía.

A : Área hidráulica, de la sección de control.

T : Espejo de agua.

Existen varios procedimientos para el cálculo de la curva de remanso, se recomienda los siguientes métodos:

- Método aproximado
- Método del paso directo
- Método de integración gráfica
- Método de integración directa (Bakhmeteff – Ven Te Chow)
- Método de integración directa (Método de Bresse)
- Método de tramos fijos

a) Método aproximado

El método aproximado da con bastante precisión la longitud total (L) del remanso y permite tener una idea del efecto del remanso hacia aguas arriba. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L = \frac{2 * (P + h_0 - Y_n)}{S_0} \quad \dots 12.10$$

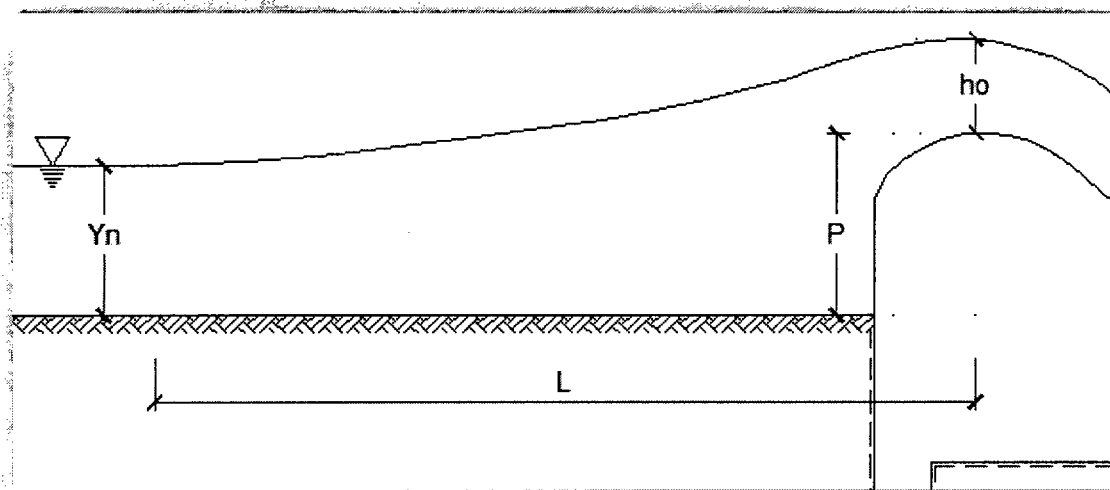
Donde:

h_0 : Carga de agua sobre barraje, en m.

Y_n : Tirante normal de río para Q_{max} , en m.

S_0 : Pendiente del fondo del río, en m/m.

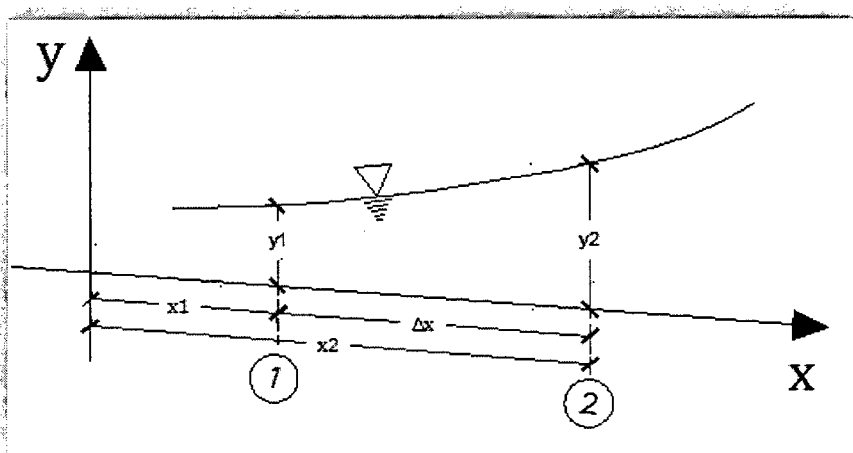
Figura N° 12.03: Remanso producido por el barraje en el río.



b) Método de integración grafica

Este método tiene como objetivo integrar la ecuación dinámica de flujo gradualmente variado mediante un procedimiento gráfico, es el método menos exacto, sobre todo si los incrementos Δy son grandes, puesto que se resuelve la integral del flujo gradualmente variado, utilizando trapecios. Para aumentar la exactitud los incrementos Δy deben ser pequeños.

Figura N° 12.04: Tramo de canal.



Consideremos dos secciones de canal (Figura N° 12.04), localizadas a unas distancias x_1 y x_2 respectivamente desde su origen seleccionado y con los tirantes de agua y_1 y y_2 correspondientes. La solución se refiere a la integración de la ecuación N° 12.09.

$$dx = \frac{1 - \frac{Q^2 * T}{g * A^3}}{S_0 - S_E} dy \quad \dots 12.11$$

Siendo, Q, g, S_0 constantes, y T, A, S_E funciones del tirante y , por lo cual:

$$f(y) = \frac{1 - \frac{Q^2 * T}{g * A^3}}{S_0 - S_E} \quad \dots 12.12$$

La ecuación N° 12.11 puede escribirse de la manera siguiente:

$$dx = f(y)dy \quad \dots 12.13$$

Integrando la ecuación anterior se obtiene:

$$\int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{y_1}^{y_2} f(y)dy \quad \dots 12.14$$

$$x_2 - x_1 = \Delta x = \int_{y_1}^{y_2} f(y)dy \quad \dots 12.15$$

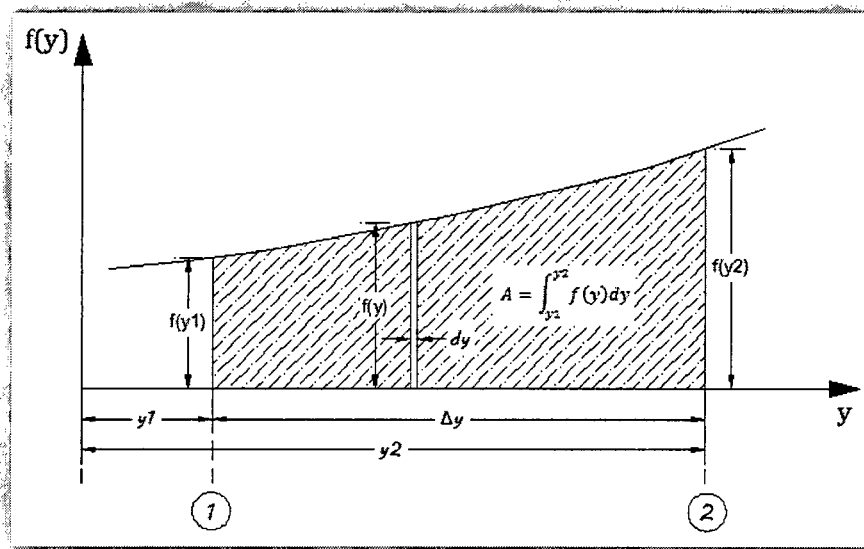
Uno de los conceptos elementales del cálculo integral, aplicando la definición de Riemann para la integral definida indica que:

$$\int_{y_1}^{y_2} f(y)dy$$

Es el área achurada A (figura N° 12.05), formada por la curva, el eje y , y las ordenadas de $f(y)$ correspondientemente a y_1 y y_2 es decir, $f(y_1)$ y $f(y_2)$. De acuerdo con la ecuación N° 12.15 el valor de Δx es igual al área sombreada, es decir:

$$\Delta x = A = \int_{y_1}^{y_2} f(y)dy \quad \dots 12.16$$

Figura N° 12.05: Área bajo la curva.



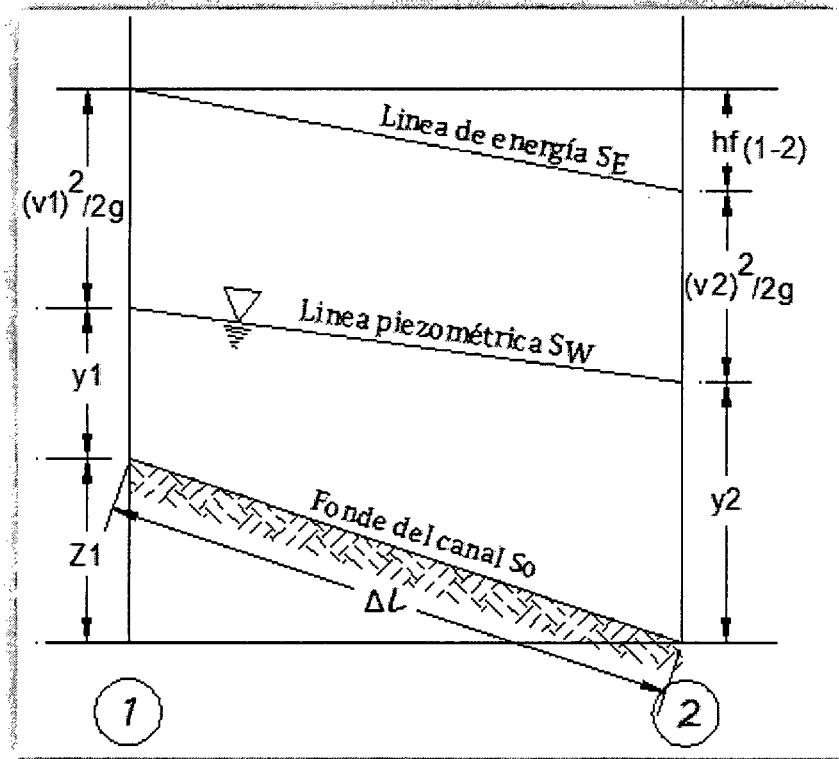
El área sombreada puede considerarse como un trapecio, con lo cual el área sería calculada de la siguiente manera:

$$\Delta x = A = \frac{f(y_1) + f(y_2)}{2} * \Delta y \quad \dots 12.17$$

c) Método del paso directo

Este método se caracteriza por dividir el canal en tramos cortos y llevar a cabo los cálculos paso a paso desde un extremo hasta el otro. Se basa en la aplicación de la ecuación de energía (Teorema de Bernoulli) y es aplicable a todo tipo de canales prismáticos.

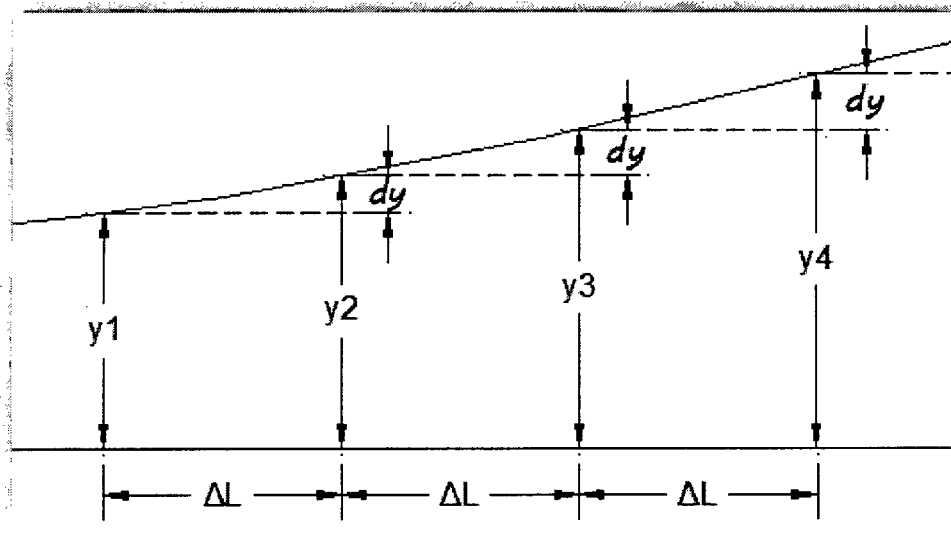
Figura N° 12.06: Sección 1-2 de un tramo de canal.



Aplicando Bernoulli entre las secciones 1 y 2, se obtiene:

$$Z_1 + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_{f(1-2)} \quad \dots 12.18$$

Figura N° 12.07: Sección 1-2 de un tramo de canal.



Donde:

Z_1 : Carga de posición en la sección 1 con respecto al plano horizontal de referencia.

ΔL : Incremento de la longitud o longitud del tramo.

$h_{f(1-2)}$: Pérdida de carga por fricción entre la sección 1 y 2 cuyo valor es:

$$h_{f(1-2)} = \frac{S_E}{\Delta L} \quad \dots 12.19$$

$$Z_1 = S_0 * \Delta L \quad \dots 12.20$$

Remplazando la ecuación N° 12.19, 12.20 en ecuación N° 12.18:

$$S_0 * \Delta L + y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + S_E * \Delta L \quad \dots 12.21$$

Despejando ΔL :

$$\Delta L = \frac{\left(y_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right) - \left(y_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right)}{S_0 - S_E} = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - S_E} \quad \dots 12.22$$

Donde:

E_1 : Energía específica en la sección 1 del canal, en m.

E_2 : Energía específica en la sección 2 del canal, en m.

S_0 : Pendiente del fondo del canal.

S_E : Pendiente de la línea de energía.

d) Método de integración directa (Bakhmeteff – Ven Te Chow)

La ecuación diferencial N° 12.09 de flujo gradualmente variado no puede expresarse explícitamente en términos de y para todos los tipos de secciones transversales del canal, por consiguiente una integración directa y exacta de la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado es casi imposible. Inicialmente solo se aplicó a determinadas secciones del canal, pero luego se generalizó. El método descrito aquí es el resultado de un estudio sobre muchos de los métodos existentes.

Este método realiza una integración directa y exacta de la ecuación del flujo gradualmente variado, considerando que los exponentes hidráulicos para un flujo crítico y normal, M y N , son constantes.

El procedimiento de cálculo para este método es como sigue:

- Identificar el tramo donde se realizan los cálculos (Figura N° 12.08), siendo el y_i inicial (y_i) el tirante de la sección de control, y el y_f final (y_f), el tirante hasta donde se desea calcular la curva de remanso.
- Calcular el tirante promedio y_p de los tirantes extremos:

$$y_p = \frac{y_i + y_f}{2} \quad \dots 12.23$$

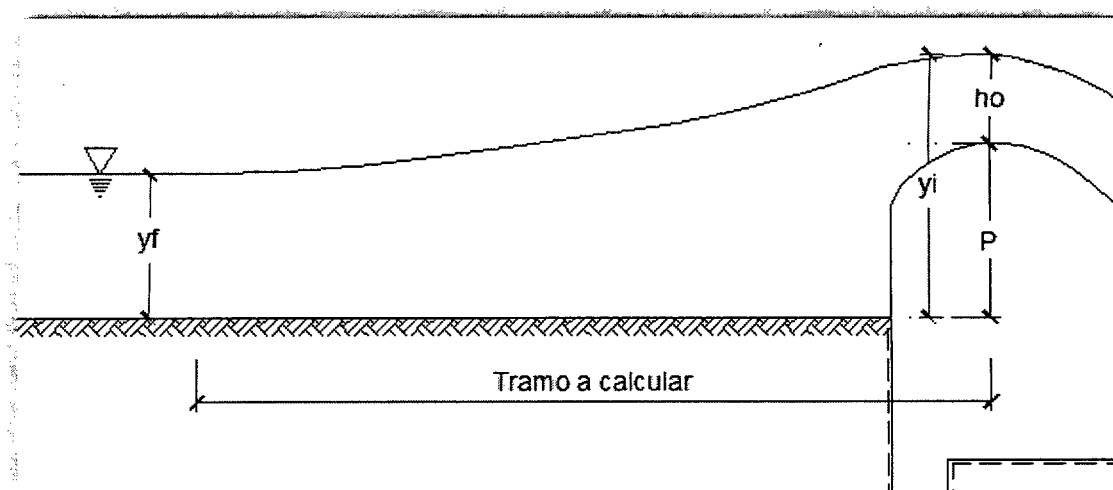
y con el valor de y_p/b , calcular el exponente hidráulico M , el cual se puede calcular por medio de la ecuación:

$$M = \frac{3 * \left[1 + 2Z \left(\frac{y_p}{b} \right) \right]^2 - 2Z \left(\frac{y_p}{b} \right) * \left[1 + Z \left(\frac{y_p}{b} \right) \right]}{\left[1 + 2Z \left(\frac{y_p}{b} \right) \right] * \left[1 + Z \left(\frac{y_p}{b} \right) \right]} \quad \dots 12.24$$

- De igual manera calcular el exponente hidráulico N , con la ecuación:

$$N = \frac{10}{3} * \left[\frac{1 + 2Z \left(\frac{y_p}{b} \right)}{1 + Z \left(\frac{y_p}{b} \right)} \right] - \frac{8}{3} * \left[\frac{\sqrt{1 + Z^2} * \left(\frac{y_p}{b} \right)}{1 + 2\sqrt{1 + Z^2} * \left(\frac{y_p}{b} \right)} \right] \quad \dots 12.25$$

Figura N° 12.08: Identificación de tramo a calcular



- Calcular el tirante normal y_n y el tirante crítico y_c del tramo, a partir de Q, S_0 y n .
- Calcular J .

$$J = \frac{N}{N - M + 1} \quad \dots 12.26$$

- Definir el número de divisiones n que tendrá el tramo y calcular el incremento Δy .

$$\Delta y = \frac{y_f - y_i}{n} \quad \dots 12.27$$

La primera división tendrá como tirante y_1 al tirante inicial, y como tirante y_2 , al tirante y_1 más el incremento Δy .

Las divisiones subsiguientes, tendrán como y_1 , al y_2 de la división anterior, y como y_2 , al nuevo tirante y_1 más el incremento Δy .

- Calcular los valores de u y v , para los tirantes y_1, y_2 .

$$u = \frac{y}{y_n} \quad \dots 12.28$$

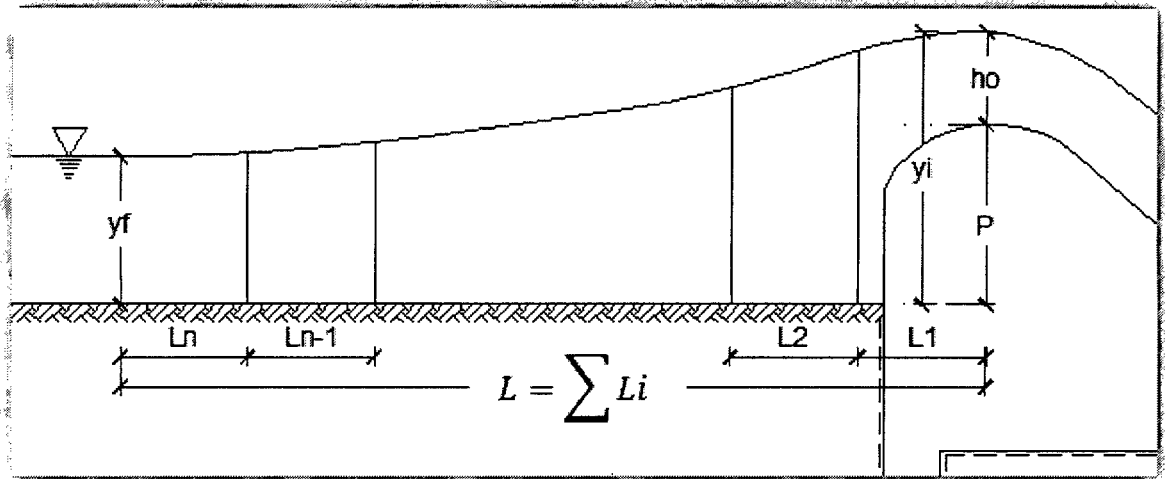
$$v = u^J \quad \dots 12.29$$

- Calcular las funciones del flujo variado de Bakhmeteff $F(u, N)$ y $F(v, J)$, para los tirantes y_1, y_2 , utilizando la tabla N° 12.01 del apéndice A.
- Calcular la longitud L de la división, con tirantes y_1, y_2 :

$$L = \frac{y_n}{S_0} * \left((u_2 - u_1) - [F(u_2, N) - F(u_1, N)] + \left(\frac{y_c}{y_n}\right)^M * \frac{J}{N} * [F(v_2, J) - F(v_1, J)] \right) \dots 12.30$$

- Repetir los cálculos para la siguiente división, hasta completar con todas las divisiones del tramo.
- Acumular las longitudes calculadas en cada división.

Figura N° 12.09: Identificación de tramo a calcular



- Cuando se desea trabajar con varios tramos en forma simultánea, usar la ecuación:

$$\Delta x = \frac{y_n}{S_0} * \left(u - F(u, N) + \left(\frac{y_c}{y_n} \right)^M * \frac{J}{N} * F(v, J) \right) \quad \dots 12.31$$

Y los cálculos resumirlos como se muestra en la tabla N° 12.2

Tabla N° 12.02: Cálculo de la curva de remanso método de Bakhmeteff

| y | u=y/yn | v=u^(N/J) | F(u,N) | F(v,J) | Δx | L |
|---|--------|-----------|--------|--------|----|---|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Donde L, se calcula como:

$$L = |\Delta x_1 - \Delta x_n| \quad \dots 12.32$$

e) Método de integración directa (Bresse)

En 1860 Bresse, introdujo ciertas hipótesis que permiten una simplificación de la integración matemática, de la expresión diferencial del flujo gradualmente variado.

Esta solución es un caso particular, en la que la hipótesis fundamental es la de considerar una sección rectangular muy ancha, es decir, donde $R = y$.

El procedimiento de cálculo para este método es como sigue:

- Calcular el tirante normal del río, para una avenida máxima instantánea.
- Calcular el tirante crítico.
- Identificar el tipo de curva.
- Definir la sección de control, para nuestro caso es la presa derivadora, y los cálculos se realizan hacia aguas arriba.
- Definir número de tramos y con el calcular Δy :

$$\Delta y = \frac{y_f - y_i}{n} \quad \dots 12.33$$

- Para definir el perfil del flujo utilizar la ecuación siguiente:

$$x = \frac{y_n}{S_0} * Z - y_n * \left(\frac{1}{S_0} - \frac{C^2}{g} \right) * \phi(Z) \quad \dots 12.34$$

$$C = \frac{y^{1/6}}{n} \quad \dots 12.35$$

$$Z = \frac{y}{y_n} \quad \dots 12.36$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad, en m^2/s .

y_n : Tirante normal del río, en m.

S_0 : Pendiente del fondo del canal, en m/m.

Z : Relación entre tirante de una sección cualquiera y el tirante normal.

$\phi(Z)$: Función del flujo gradualmente variado calculado por Bresse y cuyos valores se muestran en la tabla N° 12.03 del apéndice B.

- El x de la ecuación N° 12.34, representa la distancia a que se encuentra la sección considerada con respecto a un origen arbitrario.
- La longitud parcial de la curva de remanso se calcula de la manera siguiente:

$$L_i = |x_n - x_{n-1}| \quad \dots 12.37$$

- La longitud total de la curva de remanso se calcula sumando las longitudes parciales del paso anterior.

f) Método de tramos fijos.

Este método es aplicable tanto para canales prismáticos como no prismáticos. Se utiliza para calcular el tirante y_2 , que se presenta en una sección 2 previamente especificada de un tramo de longitud Δx , a partir del tirante conocido y_1 en la sección 1, y los demás datos.

Conocidas las características hidráulicas de la sección 1 y la longitud del tramo Δx , la cual es positiva si los cálculos son hacia aguas arriba de la sección 1, el procedimiento consiste en suponer un valor tentativo del tirante y_2 en la sección 2 y ajustar por tanteos dicho valor, hasta que con algún valor supuesto de éste, se satisfaga la igualdad de los dos miembros de la ecuación.

Para ordenar los cálculos es conveniente tabular los resultados como se muestra en la tabla N° 12.04.

El significado de cada columna es:

1. Kilometraje que define la sección de cálculo. El valor inicial de x , puede ser el dato correspondiente al cadenamiento de la sección inicial de la aplicación, o bien en un valor fijado por el calculista, por ejemplo 0, los valores siguientes se obtienen acumulando los Δx .

Tabla N° 12.04: Tabulación para el método de tramos fijos

| x | Δx | $S_o * \Delta x$ | y | A | P | R | $R^{(2/3)}$ |
|---|------------|------------------|---|---|---|---|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

| V | $V^2/2g$ | E | $S_0 \cdot \Delta x + E$ | S_E | \bar{S}_E | $\bar{S}_E \cdot \Delta x$ | $E + \bar{S}_E \cdot \Delta x$ |
|---|----------|----|--------------------------|-------|-------------|----------------------------|--------------------------------|
| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

2. Valor de Δx entre la sección en estudio y la sección anterior, generalmente constante.

3. Pendiente de fondo x columna 2, generalmente constante.

4. Profundidad en la sección. En la fila 1, para un y_1 conocido se calculan los valores de las columnas 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13, los valores de las columnas 14, 15 y 16 no se pueden calcular porque se requieren cálculos con y_2 . En la fila 2, para un y_2 supuesto se calculan los valores de las columnas desde 5 hasta la 16.

5. $A = (b + Z * y) * y$

6. $P = b + 2 * y * \sqrt{1 + Z^2}$

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

8. Radio hidráulico elevado a la 2/3.

9. $V = \frac{Q}{A}$

10. Carga de velocidad.

11. $E = y + \frac{V^2}{2g}$, columna 4 más columna 10.

12. Primer miembro de la ecuación N° 12.38, suma de las columnas 3 y 10.

$$S_0 * \Delta x + E_1 = E_2 + \bar{S}_E * \Delta x \quad \dots 12.38$$

13. $S_E = \left(\frac{y * n}{R^{2/3}} \right)^2$

14. $\bar{S}_E = \frac{S_{E1} + S_{E2}}{2}$ promedio de los valores de la columna 13, para las filas 1 y 2.

15. Columna 14 * columna 2.

16. Segundo miembro de la ecuación N° 12.38, columna 11 + columna 15 de la fila 2.

El valor supuesto de y_2 será el adecuado, si el resultado obtenido en la columna 16 para la fila 2, es igual o suficientemente próximo al de la columna 12 para la fila 1. En caso de que no lo fuera, toda la línea de cálculos de la fila 2 debe ser eliminada y se deben comenzar nuevamente los cálculos con otro valor tentativo de y_2 hasta que se cumpla con la igualdad de valores de las columnas 16 y 12.

Para las aplicaciones sucesivas el tirante y_2 encontrado se tomará como el correspondiente para y_1 y con este valor conocido se aplicará el mismo procedimiento para calcular el nuevo y_2 , así hasta terminar con los tramos necesarios.

Nota: Recordar que, en los cálculos, el signo de Δx es positivo, si estos se efectúan hacia aguas abajo, y negativo si se efectúan hacia aguas arriba de la sección 1.

Apéndice A: Tabla N° 12.01 de las funciones de flujo variado*

$$F(u, N) = \int_0^u \frac{dx}{1 - x^N} \quad \text{y} \quad F(u, N)_{-s_2} = \int_0^u \frac{dx}{1 + x^N}$$

Tabla A-1. La función de flujo variado para pendientes positivas, $F(u, N)$

| $N \backslash u$ | 2.2 | 2.4 | 2.6 | 2.8 | 3.0 | 3.2 | 3.4 | 3.6 | 3.8 | 4.0 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.02 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 |
| 0.04 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 |
| 0.06 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 |
| 0.08 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 |
| 0.10 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 |
| 0.12 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 |
| 0.14 | 0.141 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 |
| 0.16 | 0.161 | 0.161 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 |
| 0.18 | 0.181 | 0.181 | 0.181 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 |
| 0.20 | 0.202 | 0.201 | 0.201 | 0.201 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 |
| 0.22 | 0.223 | 0.222 | 0.221 | 0.221 | 0.221 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 |
| 0.24 | 0.243 | 0.242 | 0.242 | 0.241 | 0.241 | 0.241 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 |
| 0.26 | 0.264 | 0.263 | 0.262 | 0.262 | 0.261 | 0.261 | 0.261 | 0.260 | 0.260 | 0.260 |
| 0.28 | 0.285 | 0.284 | 0.283 | 0.282 | 0.282 | 0.281 | 0.281 | 0.281 | 0.280 | 0.280 |
| 0.30 | 0.307 | 0.305 | 0.304 | 0.303 | 0.302 | 0.302 | 0.301 | 0.301 | 0.301 | 0.300 |
| 0.32 | 0.329 | 0.328 | 0.325 | 0.324 | 0.323 | 0.322 | 0.322 | 0.321 | 0.321 | 0.321 |
| 0.34 | 0.350 | 0.348 | 0.346 | 0.344 | 0.343 | 0.343 | 0.342 | 0.342 | 0.341 | 0.341 |
| 0.36 | 0.373 | 0.370 | 0.367 | 0.366 | 0.364 | 0.363 | 0.363 | 0.362 | 0.362 | 0.361 |
| 0.38 | 0.395 | 0.392 | 0.389 | 0.387 | 0.385 | 0.384 | 0.383 | 0.383 | 0.382 | 0.382 |
| 0.40 | 0.418 | 0.414 | 0.411 | 0.408 | 0.407 | 0.405 | 0.404 | 0.403 | 0.403 | 0.402 |
| 0.42 | 0.441 | 0.437 | 0.433 | 0.430 | 0.428 | 0.426 | 0.425 | 0.424 | 0.423 | 0.423 |
| 0.44 | 0.465 | 0.460 | 0.456 | 0.452 | 0.450 | 0.448 | 0.446 | 0.445 | 0.444 | 0.443 |
| 0.46 | 0.489 | 0.483 | 0.478 | 0.475 | 0.472 | 0.470 | 0.468 | 0.466 | 0.465 | 0.464 |
| 0.48 | 0.514 | 0.507 | 0.502 | 0.497 | 0.494 | 0.492 | 0.489 | 0.488 | 0.486 | 0.485 |
| 0.50 | 0.539 | 0.531 | 0.525 | 0.521 | 0.517 | 0.514 | 0.511 | 0.509 | 0.508 | 0.506 |
| 0.52 | 0.565 | 0.556 | 0.550 | 0.544 | 0.540 | 0.536 | 0.534 | 0.531 | 0.529 | 0.528 |
| 0.54 | 0.592 | 0.582 | 0.574 | 0.568 | 0.563 | 0.559 | 0.556 | 0.554 | 0.551 | 0.550 |
| 0.56 | 0.619 | 0.608 | 0.600 | 0.593 | 0.587 | 0.583 | 0.579 | 0.576 | 0.574 | 0.572 |
| 0.58 | 0.647 | 0.635 | 0.628 | 0.618 | 0.612 | 0.607 | 0.603 | 0.599 | 0.596 | 0.594 |
| 0.60 | 0.676 | 0.663 | 0.653 | 0.644 | 0.637 | 0.631 | 0.627 | 0.623 | 0.620 | 0.617 |
| 0.61 | 0.691 | 0.677 | 0.666 | 0.657 | 0.650 | 0.644 | 0.639 | 0.635 | 0.631 | 0.628 |
| 0.62 | 0.707 | 0.692 | 0.680 | 0.671 | 0.663 | 0.657 | 0.651 | 0.647 | 0.643 | 0.640 |
| 0.63 | 0.722 | 0.707 | 0.694 | 0.684 | 0.676 | 0.669 | 0.664 | 0.659 | 0.655 | 0.652 |
| 0.64 | 0.738 | 0.722 | 0.709 | 0.698 | 0.690 | 0.683 | 0.677 | 0.672 | 0.667 | 0.664 |
| 0.65 | 0.754 | 0.737 | 0.724 | 0.712 | 0.703 | 0.696 | 0.689 | 0.684 | 0.680 | 0.676 |
| 0.66 | 0.771 | 0.753 | 0.739 | 0.727 | 0.717 | 0.709 | 0.703 | 0.697 | 0.692 | 0.688 |
| 0.67 | 0.787 | 0.769 | 0.754 | 0.742 | 0.731 | 0.723 | 0.716 | 0.710 | 0.705 | 0.701 |
| 0.68 | 0.803 | 0.785 | 0.769 | 0.757 | 0.746 | 0.737 | 0.729 | 0.723 | 0.718 | 0.713 |
| 0.69 | 0.822 | 0.802 | 0.785 | 0.772 | 0.761 | 0.751 | 0.743 | 0.737 | 0.731 | 0.726 |

* La tabla de la función de flujo variado para pendientes positivas $F(u, N)$ se reprodujo de Ven Te Chow, "Integrating the equation of gradually varied flow".

Tabla A-1. La función de flujo variado para pendientes positivas, $F(u, N)$ (continuación)

| $N \backslash u$ | 2.2 | 2.4 | 2.6 | 2.8 | 3.0 | 3.2 | 3.4 | 3.6 | 3.8 | 4.0 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.70 | 0.841 | 0.819 | 0.802 | 0.787 | 0.776 | 0.766 | 0.757 | 0.750 | 0.744 | 0.739 |
| 0.71 | 0.859 | 0.837 | 0.819 | 0.804 | 0.791 | 0.781 | 0.772 | 0.764 | 0.758 | 0.752 |
| 0.72 | 0.878 | 0.855 | 0.836 | 0.820 | 0.807 | 0.796 | 0.786 | 0.779 | 0.772 | 0.766 |
| 0.73 | 0.898 | 0.874 | 0.853 | 0.837 | 0.823 | 0.811 | 0.802 | 0.793 | 0.786 | 0.780 |
| 0.74 | 0.918 | 0.893 | 0.871 | 0.854 | 0.840 | 0.827 | 0.817 | 0.808 | 0.800 | 0.794 |
| 0.75 | 0.939 | 0.912 | 0.890 | 0.872 | 0.857 | 0.844 | 0.833 | 0.823 | 0.815 | 0.808 |
| 0.76 | 0.961 | 0.933 | 0.909 | 0.890 | 0.874 | 0.861 | 0.849 | 0.839 | 0.830 | 0.823 |
| 0.77 | 0.984 | 0.954 | 0.929 | 0.909 | 0.892 | 0.878 | 0.866 | 0.855 | 0.846 | 0.838 |
| 0.78 | 1.007 | 0.976 | 0.950 | 0.929 | 0.911 | 0.896 | 0.883 | 0.872 | 0.862 | 0.854 |
| 0.79 | 1.031 | 0.998 | 0.971 | 0.949 | 0.930 | 0.914 | 0.901 | 0.889 | 0.879 | 0.870 |
| 0.80 | 1.056 | 1.022 | 0.994 | 0.970 | 0.950 | 0.934 | 0.919 | 0.907 | 0.896 | 0.887 |
| 0.81 | 1.083 | 1.047 | 1.017 | 0.992 | 0.971 | 0.954 | 0.938 | 0.925 | 0.914 | 0.904 |
| 0.82 | 1.110 | 1.072 | 1.041 | 1.015 | 0.993 | 0.974 | 0.958 | 0.945 | 0.932 | 0.922 |
| 0.83 | 1.139 | 1.099 | 1.067 | 1.039 | 1.016 | 0.996 | 0.979 | 0.965 | 0.952 | 0.940 |
| 0.84 | 1.170 | 1.128 | 1.093 | 1.064 | 1.040 | 1.019 | 1.001 | 0.985 | 0.972 | 0.960 |
| 0.85 | 1.202 | 1.158 | 1.122 | 1.091 | 1.065 | 1.043 | 1.024 | 1.007 | 0.993 | 0.980 |
| 0.86 | 1.236 | 1.190 | 1.151 | 1.119 | 1.092 | 1.068 | 1.048 | 1.031 | 1.015 | 1.002 |
| 0.87 | 1.273 | 1.224 | 1.183 | 1.149 | 1.120 | 1.095 | 1.074 | 1.055 | 1.039 | 1.025 |
| 0.88 | 1.312 | 1.260 | 1.217 | 1.181 | 1.151 | 1.124 | 1.101 | 1.081 | 1.064 | 1.049 |
| 0.89 | 1.355 | 1.300 | 1.254 | 1.216 | 1.183 | 1.155 | 1.131 | 1.110 | 1.091 | 1.075 |
| 0.90 | 1.401 | 1.343 | 1.294 | 1.253 | 1.218 | 1.189 | 1.163 | 1.140 | 1.120 | 1.103 |
| 0.91 | 1.452 | 1.390 | 1.338 | 1.294 | 1.257 | 1.225 | 1.197 | 1.173 | 1.152 | 1.133 |
| 0.92 | 1.508 | 1.442 | 1.386 | 1.340 | 1.300 | 1.266 | 1.236 | 1.210 | 1.187 | 1.165 |
| 0.93 | 1.572 | 1.500 | 1.441 | 1.391 | 1.348 | 1.311 | 1.279 | 1.251 | 1.226 | 1.204 |
| 0.94 | 1.645 | 1.568 | 1.503 | 1.449 | 1.403 | 1.363 | 1.328 | 1.297 | 1.270 | 1.246 |
| 0.950 | 1.730 | 1.647 | 1.577 | 1.518 | 1.467 | 1.423 | 1.385 | 1.352 | 1.322 | 1.296 |
| 0.960 | 1.834 | 1.743 | 1.666 | 1.601 | 1.545 | 1.497 | 1.454 | 1.417 | 1.385 | 1.355 |
| 0.970 | 1.968 | 1.865 | 1.780 | 1.707 | 1.644 | 1.590 | 1.543 | 1.501 | 1.464 | 1.431 |
| 0.975 | 2.052 | 1.943 | 1.851 | 1.773 | 1.707 | 1.649 | 1.598 | 1.553 | 1.514 | 1.479 |
| 0.980 | 2.155 | 2.040 | 1.936 | 1.855 | 1.783 | 1.720 | 1.666 | 1.617 | 1.575 | 1.536 |
| 0.985 | 2.294 | 2.165 | 2.056 | 1.959 | 1.880 | 1.812 | 1.752 | 1.699 | 1.652 | 1.610 |
| 0.990 | 2.477 | 2.333 | 2.212 | 2.106 | 2.017 | 1.940 | 1.873 | 1.814 | 1.761 | 1.714 |
| 0.995 | 2.792 | 2.621 | 2.478 | 2.355 | 2.250 | 2.159 | 2.079 | 2.008 | 1.945 | 1.889 |
| 0.999 | 3.523 | 3.292 | 3.097 | 2.931 | 2.788 | 2.663 | 2.554 | 2.457 | 2.370 | 2.293 |
| 1.000 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 1.001 | 3.317 | 2.931 | 2.640 | 2.399 | 2.184 | 2.008 | 1.856 | 1.725 | 1.610 | 1.508 |
| 1.005 | 2.587 | 2.272 | 2.021 | 1.818 | 1.649 | 1.506 | 1.384 | 1.279 | 1.188 | 1.107 |
| 1.010 | 2.273 | 1.984 | 1.756 | 1.572 | 1.419 | 1.291 | 1.182 | 1.089 | 1.007 | 0.936 |
| 1.015 | 2.090 | 1.817 | 1.602 | 1.428 | 1.286 | 1.166 | 1.065 | 0.978 | 0.902 | 0.836 |
| 1.020 | 1.961 | 1.698 | 1.493 | 1.327 | 1.191 | 1.078 | 0.982 | 0.900 | 0.828 | 0.766 |
| 1.03 | 1.779 | 1.532 | 1.340 | 1.186 | 1.060 | 0.955 | 0.866 | 0.790 | 0.725 | 0.668 |
| 1.04 | 1.651 | 1.415 | 1.232 | 1.086 | 0.967 | 0.868 | 0.785 | 0.714 | 0.653 | 0.600 |
| 1.05 | 1.552 | 1.325 | 1.149 | 1.010 | 0.896 | 0.802 | 0.723 | 0.656 | 0.598 | 0.548 |
| 1.06 | 1.472 | 1.252 | 1.082 | 0.947 | 0.838 | 0.748 | 0.672 | 0.608 | 0.553 | 0.506 |
| 1.07 | 1.405 | 1.191 | 1.026 | 0.895 | 0.790 | 0.703 | 0.630 | 0.569 | 0.516 | 0.471 |
| 1.08 | 1.346 | 1.138 | 0.977 | 0.851 | 0.749 | 0.665 | 0.595 | 0.535 | 0.485 | 0.441 |
| 1.09 | 1.296 | 1.091 | 0.935 | 0.812 | 0.713 | 0.631 | 0.563 | 0.506 | 0.457 | 0.415 |
| 1.10 | 1.250 | 1.050 | 0.897 | 0.777 | 0.681 | 0.601 | 0.536 | 0.480 | 0.433 | 0.392 |
| 1.11 | 1.210 | 1.013 | 0.864 | 0.746 | 0.652 | 0.575 | 0.511 | 0.457 | 0.411 | 0.372 |
| 1.12 | 1.173 | 0.980 | 0.833 | 0.718 | 0.626 | 0.551 | 0.488 | 0.436 | 0.392 | 0.354 |

Tabla A-1. La función de flujo variado para pendientes positivas, $F(u, N)$ (continuación)

| $\frac{N}{u}$ | 2.2 | 2.4 | 2.6 | 2.8 | 3.0 | 3.2 | 3.4 | 3.6 | 3.8 | 4.0 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.13 | 1.139 | 0.949 | 0.805 | 0.693 | 0.602 | 0.529 | 0.468 | 0.417 | 0.374 | 0.337 |
| 1.14 | 1.108 | 0.921 | 0.780 | 0.669 | 0.581 | 0.509 | 0.450 | 0.400 | 0.358 | 0.322 |
| 1.15 | 1.079 | 0.895 | 0.756 | 0.647 | 0.561 | 0.490 | 0.432 | 0.384 | 0.343 | 0.308 |
| 1.16 | 1.052 | 0.871 | 0.734 | 0.627 | 0.542 | 0.473 | 0.417 | 0.369 | 0.329 | 0.295 |
| 1.17 | 1.027 | 0.848 | 0.713 | 0.608 | 0.525 | 0.458 | 0.402 | 0.355 | 0.316 | 0.283 |
| 1.18 | 1.003 | 0.827 | 0.694 | 0.591 | 0.509 | 0.443 | 0.388 | 0.343 | 0.305 | 0.272 |
| 1.19 | 0.981 | 0.807 | 0.676 | 0.574 | 0.494 | 0.429 | 0.375 | 0.331 | 0.294 | 0.262 |
| 1.20 | 0.960 | 0.788 | 0.659 | 0.559 | 0.480 | 0.416 | 0.363 | 0.320 | 0.283 | 0.252 |
| 1.22 | 0.922 | 0.754 | 0.628 | 0.531 | 0.454 | 0.392 | 0.341 | 0.299 | 0.264 | 0.235 |
| 1.24 | 0.887 | 0.723 | 0.600 | 0.505 | 0.431 | 0.371 | 0.322 | 0.281 | 0.248 | 0.219 |
| 1.26 | 0.856 | 0.694 | 0.574 | 0.482 | 0.410 | 0.351 | 0.304 | 0.265 | 0.233 | 0.205 |
| 1.28 | 0.827 | 0.669 | 0.551 | 0.461 | 0.391 | 0.334 | 0.288 | 0.250 | 0.219 | 0.193 |
| 1.30 | 0.800 | 0.645 | 0.530 | 0.442 | 0.373 | 0.318 | 0.274 | 0.237 | 0.207 | 0.181 |
| 1.32 | 0.776 | 0.623 | 0.510 | 0.424 | 0.357 | 0.304 | 0.260 | 0.225 | 0.196 | 0.171 |
| 1.34 | 0.753 | 0.603 | 0.492 | 0.408 | 0.342 | 0.290 | 0.248 | 0.214 | 0.185 | 0.162 |
| 1.36 | 0.731 | 0.584 | 0.475 | 0.393 | 0.329 | 0.278 | 0.237 | 0.204 | 0.176 | 0.153 |
| 1.38 | 0.711 | 0.566 | 0.459 | 0.378 | 0.316 | 0.266 | 0.226 | 0.194 | 0.167 | 0.145 |
| 1.40 | 0.692 | 0.549 | 0.444 | 0.365 | 0.304 | 0.256 | 0.217 | 0.185 | 0.159 | 0.138 |
| 1.42 | 0.675 | 0.534 | 0.431 | 0.353 | 0.293 | 0.246 | 0.208 | 0.177 | 0.152 | 0.131 |
| 1.44 | 0.658 | 0.519 | 0.418 | 0.341 | 0.282 | 0.236 | 0.199 | 0.169 | 0.145 | 0.125 |
| 1.46 | 0.642 | 0.505 | 0.405 | 0.330 | 0.273 | 0.227 | 0.191 | 0.162 | 0.139 | 0.119 |
| 1.48 | 0.627 | 0.492 | 0.394 | 0.320 | 0.263 | 0.219 | 0.184 | 0.156 | 0.133 | 0.113 |
| 1.50 | 0.613 | 0.479 | 0.383 | 0.310 | 0.255 | 0.211 | 0.177 | 0.149 | 0.127 | 0.108 |
| 1.55 | 0.580 | 0.451 | 0.358 | 0.288 | 0.235 | 0.194 | 0.161 | 0.135 | 0.114 | 0.097 |
| 1.60 | 0.551 | 0.425 | 0.335 | 0.269 | 0.218 | 0.179 | 0.148 | 0.123 | 0.103 | 0.087 |
| 1.65 | 0.525 | 0.403 | 0.316 | 0.251 | 0.203 | 0.165 | 0.136 | 0.113 | 0.094 | 0.079 |
| 1.70 | 0.501 | 0.382 | 0.298 | 0.236 | 0.189 | 0.153 | 0.125 | 0.103 | 0.086 | 0.072 |
| 1.75 | 0.480 | 0.364 | 0.282 | 0.222 | 0.177 | 0.143 | 0.116 | 0.095 | 0.079 | 0.065 |
| 1.80 | 0.460 | 0.347 | 0.267 | 0.209 | 0.166 | 0.133 | 0.108 | 0.088 | 0.072 | 0.060 |
| 1.85 | 0.442 | 0.332 | 0.254 | 0.198 | 0.156 | 0.125 | 0.100 | 0.082 | 0.067 | 0.055 |
| 1.90 | 0.425 | 0.317 | 0.242 | 0.188 | 0.147 | 0.117 | 0.094 | 0.076 | 0.062 | 0.050 |
| 1.95 | 0.409 | 0.304 | 0.231 | 0.178 | 0.139 | 0.110 | 0.088 | 0.070 | 0.057 | 0.046 |
| 2.00 | 0.395 | 0.292 | 0.221 | 0.169 | 0.132 | 0.104 | 0.082 | 0.066 | 0.053 | 0.043 |
| 2.10 | 0.369 | 0.273 | 0.202 | 0.154 | 0.119 | 0.092 | 0.073 | 0.058 | 0.046 | 0.037 |
| 2.20 | 0.346 | 0.251 | 0.186 | 0.141 | 0.107 | 0.083 | 0.065 | 0.051 | 0.040 | 0.032 |
| 2.3 | 0.326 | 0.235 | 0.173 | 0.129 | 0.098 | 0.075 | 0.058 | 0.045 | 0.035 | 0.028 |
| 2.4 | 0.308 | 0.220 | 0.160 | 0.119 | 0.089 | 0.068 | 0.052 | 0.040 | 0.031 | 0.024 |
| 2.5 | 0.292 | 0.207 | 0.150 | 0.110 | 0.082 | 0.062 | 0.047 | 0.036 | 0.028 | 0.022 |
| 2.6 | 0.277 | 0.195 | 0.140 | 0.102 | 0.076 | 0.057 | 0.043 | 0.033 | 0.025 | 0.019 |
| 2.7 | 0.264 | 0.184 | 0.131 | 0.095 | 0.070 | 0.052 | 0.039 | 0.029 | 0.022 | 0.017 |
| 2.8 | 0.252 | 0.175 | 0.124 | 0.089 | 0.065 | 0.048 | 0.036 | 0.027 | 0.020 | 0.015 |
| 2.9 | 0.241 | 0.166 | 0.117 | 0.083 | 0.060 | 0.044 | 0.033 | 0.024 | 0.018 | 0.014 |
| 3.0 | 0.230 | 0.158 | 0.110 | 0.078 | 0.056 | 0.041 | 0.030 | 0.022 | 0.017 | 0.012 |
| 3.5 | 0.190 | 0.126 | 0.085 | 0.059 | 0.041 | 0.029 | 0.021 | 0.015 | 0.011 | 0.008 |
| 4.0 | 0.161 | 0.104 | 0.069 | 0.046 | 0.031 | 0.022 | 0.015 | 0.010 | 0.007 | 0.005 |
| 4.5 | 0.139 | 0.088 | 0.057 | 0.037 | 0.025 | 0.017 | 0.011 | 0.008 | 0.005 | 0.004 |
| 5.0 | 0.122 | 0.076 | 0.048 | 0.031 | 0.020 | 0.013 | 0.009 | 0.006 | 0.004 | 0.003 |
| 6.0 | 0.098 | 0.058 | 0.036 | 0.022 | 0.014 | 0.009 | 0.006 | 0.004 | 0.002 | 0.002 |
| 7.0 | 0.081 | 0.047 | 0.028 | 0.017 | 0.010 | 0.006 | 0.004 | 0.002 | 0.002 | 0.001 |
| 8.0 | 0.069 | 0.040 | 0.022 | 0.013 | 0.008 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 9.0 | 0.060 | 0.033 | 0.019 | 0.011 | 0.006 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 |
| 10.0 | 0.053 | 0.028 | 0.016 | 0.009 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 |
| 20.0 | 0.023 | 0.011 | 0.005 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Tabla A-1. La función de flujo variado para pendientes positivas, $F(u, N)$ (continuación)

| $\frac{N}{u}$ | 4.2 | 4.6 | 5.0 | 5.4 | 5.8 | 6.2 | 6.6 | 7.0 | 7.4 | 7.8 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.02 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 |
| 0.04 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 |
| 0.06 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 |
| 0.08 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 |
| 0.10 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 |
| 0.12 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 |
| 0.14 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 |
| 0.16 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 |
| 0.18 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 |
| 0.20 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 |
| 0.22 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 |
| 0.24 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 |
| 0.26 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 |
| 0.28 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 |
| 0.30 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 |
| 0.32 | 0.321 | 0.320 | 0.320 | 0.320 | 0.320 | 0.320 | 0.320 | 0.320 | 0.320 | 0.320 |
| 0.34 | 0.341 | 0.340 | 0.340 | 0.340 | 0.340 | 0.340 | 0.340 | 0.340 | 0.340 | 0.340 |
| 0.36 | 0.361 | 0.361 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.360 |
| 0.38 | 0.381 | 0.381 | 0.381 | 0.380 | 0.380 | 0.380 | 0.380 | 0.380 | 0.380 | 0.380 |
| 0.40 | 0.402 | 0.401 | 0.401 | 0.400 | 0.400 | 0.400 | 0.400 | 0.400 | 0.400 | 0.400 |
| 0.42 | 0.422 | 0.421 | 0.421 | 0.421 | 0.420 | 0.420 | 0.420 | 0.420 | 0.420 | 0.420 |
| 0.44 | 0.443 | 0.442 | 0.441 | 0.441 | 0.441 | 0.441 | 0.440 | 0.440 | 0.440 | 0.440 |
| 0.46 | 0.463 | 0.462 | 0.462 | 0.461 | 0.461 | 0.461 | 0.460 | 0.460 | 0.460 | 0.460 |
| 0.48 | 0.484 | 0.483 | 0.482 | 0.481 | 0.481 | 0.481 | 0.480 | 0.480 | 0.480 | 0.480 |
| 0.50 | 0.505 | 0.504 | 0.503 | 0.502 | 0.501 | 0.501 | 0.501 | 0.500 | 0.500 | 0.500 |
| 0.52 | 0.527 | 0.525 | 0.523 | 0.522 | 0.522 | 0.521 | 0.521 | 0.521 | 0.520 | 0.520 |
| 0.54 | 0.548 | 0.546 | 0.544 | 0.543 | 0.542 | 0.542 | 0.541 | 0.541 | 0.541 | 0.541 |
| 0.56 | 0.570 | 0.567 | 0.565 | 0.564 | 0.563 | 0.562 | 0.562 | 0.561 | 0.561 | 0.561 |
| 0.58 | 0.592 | 0.589 | 0.587 | 0.585 | 0.584 | 0.583 | 0.582 | 0.582 | 0.581 | 0.581 |
| 0.60 | 0.614 | 0.611 | 0.608 | 0.606 | 0.605 | 0.604 | 0.603 | 0.602 | 0.602 | 0.601 |
| 0.61 | 0.626 | 0.622 | 0.619 | 0.617 | 0.615 | 0.614 | 0.613 | 0.612 | 0.621 | 0.611 |
| 0.62 | 0.637 | 0.633 | 0.630 | 0.628 | 0.626 | 0.625 | 0.624 | 0.623 | 0.622 | 0.622 |
| 0.63 | 0.649 | 0.644 | 0.641 | 0.638 | 0.636 | 0.635 | 0.634 | 0.633 | 0.632 | 0.632 |
| 0.64 | 0.661 | 0.656 | 0.652 | 0.649 | 0.647 | 0.646 | 0.645 | 0.644 | 0.643 | 0.642 |
| 0.65 | 0.673 | 0.667 | 0.663 | 0.660 | 0.658 | 0.656 | 0.655 | 0.654 | 0.653 | 0.653 |
| 0.66 | 0.685 | 0.679 | 0.675 | 0.672 | 0.669 | 0.667 | 0.666 | 0.665 | 0.664 | 0.663 |
| 0.67 | 0.697 | 0.691 | 0.686 | 0.683 | 0.680 | 0.678 | 0.676 | 0.675 | 0.674 | 0.673 |
| 0.68 | 0.709 | 0.703 | 0.698 | 0.694 | 0.691 | 0.689 | 0.687 | 0.686 | 0.685 | 0.684 |
| 0.69 | 0.722 | 0.715 | 0.710 | 0.706 | 0.703 | 0.700 | 0.698 | 0.696 | 0.695 | 0.694 |
| 0.70 | 0.735 | 0.727 | 0.722 | 0.717 | 0.714 | 0.711 | 0.709 | 0.708 | 0.706 | 0.705 |
| 0.71 | 0.748 | 0.740 | 0.734 | 0.729 | 0.725 | 0.723 | 0.720 | 0.719 | 0.717 | 0.716 |
| 0.72 | 0.761 | 0.752 | 0.746 | 0.741 | 0.737 | 0.734 | 0.732 | 0.730 | 0.728 | 0.727 |
| 0.73 | 0.774 | 0.765 | 0.759 | 0.753 | 0.749 | 0.746 | 0.743 | 0.741 | 0.739 | 0.737 |
| 0.74 | 0.788 | 0.779 | 0.771 | 0.766 | 0.761 | 0.757 | 0.754 | 0.752 | 0.750 | 0.748 |
| 0.75 | 0.802 | 0.792 | 0.784 | 0.778 | 0.773 | 0.769 | 0.766 | 0.763 | 0.761 | 0.760 |
| 0.76 | 0.817 | 0.806 | 0.798 | 0.791 | 0.786 | 0.781 | 0.778 | 0.775 | 0.773 | 0.771 |
| 0.77 | 0.831 | 0.820 | 0.811 | 0.804 | 0.798 | 0.794 | 0.790 | 0.787 | 0.784 | 0.782 |
| 0.78 | 0.847 | 0.834 | 0.825 | 0.817 | 0.811 | 0.806 | 0.802 | 0.799 | 0.796 | 0.794 |
| 0.79 | 0.862 | 0.849 | 0.839 | 0.831 | 0.824 | 0.819 | 0.815 | 0.811 | 0.808 | 0.805 |

Tabla A-1. La función de flujo variado para pendientes positivas, $F(u, N)$ (continuación)

| $\frac{N}{u}$ | 4.2 | 4.6 | 5.0 | 5.4 | 5.8 | 6.2 | 6.6 | 7.0 | 7.4 | 7.8 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.80 | 0.878 | 0.865 | 0.854 | 0.845 | 0.838 | 0.832 | 0.828 | 0.824 | 0.820 | 0.818 |
| 0.81 | 0.895 | 0.881 | 0.869 | 0.860 | 0.852 | 0.846 | 0.841 | 0.837 | 0.833 | 0.830 |
| 0.82 | 0.912 | 0.897 | 0.885 | 0.875 | 0.867 | 0.860 | 0.854 | 0.850 | 0.846 | 0.842 |
| 0.83 | 0.931 | 0.914 | 0.901 | 0.890 | 0.881 | 0.874 | 0.868 | 0.863 | 0.859 | 0.855 |
| 0.84 | 0.949 | 0.932 | 0.918 | 0.906 | 0.897 | 0.889 | 0.883 | 0.877 | 0.873 | 0.869 |
| 0.85 | 0.969 | 0.950 | 0.935 | 0.923 | 0.913 | 0.904 | 0.897 | 0.892 | 0.887 | 0.882 |
| 0.86 | 0.990 | 0.970 | 0.954 | 0.940 | 0.930 | 0.921 | 0.913 | 0.907 | 0.901 | 0.896 |
| 0.87 | 1.012 | 0.990 | 0.973 | 0.959 | 0.947 | 0.937 | 0.929 | 0.922 | 0.916 | 0.911 |
| 0.88 | 1.035 | 1.012 | 0.994 | 0.978 | 0.966 | 0.955 | 0.946 | 0.939 | 0.932 | 0.927 |
| 0.89 | 1.060 | 1.035 | 1.015 | 0.999 | 0.986 | 0.974 | 0.964 | 0.956 | 0.949 | 0.943 |
| 0.90 | 1.087 | 1.060 | 1.039 | 1.021 | 1.007 | 0.994 | 0.984 | 0.975 | 0.967 | 0.960 |
| 0.91 | 1.116 | 1.088 | 1.064 | 1.045 | 1.029 | 1.016 | 1.004 | 0.995 | 0.986 | 0.979 |
| 0.92 | 1.148 | 1.117 | 1.092 | 1.072 | 1.054 | 1.040 | 1.027 | 1.016 | 1.007 | 0.999 |
| 0.93 | 1.184 | 1.151 | 1.123 | 1.101 | 1.081 | 1.066 | 1.052 | 1.040 | 1.030 | 1.021 |
| 0.94 | 1.225 | 1.188 | 1.158 | 1.134 | 1.113 | 1.095 | 1.080 | 1.067 | 1.055 | 1.045 |
| 0.950 | 1.272 | 1.232 | 1.199 | 1.172 | 1.149 | 1.129 | 1.112 | 1.097 | 1.085 | 1.073 |
| 0.960 | 1.329 | 1.285 | 1.248 | 1.217 | 1.191 | 1.169 | 1.150 | 1.134 | 1.119 | 1.107 |
| 0.970 | 1.402 | 1.351 | 1.310 | 1.275 | 1.245 | 1.220 | 1.198 | 1.179 | 1.163 | 1.148 |
| 0.975 | 1.447 | 1.393 | 1.348 | 1.311 | 1.279 | 1.252 | 1.228 | 1.208 | 1.190 | 1.174 |
| 0.980 | 1.502 | 1.443 | 1.395 | 1.354 | 1.319 | 1.290 | 1.264 | 1.242 | 1.222 | 1.205 |
| 0.985 | 1.573 | 1.508 | 1.454 | 1.409 | 1.371 | 1.338 | 1.310 | 1.285 | 1.263 | 1.244 |
| 0.990 | 1.671 | 1.598 | 1.537 | 1.487 | 1.443 | 1.406 | 1.373 | 1.345 | 1.320 | 1.298 |
| 0.995 | 1.838 | 1.751 | 1.678 | 1.617 | 1.565 | 1.520 | 1.481 | 1.446 | 1.415 | 1.389 |
| 0.999 | 2.238 | 2.102 | 2.002 | 1.917 | 1.845 | 1.780 | 1.725 | 1.678 | 1.635 | 1.596 |
| 1.000 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 1.001 | 1.417 | 1.264 | 1.138 | 1.033 | 0.951 | 0.870 | 0.803 | 0.746 | 0.697 | 0.651 |
| 1.005 | 1.036 | 0.915 | 0.817 | 0.736 | 0.669 | 0.611 | 0.562 | 0.519 | 0.481 | 0.448 |
| 1.010 | 0.873 | 0.766 | 0.681 | 0.610 | 0.551 | 0.501 | 0.459 | 0.422 | 0.390 | 0.361 |
| 1.015 | 0.778 | 0.680 | 0.602 | 0.537 | 0.483 | 0.438 | 0.399 | 0.366 | 0.337 | 0.311 |
| 1.02 | 0.711 | 0.620 | 0.546 | 0.486 | 0.436 | 0.394 | 0.358 | 0.327 | 0.300 | 0.277 |
| 1.03 | 0.618 | 0.535 | 0.469 | 0.415 | 0.370 | 0.332 | 0.300 | 0.273 | 0.250 | 0.229 |
| 1.04 | 0.554 | 0.477 | 0.415 | 0.365 | 0.324 | 0.290 | 0.261 | 0.236 | 0.215 | 0.196 |
| 1.05 | 0.504 | 0.432 | 0.374 | 0.328 | 0.290 | 0.258 | 0.231 | 0.205 | 0.189 | 0.172 |
| 1.06 | 0.464 | 0.396 | 0.342 | 0.298 | 0.262 | 0.232 | 0.207 | 0.186 | 0.168 | 0.152 |
| 1.07 | 0.431 | 0.366 | 0.315 | 0.273 | 0.239 | 0.211 | 0.188 | 0.168 | 0.151 | 0.136 |
| 1.08 | 0.403 | 0.341 | 0.292 | 0.252 | 0.220 | 0.194 | 0.172 | 0.153 | 0.137 | 0.123 |
| 1.09 | 0.379 | 0.319 | 0.272 | 0.234 | 0.204 | 0.179 | 0.158 | 0.140 | 0.125 | 0.112 |
| 1.10 | 0.357 | 0.299 | 0.254 | 0.218 | 0.189 | 0.165 | 0.145 | 0.129 | 0.114 | 0.102 |
| 1.11 | 0.338 | 0.282 | 0.239 | 0.204 | 0.176 | 0.154 | 0.135 | 0.119 | 0.105 | 0.094 |
| 1.12 | 0.321 | 0.267 | 0.225 | 0.192 | 0.165 | 0.143 | 0.125 | 0.110 | 0.097 | 0.086 |
| 1.13 | 0.305 | 0.253 | 0.212 | 0.181 | 0.155 | 0.134 | 0.117 | 0.102 | 0.090 | 0.080 |
| 1.14 | 0.291 | 0.240 | 0.201 | 0.170 | 0.146 | 0.126 | 0.109 | 0.095 | 0.084 | 0.074 |
| 1.15 | 0.278 | 0.229 | 0.191 | 0.161 | 0.137 | 0.118 | 0.102 | 0.089 | 0.078 | 0.068 |
| 1.16 | 0.266 | 0.218 | 0.181 | 0.153 | 0.130 | 0.111 | 0.096 | 0.083 | 0.072 | 0.064 |
| 1.17 | 0.254 | 0.208 | 0.173 | 0.145 | 0.123 | 0.105 | 0.090 | 0.078 | 0.068 | 0.059 |
| 1.18 | 0.244 | 0.199 | 0.165 | 0.138 | 0.116 | 0.099 | 0.085 | 0.073 | 0.063 | 0.055 |
| 1.19 | 0.235 | 0.191 | 0.157 | 0.131 | 0.110 | 0.093 | 0.080 | 0.069 | 0.059 | 0.052 |
| 1.20 | 0.226 | 0.183 | 0.150 | 0.125 | 0.105 | 0.089 | 0.076 | 0.065 | 0.056 | 0.048 |
| 1.22 | 0.209 | 0.168 | 0.138 | 0.114 | 0.095 | 0.080 | 0.067 | 0.057 | 0.049 | 0.042 |
| 1.24 | 0.195 | 0.156 | 0.127 | 0.104 | 0.086 | 0.072 | 0.061 | 0.051 | 0.044 | 0.037 |

BIBLIOTECA E INFORMACION
CULTURAL
U.N.S.C.H.

Tabla A-1. La función de flujo variado para pendientes positivas, $F(u, N)$ (continuación)

| N u | 4.2 | 4.6 | 5.0 | 5.4 | 5.8 | 6.2 | 6.6 | 7.0 | 7.4 | 7.8 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.26 | 0.182 | 0.145 | 0.117 | 0.095 | 0.079 | 0.065 | 0.055 | 0.046 | 0.039 | 0.033 |
| 1.28 | 0.170 | 0.135 | 0.108 | 0.088 | 0.072 | 0.059 | 0.049 | 0.041 | 0.035 | 0.030 |
| 1.30 | 0.160 | 0.126 | 0.100 | 0.081 | 0.066 | 0.054 | 0.045 | 0.037 | 0.031 | 0.026 |
| 1.32 | 0.150 | 0.118 | 0.093 | 0.075 | 0.061 | 0.050 | 0.041 | 0.034 | 0.028 | 0.024 |
| 1.34 | 0.142 | 0.110 | 0.087 | 0.069 | 0.056 | 0.045 | 0.037 | 0.031 | 0.025 | 0.021 |
| 1.36 | 0.134 | 0.103 | 0.081 | 0.064 | 0.052 | 0.042 | 0.034 | 0.028 | 0.023 | 0.019 |
| 1.38 | 0.127 | 0.097 | 0.076 | 0.060 | 0.048 | 0.038 | 0.031 | 0.025 | 0.021 | 0.017 |
| 1.40 | 0.120 | 0.092 | 0.071 | 0.056 | 0.044 | 0.035 | 0.029 | 0.023 | 0.019 | 0.015 |
| 1.42 | 0.114 | 0.087 | 0.067 | 0.052 | 0.041 | 0.033 | 0.026 | 0.021 | 0.017 | 0.014 |
| 1.44 | 0.108 | 0.082 | 0.063 | 0.049 | 0.038 | 0.030 | 0.024 | 0.019 | 0.016 | 0.013 |
| 1.46 | 0.103 | 0.077 | 0.059 | 0.046 | 0.036 | 0.028 | 0.022 | 0.018 | 0.014 | 0.011 |
| 1.48 | 0.098 | 0.073 | 0.056 | 0.043 | 0.033 | 0.026 | 0.021 | 0.016 | 0.013 | 0.010 |
| 1.50 | 0.093 | 0.069 | 0.053 | 0.040 | 0.031 | 0.024 | 0.019 | 0.015 | 0.012 | 0.010 |
| 1.55 | 0.083 | 0.061 | 0.046 | 0.035 | 0.026 | 0.020 | 0.016 | 0.012 | 0.010 | 0.008 |
| 1.60 | 0.074 | 0.054 | 0.040 | 0.030 | 0.023 | 0.017 | 0.013 | 0.010 | 0.008 | 0.006 |
| 1.65 | 0.067 | 0.048 | 0.035 | 0.026 | 0.019 | 0.014 | 0.011 | 0.008 | 0.006 | 0.005 |
| 1.70 | 0.060 | 0.043 | 0.031 | 0.023 | 0.017 | 0.012 | 0.009 | 0.007 | 0.005 | 0.004 |
| 1.75 | 0.054 | 0.038 | 0.027 | 0.020 | 0.014 | 0.010 | 0.008 | 0.006 | 0.004 | 0.003 |
| 1.80 | 0.049 | 0.035 | 0.024 | 0.017 | 0.013 | 0.009 | 0.007 | 0.005 | 0.004 | 0.003 |
| 1.85 | 0.045 | 0.031 | 0.022 | 0.015 | 0.011 | 0.008 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.002 |
| 1.90 | 0.041 | 0.028 | 0.020 | 0.014 | 0.010 | 0.007 | 0.005 | 0.004 | 0.003 | 0.002 |
| 1.95 | 0.038 | 0.026 | 0.018 | 0.012 | 0.009 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.002 |
| 2.00 | 0.035 | 0.023 | 0.016 | 0.011 | 0.008 | 0.005 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.001 |
| 2.10 | 0.030 | 0.020 | 0.013 | 0.009 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 2.20 | 0.025 | 0.016 | 0.011 | 0.007 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 2.3 | 0.022 | 0.014 | 0.009 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 2.4 | 0.019 | 0.012 | 0.008 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 |
| 2.5 | 0.017 | 0.010 | 0.006 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| 2.6 | 0.015 | 0.009 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| 2.7 | 0.013 | 0.008 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.8 | 0.012 | 0.007 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.9 | 0.010 | 0.006 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 3.0 | 0.009 | 0.005 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 3.5 | 0.006 | 0.003 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 4.0 | 0.004 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 4.5 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5.0 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 6.0 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 7.0 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 8.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 9.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Tabla A-1. La función de flujo variado para pendientes positivas, $F(u, N)$ (continuación)

| $N \backslash u$ | 8.2 | 8.6 | 9.0 | 9.4 | 9.8 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.02 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.020 |
| 0.04 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 |
| 0.06 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 |
| 0.08 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 | 0.080 |
| 0.10 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 | 0.100 |
| 0.12 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 |
| 0.14 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 |
| 0.16 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 | 0.160 |
| 0.18 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 | 0.180 |
| 0.20 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 |
| 0.22 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 | 0.220 |
| 0.24 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 | 0.240 |
| 0.26 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 | 0.260 |
| 0.28 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 |
| 0.30 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 | 0.300 |
| 0.32 | 0.320 | 0.320 | 0.320 | 0.320 | 0.320 |
| 0.34 | 0.340 | 0.340 | 0.340 | 0.340 | 0.340 |
| 0.36 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.360 | 0.360 |
| 0.38 | 0.380 | 0.380 | 0.380 | 0.380 | 0.380 |
| 0.40 | 0.400 | 0.400 | 0.400 | 0.400 | 0.400 |
| 0.42 | 0.420 | 0.420 | 0.420 | 0.420 | 0.420 |
| 0.44 | 0.440 | 0.440 | 0.440 | 0.440 | 0.440 |
| 0.46 | 0.460 | 0.460 | 0.460 | 0.460 | 0.460 |
| 0.48 | 0.480 | 0.480 | 0.480 | 0.480 | 0.480 |
| 0.50 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.500 | 0.500 |
| 0.52 | 0.520 | 0.520 | 0.520 | 0.520 | 0.520 |
| 0.54 | 0.540 | 0.540 | 0.540 | 0.540 | 0.540 |
| 0.56 | 0.561 | 0.560 | 0.560 | 0.560 | 0.560 |
| 0.58 | 0.581 | 0.581 | 0.580 | 0.580 | 0.580 |
| 0.60 | 0.601 | 0.601 | 0.601 | 0.600 | 0.600 |
| 0.61 | 0.611 | 0.611 | 0.611 | 0.611 | 0.610 |
| 0.62 | 0.621 | 0.621 | 0.621 | 0.621 | 0.621 |
| 0.63 | 0.632 | 0.631 | 0.631 | 0.631 | 0.631 |
| 0.64 | 0.642 | 0.641 | 0.641 | 0.641 | 0.641 |
| 0.65 | 0.652 | 0.652 | 0.651 | 0.651 | 0.651 |
| 0.66 | 0.662 | 0.662 | 0.662 | 0.661 | 0.661 |
| 0.67 | 0.673 | 0.672 | 0.672 | 0.672 | 0.671 |
| 0.68 | 0.683 | 0.683 | 0.682 | 0.682 | 0.681 |
| 0.69 | 0.694 | 0.693 | 0.692 | 0.692 | 0.692 |
| 0.70 | 0.704 | 0.704 | 0.703 | 0.702 | 0.702 |
| 0.71 | 0.715 | 0.714 | 0.713 | 0.713 | 0.712 |
| 0.72 | 0.726 | 0.725 | 0.724 | 0.723 | 0.723 |
| 0.73 | 0.736 | 0.735 | 0.734 | 0.734 | 0.733 |
| 0.74 | 0.747 | 0.746 | 0.745 | 0.744 | 0.744 |
| 0.75 | 0.758 | 0.757 | 0.756 | 0.755 | 0.754 |
| 0.76 | 0.769 | 0.768 | 0.767 | 0.766 | 0.765 |
| 0.77 | 0.780 | 0.779 | 0.778 | 0.777 | 0.776 |
| 0.78 | 0.792 | 0.790 | 0.789 | 0.788 | 0.787 |
| 0.79 | 0.804 | 0.802 | 0.800 | 0.799 | 0.798 |

Tabla A-1. La función de flujo variado para pendientes positivas, $F(u, N)$ (continuación)

| $\frac{N}{u}$ | 8.2 | 8.6 | 9.0 | 9.4 | 9.8 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.80 | 0.815 | 0.813 | 0.811 | 0.810 | 0.809 |
| 0.81 | 0.827 | 0.826 | 0.823 | 0.822 | 0.820 |
| 0.82 | 0.839 | 0.837 | 0.835 | 0.833 | 0.831 |
| 0.83 | 0.852 | 0.849 | 0.847 | 0.845 | 0.844 |
| 0.84 | 0.865 | 0.862 | 0.860 | 0.858 | 0.856 |
| 0.85 | 0.878 | 0.875 | 0.873 | 0.870 | 0.868 |
| 0.86 | 0.892 | 0.889 | 0.886 | 0.883 | 0.881 |
| 0.87 | 0.907 | 0.903 | 0.900 | 0.897 | 0.894 |
| 0.88 | 0.921 | 0.918 | 0.914 | 0.911 | 0.908 |
| 0.89 | 0.937 | 0.933 | 0.929 | 0.925 | 0.922 |
| 0.90 | 0.954 | 0.949 | 0.944 | 0.940 | 0.937 |
| 0.91 | 0.972 | 0.967 | 0.961 | 0.957 | 0.953 |
| 0.92 | 0.991 | 0.986 | 0.980 | 0.975 | 0.970 |
| 0.93 | 1.012 | 1.006 | 0.999 | 0.994 | 0.989 |
| 0.94 | 1.036 | 1.029 | 1.022 | 1.016 | 1.010 |
| 0.950 | 1.062 | 1.055 | 1.047 | 1.040 | 1.033 |
| 0.960 | 1.097 | 1.085 | 1.074 | 1.063 | 1.053 |
| 0.970 | 1.136 | 1.124 | 1.112 | 1.100 | 1.087 |
| 0.975 | 1.157 | 1.147 | 1.134 | 1.122 | 1.108 |
| 0.980 | 1.187 | 1.175 | 1.160 | 1.150 | 1.132 |
| 0.985 | 1.224 | 1.210 | 1.196 | 1.183 | 1.165 |
| 0.990 | 1.275 | 1.260 | 1.243 | 1.228 | 1.208 |
| 0.995 | 1.363 | 1.342 | 1.320 | 1.302 | 1.280 |
| 0.999 | 1.560 | 1.530 | 1.500 | 1.476 | 1.447 |
| 1.000 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 1.001 | 0.614 | 0.577 | 0.546 | 0.519 | 0.494 |
| 1.005 | 0.420 | 0.391 | 0.368 | 0.350 | 0.331 |
| 1.010 | 0.337 | 0.313 | 0.294 | 0.278 | 0.262 |
| 1.015 | 0.289 | 0.269 | 0.255 | 0.237 | 0.223 |
| 1.020 | 0.257 | 0.237 | 0.221 | 0.209 | 0.196 |
| 1.03 | 0.212 | 0.195 | 0.181 | 0.170 | 0.159 |
| 1.04 | 0.173 | 0.165 | 0.152 | 0.143 | 0.134 |
| 1.05 | 0.158 | 0.143 | 0.132 | 0.124 | 0.115 |
| 1.06 | 0.140 | 0.127 | 0.116 | 0.106 | 0.098 |
| 1.07 | 0.123 | 0.112 | 0.102 | 0.094 | 0.086 |
| 1.08 | 0.111 | 0.101 | 0.092 | 0.084 | 0.077 |
| 1.09 | 0.101 | 0.091 | 0.082 | 0.075 | 0.069 |
| 1.10 | 0.092 | 0.083 | 0.074 | 0.067 | 0.062 |
| 1.11 | 0.084 | 0.075 | 0.067 | 0.060 | 0.055 |
| 1.12 | 0.077 | 0.069 | 0.062 | 0.055 | 0.050 |
| 1.13 | 0.071 | 0.063 | 0.056 | 0.050 | 0.045 |
| 1.14 | 0.065 | 0.058 | 0.052 | 0.046 | 0.041 |
| 1.15 | 0.061 | 0.054 | 0.048 | 0.043 | 0.038 |
| 1.16 | 0.056 | 0.050 | 0.045 | 0.040 | 0.035 |
| 1.17 | 0.052 | 0.046 | 0.041 | 0.036 | 0.032 |
| 1.18 | 0.048 | 0.042 | 0.037 | 0.033 | 0.029 |
| 1.19 | 0.045 | 0.039 | 0.034 | 0.030 | 0.027 |
| 1.20 | 0.043 | 0.037 | 0.032 | 0.028 | 0.025 |
| 1.22 | 0.037 | 0.032 | 0.028 | 0.024 | 0.021 |
| 1.24 | 0.032 | 0.028 | 0.024 | 0.021 | 0.018 |

Tabla A-1. La función de flujo variado para pendientes positivas, $F(u, N)$ (continuación)

| $N \backslash u$ | 8.2 | 8.6 | 9.0 | 9.4 | 9.8 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.26 | 0.028 | 0.024 | 0.021 | 0.018 | 0.016 |
| 1.28 | 0.025 | 0.021 | 0.018 | 0.016 | 0.014 |
| 1.30 | 0.022 | 0.019 | 0.016 | 0.014 | 0.012 |
| 1.32 | 0.020 | 0.017 | 0.014 | 0.012 | 0.010 |
| 1.34 | 0.018 | 0.015 | 0.012 | 0.010 | 0.009 |
| 1.36 | 0.016 | 0.013 | 0.011 | 0.009 | 0.008 |
| 1.38 | 0.014 | 0.012 | 0.010 | 0.008 | 0.007 |
| 1.40 | 0.013 | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.006 |
| 1.42 | 0.011 | 0.009 | 0.008 | 0.006 | 0.005 |
| 1.44 | 0.010 | 0.008 | 0.007 | 0.006 | 0.005 |
| 1.46 | 0.009 | 0.008 | 0.006 | 0.005 | 0.004 |
| 1.48 | 0.009 | 0.007 | 0.005 | 0.004 | 0.004 |
| 1.50 | 0.008 | 0.006 | 0.005 | 0.004 | 0.003 |
| 1.55 | 0.006 | 0.005 | 0.004 | 0.003 | 0.003 |
| 1.60 | 0.005 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.002 |
| 1.65 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.001 |
| 1.70 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 1.75 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.001 |
| 1.80 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 1.85 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| 1.90 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 |
| 1.95 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| 2.00 | 0.001 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.10 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.20 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.3 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.4 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.5 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.6 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.7 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.8 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.9 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 3.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 3.5 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 4.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 4.5 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 5.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 6.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 7.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 8.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 9.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 10.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Apéndice B: Tabla N° 12.03 funciones de Bresse para curvas de remanso

| Z | $\varnothing(Z)$ | Z | $\varnothing(Z)$ | Z | $\varnothing(Z)$ | Z | $\varnothing(Z)$ |
|-------|------------------|-------|------------------|------|------------------|----------|------------------|
| 1.000 | ∞ | 1.054 | 0.8714 | 1.29 | 0.3816 | 2.30 | 0.0978 |
| 1.001 | 2.1837 | 1.056 | 0.8599 | 1.30 | 0.3731 | 2.35 | 0.0935 |
| 1.002 | 1.9530 | 1.058 | 0.8499 | 1.31 | 0.3649 | 2.40 | 0.0894 |
| 1.003 | 1.8182 | 1.060 | 0.8382 | 1.32 | 0.3570 | 2.45 | 0.0857 |
| 1.004 | 1.7226 | 1.062 | 0.8279 | 1.33 | 0.3495 | 2.50 | 0.0821 |
| 1.005 | 1.6486 | 1.064 | 0.8180 | 1.34 | 0.3422 | 2.55 | 0.0788 |
| 1.006 | 1.5881 | 1.066 | 0.8084 | 1.35 | 0.3352 | 2.60 | 0.0757 |
| 1.007 | 1.5371 | 1.068 | 0.7990 | 1.36 | 0.3285 | 2.65 | 0.0728 |
| 1.008 | 1.4929 | 1.070 | 0.7900 | 1.37 | 0.3220 | 2.70 | 0.0700 |
| 1.009 | 1.4540 | 1.072 | 0.7813 | 1.38 | 0.3158 | 2.75 | 0.0674 |
| 1.010 | 1.4192 | 1.074 | 0.7728 | 1.39 | 0.3098 | 2.80 | 0.0650 |
| 1.011 | 1.3878 | 1.076 | 0.7645 | 1.40 | 0.3039 | 2.85 | 0.0626 |
| 1.012 | 1.3591 | 1.078 | 0.7565 | 1.41 | 0.2983 | 2.90 | 0.0604 |
| 1.013 | 1.3327 | 1.080 | 0.7487 | 1.42 | 0.2928 | 2.95 | 0.0584 |
| 1.014 | 1.3083 | 1.082 | 0.7411 | 1.43 | 0.2875 | 3.0 | 0.0564 |
| 1.015 | 1.2857 | 1.084 | 0.7337 | 1.44 | 0.2824 | 3.1 | 0.0527 |
| 1.016 | 1.2645 | 1.086 | 0.7265 | 1.45 | 0.2775 | 3.2 | 0.0494 |
| 1.017 | 1.2446 | 1.088 | 0.7194 | 1.46 | 0.2680 | 3.3 | 0.0464 |
| 1.018 | 1.2259 | 1.090 | 0.7126 | 1.47 | 0.2727 | 3.4 | 0.0437 |
| 1.019 | 1.2082 | 1.092 | 0.7059 | 1.48 | 0.2635 | 3.5 | 0.0412 |
| 1.020 | 1.1914 | 1.094 | 0.6993 | 1.49 | 0.2591 | 3.6 | 0.0389 |
| 1.021 | 1.1755 | 1.096 | 0.6929 | 1.50 | 0.2548 | 3.7 | 0.0368 |
| 1.022 | 1.1603 | 1.098 | 0.6867 | 1.52 | 0.2466 | 3.8 | 0.0349 |
| 1.023 | 1.1458 | 1.100 | 0.6806 | 1.54 | 0.2389 | 3.9 | 0.0331 |
| 1.024 | 1.1320 | 1.105 | 0.6659 | 1.56 | 0.2315 | 4.0 | 0.0315 |
| 1.025 | 1.1187 | 1.110 | 0.6519 | 1.58 | 0.2246 | 4.1 | 0.0299 |
| 1.026 | 1.1060 | 1.115 | 0.6387 | 1.60 | 0.2179 | 4.2 | 0.0285 |
| 1.027 | 1.0937 | 1.120 | 0.6260 | 1.62 | 0.2116 | 4.3 | 0.0272 |
| 1.028 | 1.0819 | 1.125 | 0.6139 | 1.64 | 0.2056 | 4.4 | 0.0259 |
| 1.029 | 1.0706 | 1.130 | 0.6025 | 1.66 | 0.1999 | 4.5 | 0.0248 |
| 1.030 | 1.0596 | 1.135 | 0.5913 | 1.68 | 0.1944 | 4.6 | 0.0237 |
| 1.031 | 1.0490 | 1.140 | 0.5808 | 1.70 | 0.1892 | 4.7 | 0.0227 |
| 1.032 | 1.0387 | 1.145 | 0.5707 | 1.72 | 0.1842 | 4.8 | 0.0218 |
| 1.033 | 1.0288 | 1.150 | 0.5608 | 1.74 | 0.1794 | 4.9 | 0.0209 |
| 1.034 | 1.0191 | 1.155 | 0.5514 | 1.76 | 0.1748 | 5.0 | 0.0201 |
| 1.035 | 1.0098 | 1.160 | 0.5423 | 1.78 | 0.1704 | 5.5 | 0.0166 |
| 1.036 | 1.0007 | 1.165 | 0.5335 | 1.80 | 0.1662 | 6.0 | 0.0139 |
| 1.037 | 0.9919 | 1.170 | 0.5251 | 1.82 | 0.1621 | 6.5 | 0.0118 |
| 1.038 | 0.9634 | 1.175 | 0.5169 | 1.84 | 0.1582 | 7.0 | 0.0102 |
| 1.039 | 0.9750 | 1.180 | 0.5090 | 1.86 | 0.1545 | 7.5 | 0.0089 |
| 1.040 | 0.9669 | 1.185 | 0.5014 | 1.88 | 0.1509 | 8.0 | 0.0077 |
| 1.041 | 0.9590 | 1.190 | 0.4939 | 1.90 | 0.1474 | 8.5 | 0.0069 |
| 1.042 | 0.9513 | 1.195 | 0.4868 | 1.92 | 0.1440 | 9.0 | 0.0062 |
| 1.043 | 0.9438 | 1.20 | 0.4798 | 1.94 | 0.1408 | 9.5 | 0.0055 |
| 1.044 | 0.9354 | 1.21 | 0.4664 | 1.96 | 0.1377 | 10.0 | 0.0050 |
| 1.045 | 0.9293 | 1.22 | 0.4538 | 1.98 | 0.1347 | 12 | 0.0035 |
| 1.046 | 0.9223 | 1.23 | 0.4419 | 2.00 | 0.1318 | 15 | 0.0022 |
| 1.047 | 0.9154 | 1.24 | 0.4306 | 2.05 | 0.1249 | 20 | 0.0013 |
| 1.048 | 0.9087 | 1.25 | 0.4196 | 2.10 | 0.1186 | 30 | 0.0006 |
| 1.049 | 0.9022 | 1.26 | 0.4096 | 2.15 | 0.1128 | 50 | 0.0002 |
| 1.050 | 0.8958 | 1.27 | 0.3998 | 2.20 | 0.1074 | 100 | 0.0001 |
| 1.052 | 0.8834 | 1.28 | 0.3905 | 2.25 | 0.1024 | ∞ | 0.0000 |

13.0 MURO DE ENCAUZAMIENTO

13.1) ASPECTOS GENERALES

Los muros de encauzamiento tienen como finalidad resistir las presiones laterales o empuje producido por el material retenido en ellos, su estabilidad la deben fundamentalmente al peso propio y al peso del material que está sobre su fundación. Los muros de encauzamiento se comportan básicamente como voladizos empotrados en su base.

Bale recalcar que el muro de encauzamiento tiene diferentes dimensiones tanto aguas arriba como aguas abajo del barraje, debido a que el muro soporta diferentes cargas.

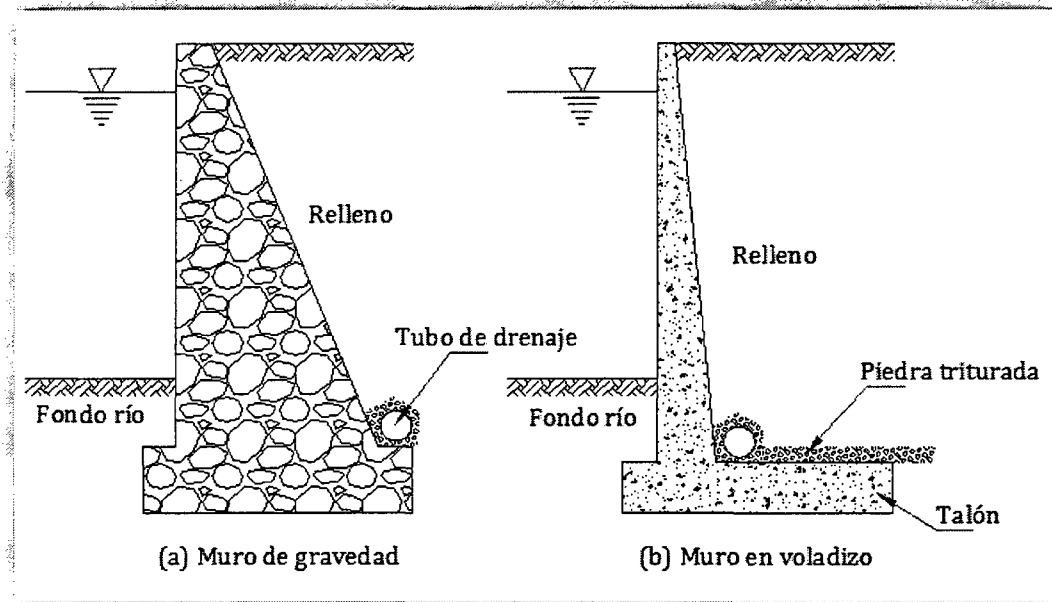
El muro de encauzamiento aguas arriba se extiende desde el barraje hasta el inicio de la curva de remanso. Mientras que el muro aguas abajo inicia desde el barraje hasta el final del dissipador de energía, o puede extenderse hasta el final del enrocado o escollera.

Los muros de sostenimiento que trataremos en este capítulo son los siguientes:

- Muros de gravedad
- Muros de voladizo

El muro de gravedad (ver figura N° 13.01a) basa su estabilidad en su peso propio. Son económicos para muros hasta de 3m de altura. Por lo general son de concreto simple o mampostería. Los muros en voladizo son siempre de concreto armado y se utilizan para alturas hasta de 8m. en este caso, el peso del relleno por encima del talón, además del peso propio del muro, contribuye a la estabilidad de la estructura. Puesto que el cuerpo trabaja como un voladizo vertical, se espesor requerido aumenta rápidamente con el incremento de la altura del muro.

Figura N° 13.01: Tipo de muros



13.2) CARGAS QUE ACTÚAN SOBRE LOS MUROS

Los muros de sostenimiento están sometidos al empuje activo y pasivo del suelo, a su peso propio y del relleno, a la reacción vertical del terreno, a la fricción en la base, a sobrecargas, presión del agua y supresión en la base.

13.2.1) Empuje del suelo

Con respecto a su comportamiento físico, los suelos y otras masas granulares ocupan una posición intermedia entre los líquidos y los sólidos. Si se descarga arena desde un volquete, éste fluye pero, a diferencia de un líquido sin fracción, no asumirá una superficie horizontal, se mantiene por sí misma en una pila estable cuyos lados forman un ángulo de reposo con la horizontal, a la cual se le denomina ángulo de fricción interna, cuya tangente es casi igual al coeficiente de fricción intergranular.

Si se construye un muro en contacto con un sólido, por ejemplo, un corte en roca, no se ejercerá presión ésta. Por otro lado, si un muro contiene líquido, estará sometido a la presión hidrostática $h * \gamma_w$, donde γ_w es el peso específico del agua y h es la distancia desde la superficie. Asimismo, si un muro vertical contiene suelo, la presión de tierra aumenta en forma proporcional a la profundidad, pero su magnitud es $C_o * h * \gamma_s$, siendo γ_s el peso específico del suelo, C_o coeficiente de presión de tierra en reposo.

El empuje del suelo es un parámetro difícil de estimar. Existen muchas teorías en mecánica de suelos para su determinación, cada uno con limitaciones para su aplicación. El comportamiento de los suelos granulares es diferente que el de los suelos cohesivos. La magnitud de estas presiones fue analizada por Rankine, Coulomb y otros. Entonces, de acuerdo con Rankine, el coeficiente de presión activa del suelo es:

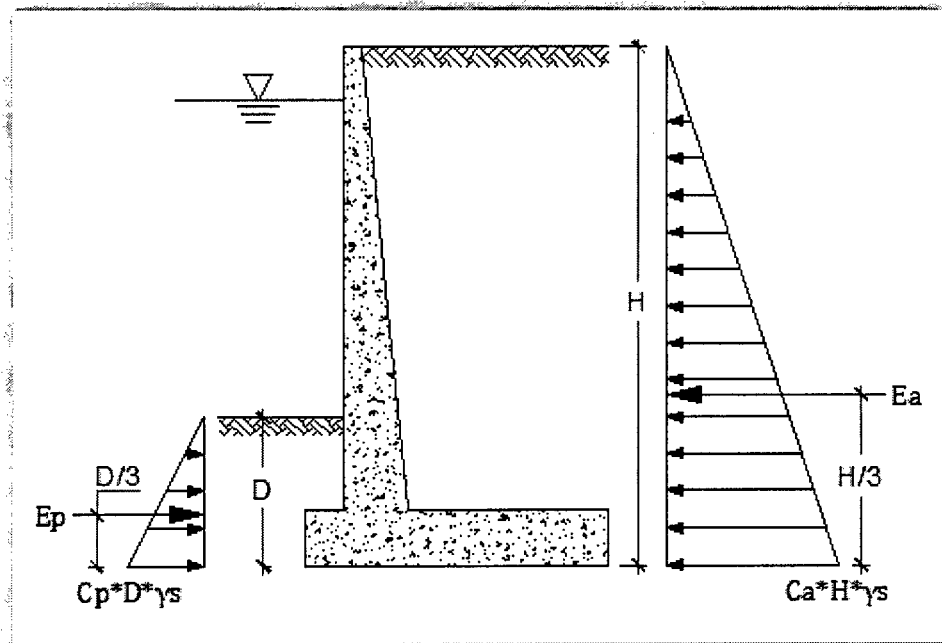
$$C_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad \dots 13.01$$

Y el coeficiente de presión pasiva es:

$$C_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \dots 13.02$$

La teoría de Rankine es válida sólo para suelos no cohesivos como arenas y gravas, pero con los correspondientes ajustes se pueden utilizar también en forma apropiada para suelos arcillosos cohesivos.

Figura N° 13.02: Empuje del suelo sobre muros de sostenimiento



La resultante del empuje activo y pasivo es igual a:

$$E_a = \frac{1}{2} * C_a * \gamma_s * H^2 \quad \dots 13.03$$

$$E_p = \frac{1}{2} * C_p * (\gamma_{sat} - \gamma_w) * D^2 \quad \dots 13.04$$

Donde:

γ_s : Peso específico del suelo, en kg/m³.

ϕ : Angulo de fricción interna del suelo.

C_a, C_p : Coeficiente de presión del suelo.

γ_{sat} : Peso específico del suelo saturado, en kg/m³.

γ_w : Peso específico del agua, en kg/m³.

En la tabla N° 13.01 se muestra algunos valores referenciales del peso específico y ángulo de fricción interna para algunos tipos de terrenos.

Tabla N° 13.01: Peso específico y ángulo de fricción interna para algunos tipos de suelo.

| TIPO DE TERRENO | γ_s (kg/m ³) | ϕ (°) |
|------------------------------------|---------------------------------|------------|
| Arcilla suave | 1440 a 1920 | 0° - 15° |
| Arcilla media | 1600 a 1920 | 15° - 30° |
| Limo seco y suelto | 1600 a 1920 | 27° - 30° |
| Limo denso | 1760 a 1920 | 30° - 35° |
| Arena suelta y grava | 1600 a 2100 | 30° - 40° |
| Arena densa y grava | 1920 a 2100 | 25° - 35° |
| Arena suelta, seca y bien graduada | 1840 a 2100 | 33° - 35° |
| Arena densa, seca y bien graduada | 1920 a 2100 | 42° - 46° |

13.2.2) Empuje del agua

La cara principal del muro de encauzamiento está en contacto con agua, por esta razón el agua produce una fuerza de empuje sobre el muro, y se determina de la siguiente manera:

$$E_w = \frac{1}{2} * \gamma_w * h^2 \quad \dots 13.05$$

13.2.3) Empuje producido por la sobrecarga en el relleno

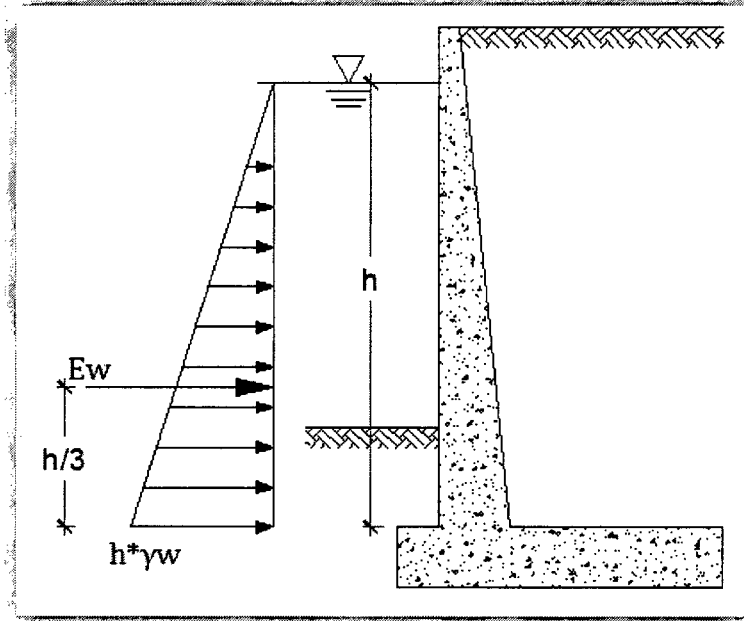
El efecto de la sobrecarga en el relleno produce un efecto similar al generado por un incremento h_s , en la altura de relleno, donde:

$$h_s = \frac{S/C}{\gamma_s} \quad \dots 13.06$$

Donde:

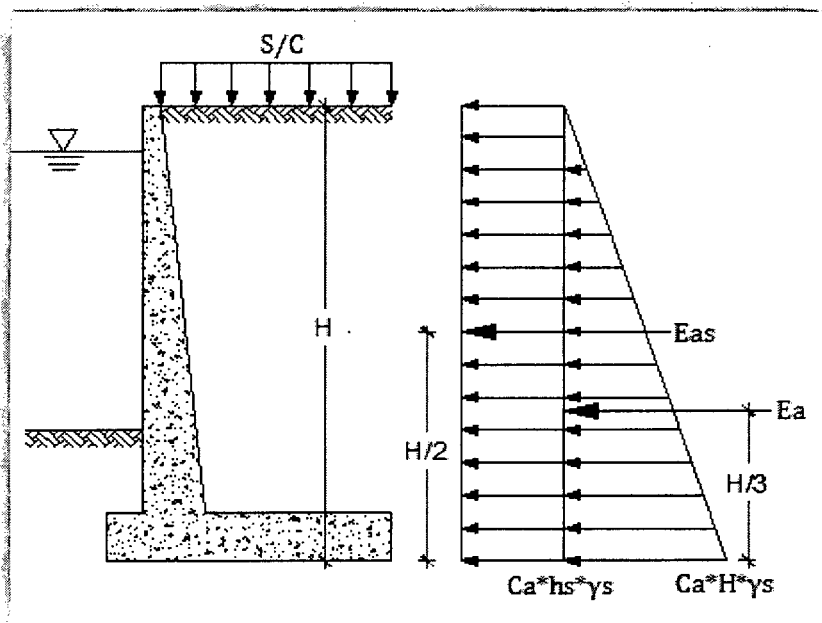
S/C : Sobrecarga en el relleno, en kg/m^2 .

Figura N° 13.03: Empuje del agua sobre muro de encauzamiento



Esta expresión es válida solo si la sobrecarga es uniforme en todo el relleno (ver figura N° 13.04).

Figura N° 13.04: Empuje debido a una sobrecarga uniforme sobre relleno

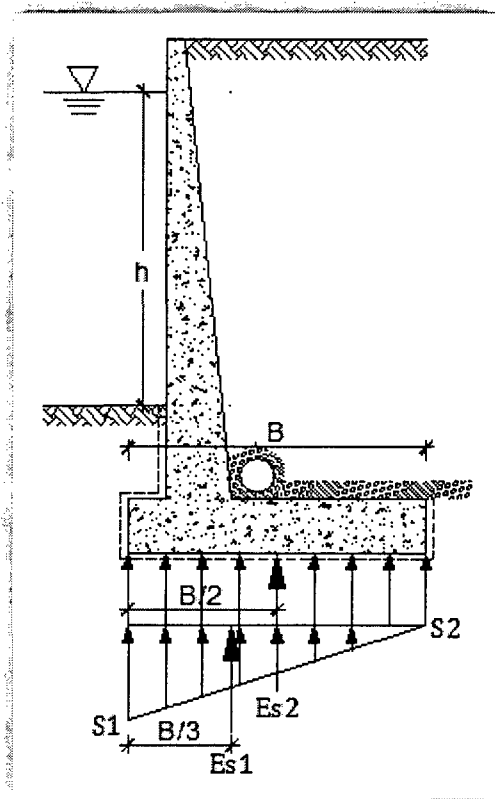


13.2.4) Empuje por la supresión del agua

El nivel del agua en el río produce filtración a través del suelo de cimentación, la cual genera supresión en la base de la estructura. Esta fuerza puede atentar contra la estabilidad de la estructura, por esta razón debe ser considerada en el diseño de esta estructura.

Para definir la supresión en la base de la estructura se usará el método de Lane desarrollada en el capítulo X.

Figura N° 13.05: Empuje debido a la supresión



13.2.5) Fricción concreto – suelo

La fricción en la base es igual a la reacción del suelo multiplicada por el coeficiente de fricción entre el suelo y el concreto. El coeficiente de fricción para algunos tipos de suelos se muestra a continuación:

Tabla N° 13.02: Valores de Coeficiente de fricción concreto – suelo.

| COEFICIENTE DE FRICCIÓN CONCRETO - SUELO | f |
|---|-----------|
| Concreto - arena o grava sin partículas finas, altamente permeable. | 0.5 - 0.6 |
| Concreto - arena o grava con mezcla de limo, baja permeabilidad. | 0.4 - 0.5 |
| Concreto - arena limosa, arena y grava con alto contenido de arcilla. | 0.3 - 0.4 |
| Concreto - arcilla media o rígida. | 0.2 - 0.4 |
| Concreto - arcilla blanda, limo. | 0.2 - 0.3 |

Para el ángulo de fricción entre el concreto – suelo, y el ángulo de fricción interna, la siguiente relación es aproximadamente igual.

$$\omega = \frac{2}{3}\phi \rightarrow f = \tan \omega \quad \dots 13.07$$

Donde:

ϕ : Ángulo de fricción interna, en grados.

13.2.6) Reacción del terreno

La reacción del terreno será definido en el siguiente ítem, cuando se determine la estabilidad del muro.

13.3) ESTABILIDAD DEL MURO

Un muro puede fallar de dos maneras diferentes: (1) las partes individuales pueden no ser suficientemente fuertes para resistir las fuerzas que actúan, como cuando un muro en voladizo vertical se agrieta por la acción de la presión de tierra que actúa sobre él, y el (2) el muro como un todo puede desplazarse por la presión de las fuerzas actuantes, sin que se produzca rotura interna. Para diseñar contra la primera posibilidad se requiere la determinación de las dimensiones, espesores y refuerzos necesarios para resistir los momentos y los cortantes, este procedimiento no es en ningún momento diferente del utilizado para calcular las dimensiones y el refuerzo que se requieren en otros tipos de estructuras de concreto. Pueden aplicarse los factores de carga y los

coeficientes de reducción de resistencia usuales estipulados por el código ACI (Ver ítem 13.9).

Para salvaguardar el muro contra desplazamientos, volteos y hundimientos globales es decir, para garantizar su estabilidad externa, se requieren unas condiciones especiales. En forma consistente con la práctica actual en la ingeniería geotécnica, la investigación de estabilidad se basa en las presiones reales de tierra (tan precisas como puedan determinarse) y en las cargas muertas y vivas de servicio calculadas y estimadas, todas sin factores de carga. Las presiones de contacto calculadas se comparan con los valores admisibles y los factores globales de seguridad se evalúan comparando las fuerzas resistentes con las máximas fuerzas que actúan en condiciones de servicio.

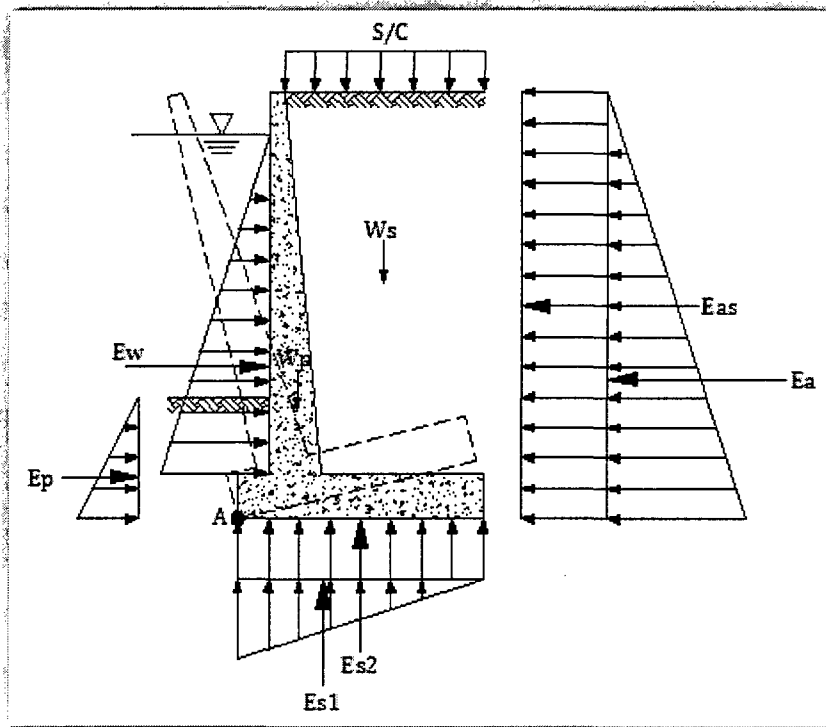
Para que el muro de sostenimiento sea estable, deben garantizarse que:

- El muro no se voltee.
- El muro no se deslice.
- La reacción del suelo, generada por las cargas aplicadas sobre el muro no exceda al esfuerzo admisible del mismo.

13.3.1) Estabilidad al volteo

El empuje del suelo que actúa sobre el muro tiende a voltearlo alrededor del punto A y las fuerzas que se oponen a que ello ocurra son precisamente todas las verticales capaces de producir momentos de sentido contrario respecto al mismo punto (Momento Estabilizador).

Figura N° 13.06: Volteo de muro debido a cargas actuantes sobre él.



El factor de seguridad al volcamiento, se define como la relación existente entre el momento de estabilidad y el de vuelco:

$$FS_V = \frac{\sum M_R}{\sum M_A} \quad \dots 13.08$$

Donde:

FS_V : Factor de seguridad al volteo, debe ser mayor a 1.5.

$\sum M_R$: Sumatoria de momentos resistentes.

$\sum M_A$: Sumatoria de momentos actuantes.

13.3.2) Estabilidad al deslizamiento

La componente horizontal del empuje, trata de movilizar al muro en esa dirección, pero encuentra oposición en la fuerza de fricción o de rozamiento que existe entre el muro y el suelo de cimentación. Esa fuerza de rozamiento (F_r) es función tanto de la magnitud de las fuerzas verticales que ejercen presión sobre el suelo como del coeficiente de fricción entre el material del muro y el suelo de cimentación; aunque lo correcto sería usar la resistencia de éste al esfuerzo cortante:

$$F_r = f * \sum F_V \quad \dots 13.09$$

Donde:

F_r : Fuerza de rozamiento o fricción.

f : Coeficiente de rozamiento o fricción.

$\sum F_V$: Fuerza normal en la base del cimiento (Sumatoria de fuerzas verticales).

En diseños prácticos, lo que se emplea, en el caso de suelos granulares, es el coeficiente de rozamiento entre el concreto y el suelo o la cohesión (resistencia al esfuerzo cortante) cuando se trabaja con suelos cohesivos (Ver tabla N° 13.02).

El factor de seguridad al deslizamiento tiene un valor mínimo de 1,25 y en caso de estructuras en contacto con el agua este valor puede considerarse 1.5, y resulta de relacionar las fuerzas que se oponen al movimiento y aquellas que lo producen, esto es:

$$FS_D = \frac{f * \sum F_V}{\sum F_H} \quad \dots 13.10$$

Donde:

FS_D : Factor de seguridad al deslizamiento.

$\sum F_H$: Sumatoria de fuerzas horizontales que deslizan al muro.

Con la finalidad de mejorar la estabilidad ante el deslizamiento, conviene mantener rugosa la superficie del terreno de fundación. La presencia del empuje pasivo también resulta beneficiosa pero, para poder tomarla en cuenta, es imprescindible garantizar la presencia de suelo delante del muro, para permitir precisamente su generación al responder éste ante la presión del muro que se desplaza contra él.

$$FS_D = \frac{f * \sum F_V + E_P}{\sum F_H} \quad \dots 13.11$$

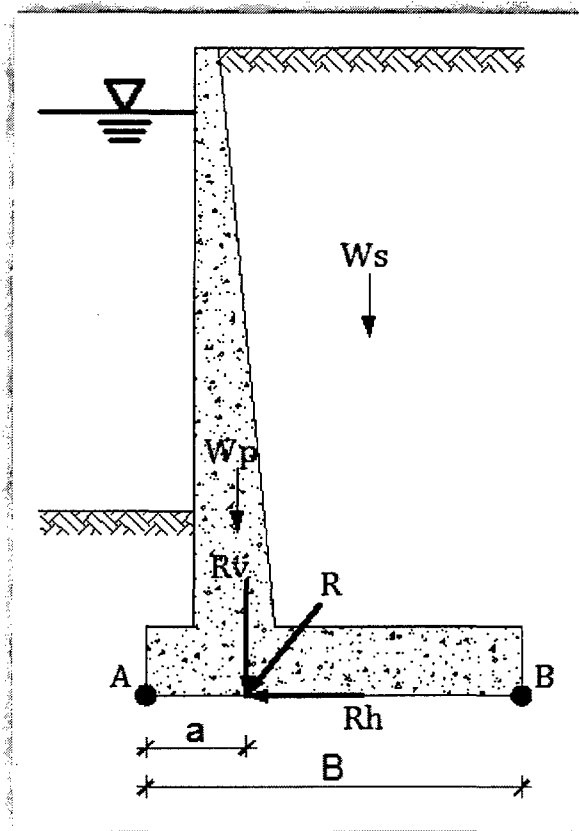
Donde:

E_P : Empuje pasivo del suelo.

13.3.3) Hundimiento de la estructura

También, es necesario garantizar que la presión bajo la zapata no exceda la presión de contacto admisible del terreno de fundación. Llámese "a" (ver figura N° 13.07) la distancia desde el borde delantero A hasta la intersección de la fuerza resultante con el plano base y sea R_V la componente vertical de R (no siempre esta intersección se localizara por debajo del brazo vertical, como se indica, aunque si esto ocurre, se obtiene por lo general un muro mas económico).

Figura N° 13.07: Ubicación de la fuerza resultante

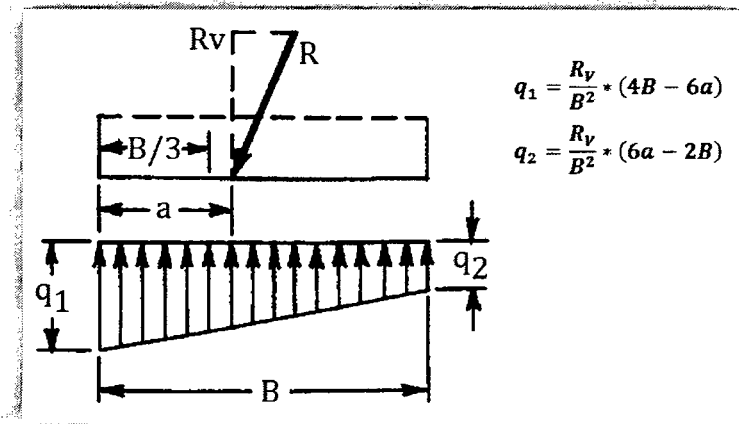


Entonces, el plano base AB, de un metro de ancho en dirección longitudinal, está sometido a una fuerza normal R_V y a un momento con respecto al centroide igual a $(B/2 - a) * R_V$. Cuando estos valores se sustituyen en la formula usual para flexión más fuerza axial,

$$q_{max, min} = \frac{N}{A} \pm \frac{M_C}{B} \quad \dots 13.12$$

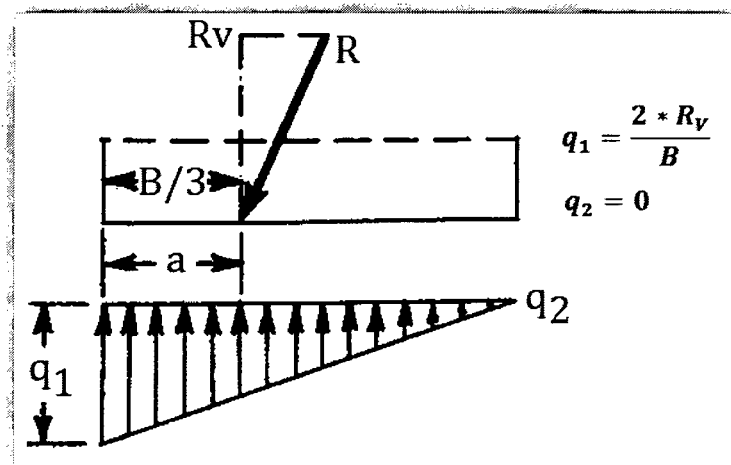
se encontrará que si la resultante se localiza dentro del tercio medio ($a > B/3$), esfuerzos de compresión actuarán a través de toda la sección y las presiones máximas y mínimas pueden calcularse a partir de las ecuaciones de la figura N° 13.08.

Figura N° 13.08: Resultante dentro del tercio medio



Si la resultante se localiza justo en el borde del tercio medio ($a = B/3$), la distribución de presiones es como aparece en la figura N° 13.09 y la ecuación N° 13.12 se convierte en las formulas dadas allí.

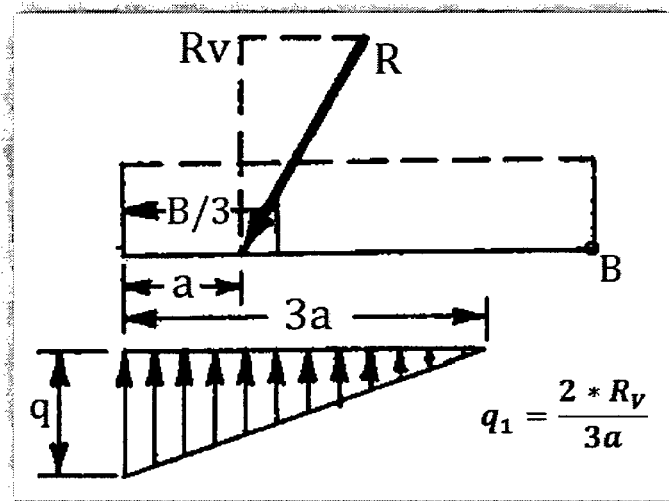
Figura N° 13.09: Resultante en el borde del tercio medio



Si la resultante se localiza por fuera del tercio medio ($a < B/3$), la ecuación N° 13.12 indicaría tensión en 0 cerca del punto "B". Como es obvio, no puede desarrollarse tensión entre el suelo y una zapata de concreto que simplemente descansa sobre él. De ahí que, en este caso, se desarrollaría la distribución de presiones que se ilustra en la figura N° 13.10, que implica un

ligero levantamiento de la parte posterior de la zapata con respecto al suelo. El equilibrio exige que R_V pase por el centroide de la distribución triangular de presiones, condición que permite deducir fácilmente la fórmula para q correspondiente en este caso.

Figura N° 13.10: Resultante por fuera del tercio medio



En buena práctica lograr que la resultante se localice dentro del tercio medio, esto no solo reducirá la magnitud de la presión de contacto máximo, sino que también impedirá disparidades demasiado grandes en las presiones. Si el muro se encuentra cimentado en un suelo bastante compresible, como algunas arcillas, una distribución de presiones como la que se indica en la figura N° 13.09 producirá un asentamiento mucho mayor en el puntal que en el talón, con la correspondiente inclinación del muro. Por consiguiente, una cimentación en este tipo de suelo, la resultante debe caer en o muy cerca del centro de la zapata. Si la cimentación está sobre un suelo altamente incompresible, como una grava bien compactada o una roca, puede permitirse que la resultante caiga por fuera del tercio medio (ver figura N° 13.10).

La distancia "a" desde el punto A al punto de aplicación de la resultante puede calcularse de la forma siguiente:

$$a = \frac{\sum M_R - \sum M_A}{\sum F_V} \quad \dots 13.13$$

13.3.4) Incumplimiento de los factores de seguridad

Si el factor de seguridad al volteo tiene un valor menor a 1.5 debe incrementarse el peso de la estructura.

Una solución cuando se incumple las restricciones al deslizamiento, es enterrar el muro. Mientras que si la capacidad de carga admisible del terreno es superado por el esfuerzo producido por el muro y sus cargas actuantes, es recomendable incrementar la dimensión de la zapata.

13.4) DRENAJE

La acumulación de agua debe prevenirse para que el muro no sea sometido a cargas de empuje mayores que las que se empleó para el diseño de la estructura. Por ello, es necesario habilitar un sistema de drenaje que impida que el agua haga presión sobre el muro.

Por lo general se disponen de tubos de diámetro mayor que 4" espaciados a 1.50m tanto horizontal como vertical, estas tuberías atraviesan el muro y están provistas de una capa de grava superior, para evitar el relleno penetre en ellos.

13.5) MUROS DE GRAVEDAD

Los muros de gravedad, como se indicó anteriormente, basan su estabilidad en su peso propio. El primer paso del diseño es establecer un dimensionamiento preliminar de la estructura para luego verificar que se satisfagan las condiciones de estabilidad y resistencia.

Por lo general, se conoce la altura del muro, las características del suelo de fundación y relleno. A partir de esta información y haciendo uso de la tabla N° 13.03 se estima una primera dimensión para la base.

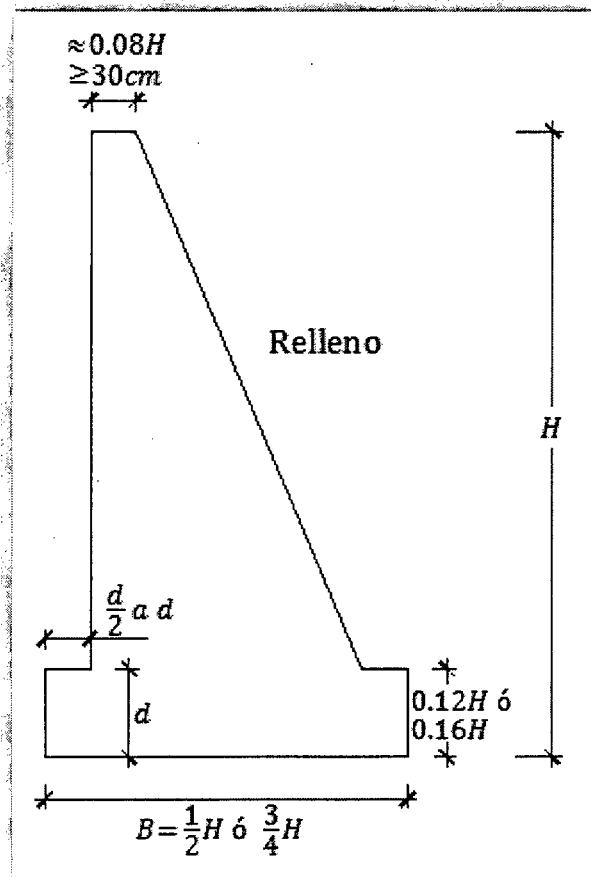
Tabla N° 13.03: Relación $B/(H + h_s)$, para diferentes tipos de relleno

| $B/(H+h_s)$ | $C_a \cdot \gamma_s$ (kg/m ³) |
|-------------|---|
| 0.30 | 204 |
| 0.35 | 269 |
| 0.40 | 343 |
| 0.45 | 423 |
| 0.50 | 512 |
| 0.55 | 605 |
| 0.60 | 715 |
| 0.65 | 830 |

En la figura N° 13.11 se muestra algunos criterios para determinar las otras dimensiones del muro de gravedad.

Con el dimensionamiento preliminar, se verifica la estabilidad de la estructura con los criterios presentados en la sección 13.3, en caso de existir relleno en el talón anterior del muro, es preferible no considerar su efecto estabilizante pues puede darse el caso que éste sea removido. En caso de ser necesario, se ajustan las dimensiones del muro.

Figura N° 13.11: Criterio para dimensionamiento preliminar de muros de gravedad.



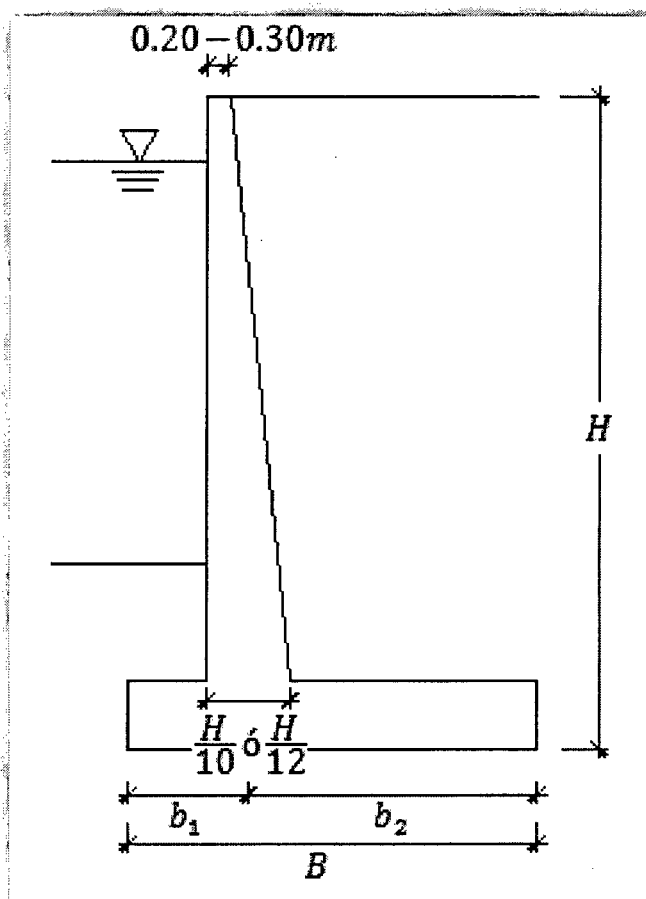
13.6) MUROS EN VOLADIZO

Los muros en voladizo son siempre de concreto armado, pues los esfuerzos a los cuales están sometidos no pueden ser resistidos por el concreto simple. En la figura N° 13.12 se muestran algunos criterios para el dimensionamiento preliminar de este tipo de estructuras. La base se estima haciendo uso de la tabla N° 13.03, al igual que para los muros de gravedad. Si $b_1 \approx B/3$, el muro resulta económico. En caso que la capacidad portante del terreno sea muy

baja, es conveniente que $b_1 \approx B/2$, para que la reacción del suelo sea casi uniforme. Esta solución, sin embargo, eleva el costo de la estructura.

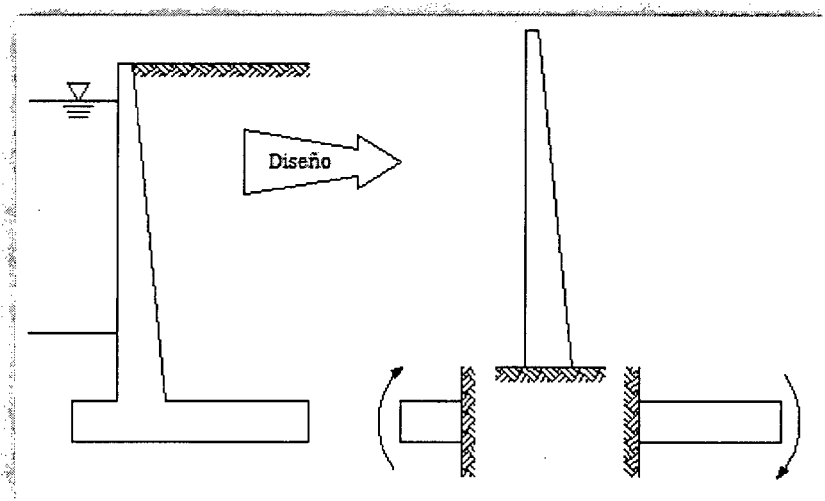
La verificación de la estabilidad es el segundo paso en el diseño. El peso de este tipo de muros es menor que el de los muros de gravedad por lo que en ocasiones la condición crítica es el deslizamiento. Para solucionar este problema se incrementa la longitud de la base para incrementar el peso del relleno y de este modo elevar el aporte de la fricción.

Figura N° 13.12: Criterio para dimensionamiento preliminar de muros en voladizo.



Definidas las dimensiones de la estructura, se diseña la armadura por flexión. Para ello, la pantalla vertical, y los talones posterior y delantero se consideran como volados, tal como se muestra en la siguiente figura.

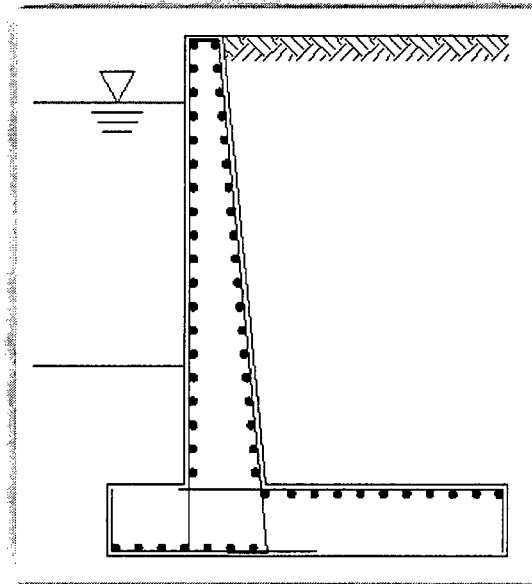
Figura N° 13.13: Criterios para el diseño del muro en voladizo



Sobre la pantalla vertical, actúan el empuje activo del terreno, el efecto de la sobrecarga en el relleno y la presión del agua. Las cargas se amplifican y se determina el refuerzo principal vertical. Los muros de sostenimiento son muros no portantes y por lo tanto el acero mínimo que debe proveérseles es el indicado en la sección 13.08. Aproximadamente las dos terceras partes del refuerzo horizontal deben distribuirse en el borde exterior del muro pues ésta es la zona que experimenta las mayores variaciones de temperatura. En esta cara, el acero vertical debe ser el mínimo suficiente para sostener las varillas horizontales durante el armado. La sección crítica para el corte está ubicada a d de la zapata del muro. La resistencia del concreto, en este caso, es la misma que en la losas.

El talón delantero se diseña para resistir la reacción del suelo, la supresión del agua, y el relleno que existe sobre él. El refuerzo se coloca en la cara inferior. El talón posterior se diseña de modo similar al talón delantero pero en este caso las cargas son el peso del terreno, el peso de la zapata, la sobre carga, que actúan hacia abajo, la reacción del suelo y la supresión del agua que actúan hacia arriba. El refuerzo en este elemento se ubica en la cara superior. En este caso, la verificación del corte no se efectúa en una sección crítica ubicada a d de la pantalla vertical, sino en la cara del apoyo, ya que la reacción sobre el talón es de tracción. Tanto en el talón posterior como en el talón delantero, se coloca refuerzo de temperatura perpendicular a la armadura principal similar al empleado en losas.

Figura N° 13.14: Criterio para el detallado del refuerzo en muros en voladizo



13.7) VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTE Y FLEXION (PANTALLA Y ZAPATA)

Una vez revisada la estabilidad al volcamiento, deslizamiento, presiones de contacto y estando conformes con ellas, se debe verificar que los esfuerzos de corte y de flexión en las secciones críticas de la pantalla y la zapata del muro no sean superiores a los máximos establecidos por las normas.

13.7.1) Verificación de los esfuerzos de corte

La resistencia al corte de las secciones transversales debe estar basada en:

$$V_u = \phi * V_n \quad \dots 13.14$$

Donde, V_u es la fuerza cortante mayorada en la sección considerada y V_n es la resistencia a la corte nominal calculada mediante:

$$V_n = V_c + V_s \quad \dots 13.15$$

donde, V_c es la resistencia al corte proporcionada por el concreto, y V_s es la resistencia al corte proporcionada por el acero de refuerzo, se considera que la resistencia al corte la aporta solo el concreto, ya que en los muros de contención no se estila colar acero de refuerzo por corte, es decir, $V_s = 0$.

$$V_c = \phi * 0.53 * \sqrt{f'_c} * b * d \quad \dots 13.16$$

El código ACI 318S-05, indica que la resistencia al cortante para elementos sujetos únicamente a cortante y flexión puede calcularse con la siguiente anterior. f'_c es la resistencia especificada a la compresión del concreto en Kg/cm², b es el ancho del alma de la sección, en nuestro caso como se analizan los muros en fajas de 1m de ancho, $b = 100\text{cm}$, d es la altura útil medida desde la fibra extrema más comprimida al centroide del acero de refuerzo longitudinal en tensión, en cm.

13.7.2) Verificación de los esfuerzos de flexión

La resistencia a flexión de las secciones transversales debe estar basada en:

$$M_u \leq \phi * M_n \quad \dots 13.17$$

M_u es el momento flector mayorada en la sección considerada y M_n es el momento nominal resistente.

En elementos sujetos a flexión el porcentaje de refuerzo en tensión o cuantía de la armadura en tracción ρ_{max} , no debe exceder del 0,75 de la cuantía de armadura balanceada ρ_b que produce la condición de deformación balanceada en secciones sujetas a flexión sin carga axial. Para lograr secciones menos frágiles en zonas sísmicas ρ_{max} no debe exceder de 0,50 de ρ_b . La máxima cantidad de refuerzo en tensión de elementos sujetos a flexión está limitada con el fin de asegurar un nivel de comportamiento dúctil.

$$\rho = \frac{A_s}{b * d} \quad \dots 13.18$$

$$\rho_{max} = 0.75 * \rho_b \quad (\text{zona no sísmica}) \quad \dots 13.19$$

$$\rho_{max} = 0.50 * \rho_b \quad (\text{zona sísmica}) \quad \dots 13.20$$

A_s es el área de acero de refuerzo en tensión en cm², b el ancho de la cara en compresión del elemento en cm, y d la altura útil en cm.

La altura útil efectiva requerida en una sección considerada, en zonas no sísmicas:

$$d \geq \sqrt{\frac{M_u}{0.263 * \phi * f'_c * b}} \quad \dots 13.21$$

La altura útil efectiva requerida en una sección considerada, en zonas sísmicas:

$$d \geq \sqrt{\frac{M_u}{0.189 * \phi * f'_c * b}} \quad \dots 13.22$$

13.8) REFUERZO MÍNIMO EN MUROS

El código define un refuerzo mínimo en muros para controlar el agrietamiento de la estructura (ACI-14.3).

El refuerzo mínimo vertical en muros es igual a:

- Para varillas menores o iguales que la #5 y $f_y \geq 4200 \text{ kg/cm}^2$ $A_{vmin} = 0.0012bh$
- Para cualquier otro tipo de varilla $A_{vmin} = 0.0015bh$

El refuerzo mínimo horizontal será:

- Para varillas menores o iguales que la #5 y $f_y \geq 4200 \text{ kg/cm}^2$ $A_{vmin} = 0.0020bh$
- Para cualquier otro tipo de varilla $A_{vmin} = 0.0025bh$

13.9) FACTORES DE CARGA

En la investigación de un muro de contención con respecto a la estabilidad del muro descrita en la sección 13.3, la practica actual consiste en utilizar en los cálculos las presiones reales de tierra y las cargas muertas y vivas de servicio calculadas o estimadas con factores de carga iguales 1.0 (es decir, sin incrementar la carga para tener en cuenta una condición hipotética de sobrecarga). Las presiones de contacto en el suelo, calculadas para condiciones de cargas de servicio, se comparan con las presiones admisibles de contacto, cuyos valores se establecieron por debajo de los valores de capacidad última de carga, para mantener una adecuada seguridad. Los factores de seguridad contra el volcamiento y deslizamiento se establecen con base en las condiciones para cargas de servicio.

Por otra parte, el diseño estructural de un muro de contención debe ser consistente con los métodos utilizados para todos los demás tipos de elementos y debe basarse, por tanto, en cargas mayoradas que reconozcan la posibilidad de un incremento con respecto a las cargas de servicio.

Se utiliza la siguiente nomenclatura:

D: Carga muerta

L: Cargas vivas.

F: Cargas debidas a líquidos o presión lateral de los mismos.

H: Cargas debidas a terrenos o presión lateral de los mismos.

U: Resistencia requerida para soportar las cargas amplificadas o sus momentos o fuerzas internas.

La resistencia requerida *U* deberá ser igual o mayor que las cargas amplificadas que se indican a continuación, considerando cuando una o más cargas no actúan simultáneamente.

$$U \geq 1.4 * (D + F) \quad \dots 13.23$$

$$U \geq 1.2 * (D + F) + 1.6 * (L + H) \quad \dots 13.24$$

13.10) FACTORES DE REDUCCIÓN DE CAPACIDAD

Los factores de reducción de capacidad ϕ , toman en cuenta las inexactitudes en los cálculos y fluctuaciones en la resistencia del material, en la mano de obra y en las dimensiones.

Para flexión: $\phi = 0.90$

Para cortante: $\phi = 0.75$

13.11) ACERO DE REFUERZO

El acero de refuerzo en concreto armado son varillas de sección redonda, las cuales tienen corrugaciones cuyo fin es restringir el movimiento longitudinal de las varillas relativo al concreto que las rodea. A continuación damos una tabla con varillas de producción común en nuestro medio.

Tabla N° 13.04: Varillas corrugadas y sus características

| Barra # | Diámetro | | Área (cm ²) | Perímetro (cm) | w (kg/ml) |
|---------|----------|-------|----------------------------|-------------------|--------------|
| | (pulg.) | (cm.) | | | |
| 2 | 1/4 | 0.635 | 0.32 | 2 | 0.250 |
| 3 | 3/8 | 0.952 | 0.71 | 3 | 0.560 |
| 4 | 1/2 | 1.270 | 1.29 | 4 | 0.994 |
| 5 | 5/8 | 1.588 | 2.00 | 5 | 1.552 |
| 6 | 3/4 | 1.905 | 2.84 | 6 | 2.235 |
| 7 | 7/8 | 2.222 | 3.87 | 7 | 3.042 |
| 8 | 1 | 2.540 | 5.10 | 8 | 3.973 |
| 9 | 1 1/8 | 2.865 | 6.45 | 9 | 5.060 |
| 10 | 1 1/4 | 3.226 | 8.19 | 10 | 6.403 |

w: Peso por metro lineal de varilla.

14.0 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL BARRAJE

14.1) ASPECTOS GENERALES

Las obras de toma tipo presa derivadora son estructuras de baja altura y son construidas, generalmente con materiales de mampostería, concreto ciclópeo, etc. Sus dimensiones son tales que con sólo su peso propio resisten las fuerzas que actúan en ella. Para lograr la estabilidad de estas estructuras, las fuerzas estabilizadoras que actúan en la estructura deben cumplir ciertos requisitos, estos son:

- a) Volteo
- b) Deslizamiento
- c) Esfuerzos permisibles en el suelo.

Si bien, en una situación ideal la fundación de estas estructuras deben ser rígidas, resistentes e impermeables como las rocas, pero en realidad es poco frecuente encontrar una situación favorable como esta, en general, es más usual que el lecho sea del tipo aluvial.

Para diseñar una toma tipo presa derivadora será necesario identificar y determinar las fuerzas que actúan sobre ella.

14.2) FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LA ESTRUCTURA

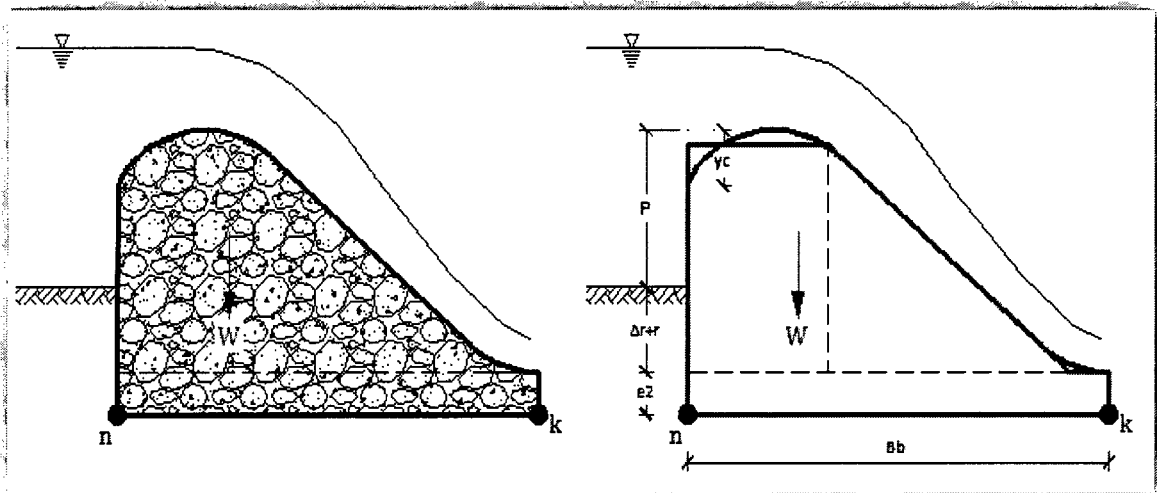
El diseño de un dique vertedor dependerá de los materiales usados y de las condiciones locales de cada caso, pero las fuerzas dinámicas y estáticas son comunes en toda clase de vertedores de cresta fija. El dique deberá ser estable cuando se encuentre sujeto a las siguientes fuerzas:

- Peso propio
- Presión hidrostática
- Subpresión
- Empuje de sedimentos o azolves
- Peso del agua sobre el barraje
- Reacción del terreno

14.2.1) Peso propio (W)

El peso propio del barraje se calculará de acuerdo con el material empleado en su construcción. Como se observa en la figura N° 14.01 el barraje está formado por varias líneas, las cuales forman una superficie irregular, razón por la cual se define una figura equivalente del mismo área. Antes de definir la figura equivalente, vale mencionar que esta debe asemejarse a la forma de la figura original.

Figura N° 14.01: Peso del barraje



14.2.2) Presión hidrostática (E_w)

El empuje hidrostático producido por la presión externa del agua, se presenta actuando sobre la superficie del paramento de aguas arriba. El cálculo de este empuje está basada en la ley de pascal "La presión actúa en cada punto con igual magnitud en todas direcciones y sentidos", los empujes resultantes son normales a las superficies sobre las que actúan.

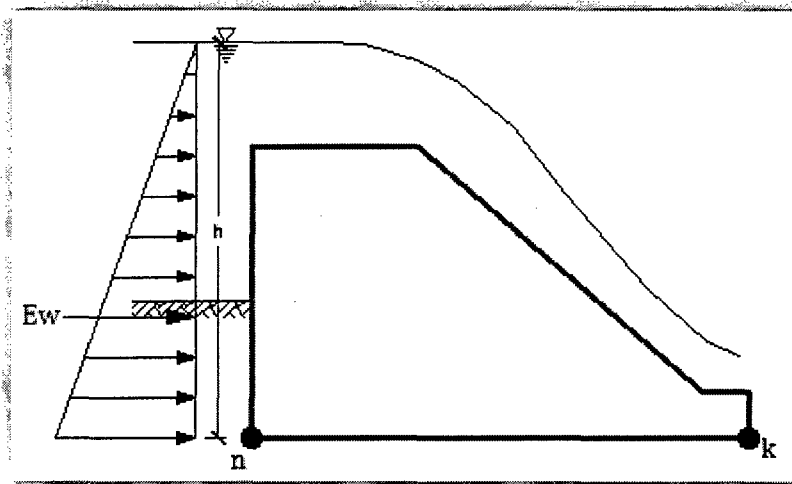
$$E_w = \frac{1}{2} * \gamma_w * h^2 \quad \dots 14.01$$

Donde:

γ_w : Peso específico del agua, en kg/m³.

h : Altura desde el nivel de agua hasta el punto A, en m.

Figura N° 14.02: Presión hidrostática sobre barraje

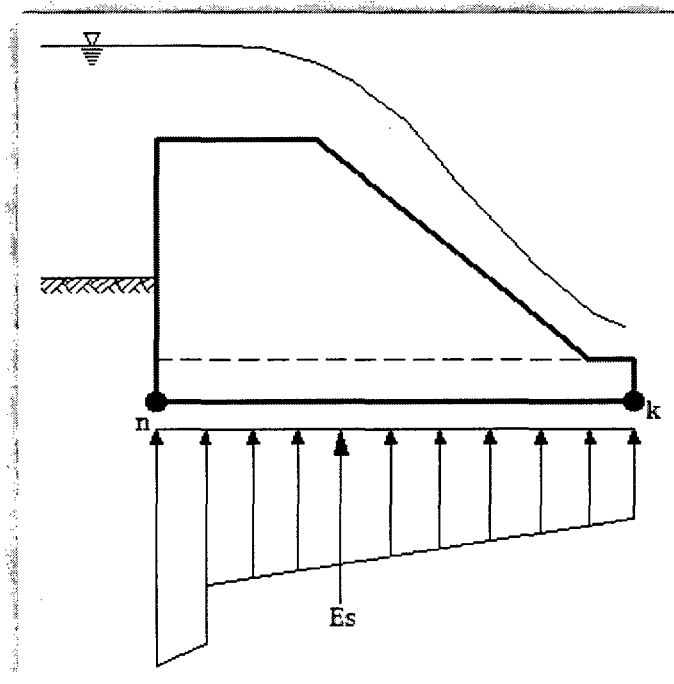


14.2.3) Subpresión (E_s)

Es una presión debida al agua de filtración que actúa en la cimentación del barraje con sentido de abajo hacia arriba, y por lo tanto, es desfavorable a la estabilidad del barraje.

Debido a la infiltración del agua entre el dique vertedor y el terreno se origina una presión de agua en dirección vertical de abajo hacia arriba, a la resultante de estas presiones se le llama subpresión.

Figura N° 14.03: Presión hidrostática sobre barraje



14.2.4) Empuje de sedimentos o azolves (E_a)

Debido a los azolves y acarrees en general que deposita la corriente de aguas arriba del barraje, se tendrá una presión sobre el paramento correspondiente que deberá tomarse en cuenta. Aun cuando exista el canal de limpia, no es posible evitar en la mayoría de los casos el depósito de estos materiales, sobre todo el terreno del cauce y también en el margen que no tenga compuertas de limpia.

$$E_a = \frac{1}{2} * C_a * (\gamma_{sat} - \gamma_w) * (\Delta r + r + e_2)^2 \quad \dots 14.04$$

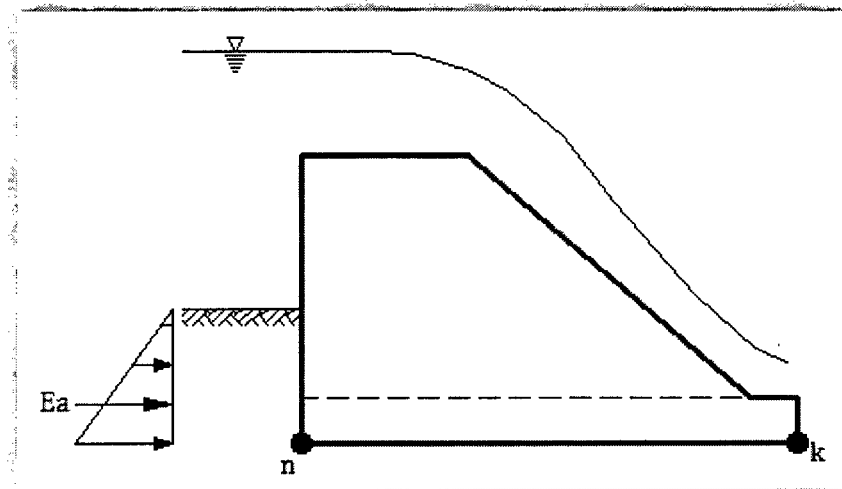
Donde:

γ_{sat} : Peso específico del suelo saturado, en kg/m³.

γ_w : Peso específico del agua, en kg/m³.

C_a : Coeficiente de presión activa del suelo.

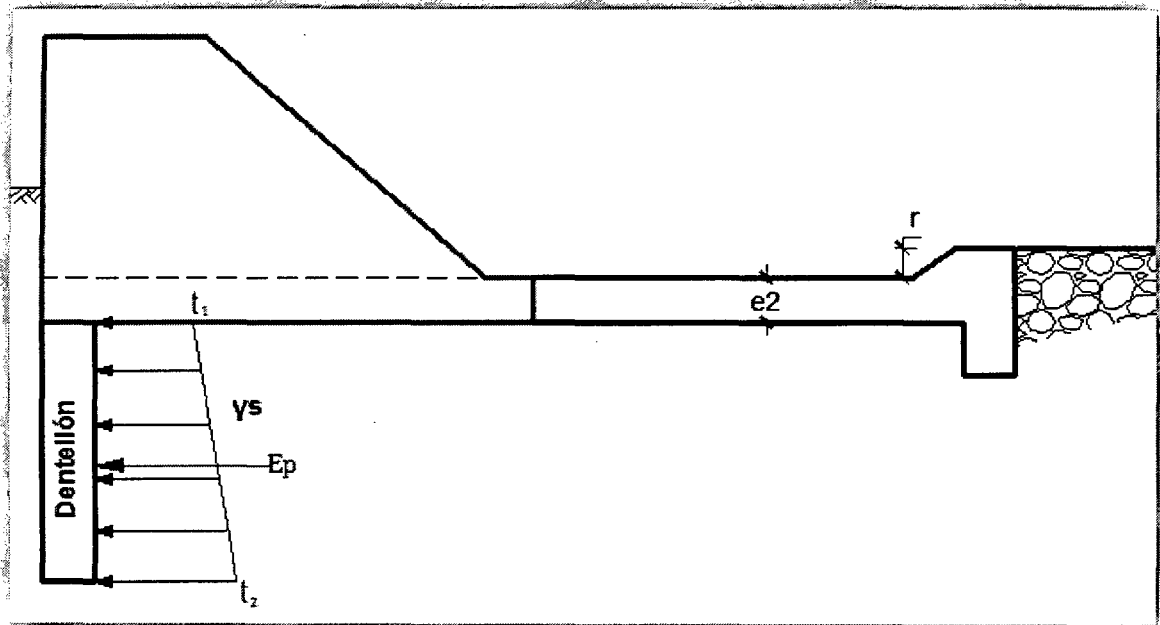
Figura N° 14.04: Empuje de sedimentos sobre barraje



14.2.5) Empuje pasivo producido por el dentellón

Es usual colocar dentellones en la parte inicial de la base del barraje, con la finalidad del alargar el camino de recorrido de las aguas de filtración; este dentellón a su vez evita el deslizamiento de la estructura, pues está sometido a un empuje pasivo del suelo (Figura N° 14.05). Esta fuerza resistente colabora en la fricción para equilibrar el empuje de sedimentos (E_a) y del agua (E_w).

Figura N° 14.05: Empuje pasivo del suelo



$$t_1 = \gamma_s * (e_2 + r) * C_p \quad \dots 14.05$$

$$t_2 = \gamma_s * (e_2 + r + L_{7-8}) * C_p \quad \dots 14.06$$

$$E_p = \frac{(t_1 + t_2)}{2} * L_{7-8} \quad \dots 14.07$$

Donde:

t_1 : Presión pasiva superior en dentellón, en kg/m².

t_2 : Presión pasiva inferior en dentellón, en kg/m².

γ_s : Peso específico del suelo de fundación, en kg/m³.

C_p : Coeficiente de empuje pasivo.

e_2 : Espesor de solado en poza de disipación de energía, en m.

r : Profundidad de poza de disipación de energía, en m.

L_{7-8} : Longitud del dentellón, en m.

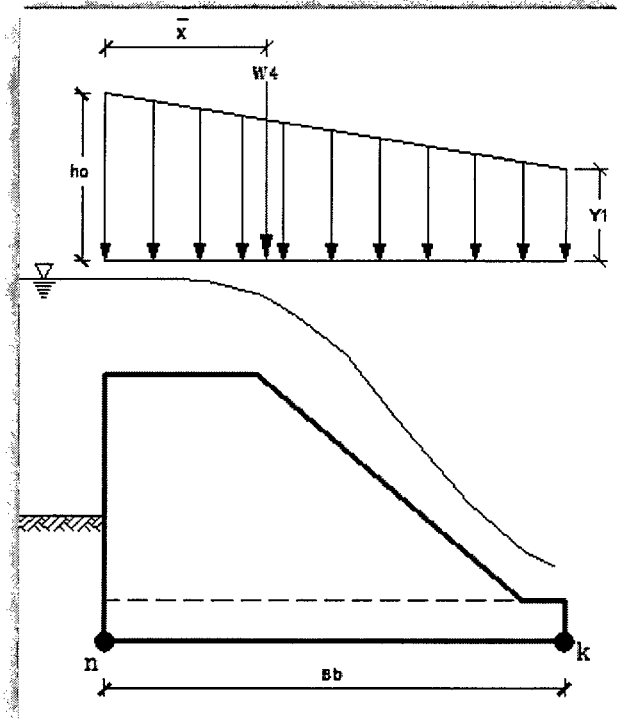
E_p : Empuje pasivo producido por el dentellón, en kg.

14.2.6) Peso del agua sobre el barraje

Este peso es relativamente pequeño cuando el análisis es para un caudal mínimo, por esta razón no se considera en el análisis de estabilidad, además de actuar favorablemente en la estabilidad del barraje.

Mientras que el peso del agua toma mayor importancia cuando se analiza para el caudal máximo instantáneo. En forma aproximada se puede definir de la siguiente forma.

Figura N° 14.06: Peso de agua sobre barraje



$$W_4 = \frac{(h_0 + Y_1)}{2} * B_b * \gamma_w \quad \dots 14.08$$

$$\bar{X} = \frac{B_b}{3} * \left(\frac{2Y_1 + h_0}{h_0 + Y_1} \right) \quad \dots 14.09$$

Donde:

W_4 : Peso del agua sobre barraje, en kg.

γ_w : Peso específico del agua, en kg/m³.

B_b : Base de barraje, en m.

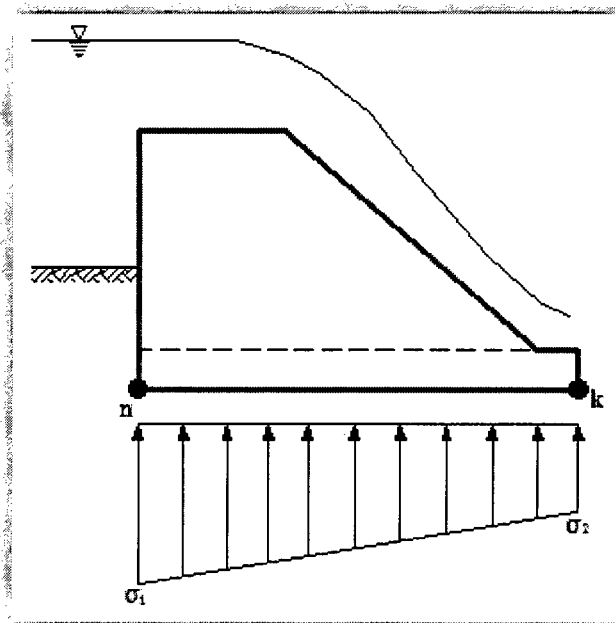
h_0 : Carga de agua sobre barraje para caudal máximo instantáneo, en m.

Y_1 : Tirante contraído al pie del barraje para caudal máximo instantáneo, en m.

14.2.7) Reacción del terreno (σ)

Para que exista la estabilidad de la presa, bajo cualquier condición de fuerzas horizontales y verticales, que actúan en ella se deberá oponer otra producida por la reacción del terreno, que deberá ser igual y contraria a la resultante de la combinación de todas las demás cargas que actúen sobre el barraje. El terreno deberá tener la capacidad carga mayor a la solicitada.

Figura N° 14.07: Reacción del terreno



14.2.8) Presión negativa en el cimacio

Su valor, teóricamente se anula, cuando se diseña el cimacio con un perfil WES, USBR, o de tipo parabólico, ya que en estas condiciones, teóricamente la lámina vertiente no ejerce ninguna presión sobre el barraje, puesto que el perfil del cimacio se aproxima a la trayectoria del chorro.

14.3) CONDICIONES DE ESTABILIDAD

En el capítulo XII se ha analizado las condiciones de estabilidad de los muros de encauzamiento, para el caso del barraje se aplica el mismo criterio, por lo tanto las condiciones de estabilidad que se deben satisfacer para asegurar su estabilidad son tres: Estabilidad al volteo, deslizamiento, y al hundimiento.

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

15.0 MATERIALES Y METODOS

15.1) METODOLOGÍA

Para dar respuesta al objetivo general como al tema planteado se ha tomado la decisión de adquirir un proceso de investigación que brinde todas las respuestas requeridas para la comprobación o no, para ello se investigará en el campo de la materia.

Los modelos de metodologías para el desarrollo de software son lineales y no lineales. Las fases en un modelo lineal pueden ser claras, diferencian las tareas a ejecutar, pero cuando se aplican se observa como la separación de tareas y la linealidad es difícil de mantener. La práctica ha demostrado que es difícil cerrar fases hasta que el software esté terminado. Hay una revisión continua en función de los resultados que se van obteniendo. Las razones antes expuestas han motivado la utilización de modelos no lineales.

Existen diversas metodologías para el desarrollo de software, propuestas por diferentes autores, en las cuales se pueden notar fases tanto comunes como diferentes, pero dirigiendo la atención a las distintas actividades que se realizan, éstas en su mayoría son comunes. Cualquier metodología permitirá llegar a buen término la realización de un software, sin embargo, es preciso dividir las fases en pasos adecuados al contexto en que se encuentra el desarrollador.

15.1.1) Actividades realizadas

Tratando de cumplir ésta premisa se utilizará una metodología no lineal, la cual consta de nueve fases (Ver Gráfico N° 15.01): Identificación del problema, análisis del problema, planificación del algoritmo, comprobación y verificación del algoritmo, diseño de una interfaz gráfica, codificación del algoritmo dentro de un programa, comprobación y verificación del programa, publicación y Mejoramiento. Habiendo un ciclo en las fases diseño de interfaz, codificación, verificación - comprobación, despliegue y mejoramiento, puede realizarse versiones posteriores, la cual no genera cambios significativos en la estructura del software. En futuras evaluaciones puede tomarse la decisión de revisar los documentos desde el principio, es decir retomar la fase de planeación.

A continuación se detallan las fases correspondientes a la metodología no lineal propuesta.

a) Identificación del problema: En esta fase se identifica el problema a solucionar.

b) Análisis del problema: En este paso además de analizar el problema, se debe identificar los componentes importantes que da una solución adecuada.

Hay dos términos que debe considerarse en este paso que son las entradas y salidas del problema y se preguntará por qué se debe hacer referencia a ellos. La idea es identificar qué datos se necesitan para dar solución al problema y cuál es el resultado final; es decir, el objetivo es identificar las entradas y salidas del problema.

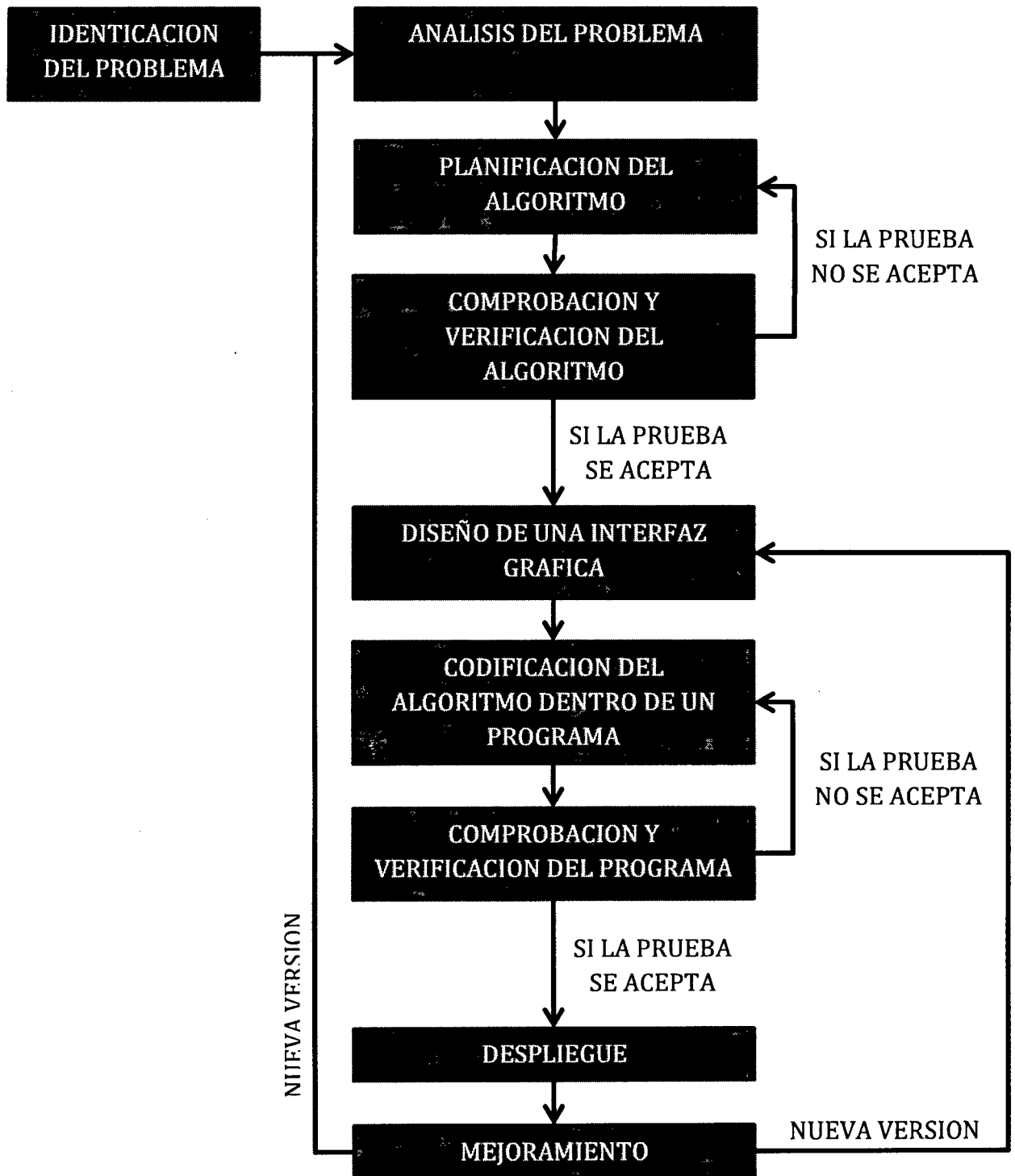
c) Planificación del algoritmo: Una vez obtenida la entrada y salida es necesario planificar, en forma ordenada, los pasos a seguir en un lenguaje básico y entendible para dar solución al problema.

d) Comprobación y verificación del algoritmo: Una vez planificada el algoritmo (sea en pseudocódigo o diagrama de flujos) se comprobará si dichas sentencias cumplen con el objetivo del problema. No existe un formato especial para dicho proceso, por lo tanto, se elige la mejor manera de comprobar los resultados sean adecuados para el problema. Lo primero que se debe entender es qué valor como respuesta se

debería obtener de la operación y compararlo con las instrucciones asignadas en el algoritmo.

- e) **Diseño de una interfaz gráfica:** El diseño de una interfaz es propiamente en un entorno de desarrollo visual como lo ofrece el Visual Studio 2010.
- f) **Codificación del algoritmo dentro de un programa:** Pasar un algoritmo a un programa conlleva a pensar en qué lenguaje de programación será realizado, puesto que un algoritmo no fue diseñado para un lenguaje específico ya que se usa términos genéricos para todos los lenguajes; es decir, podrá implementar un algoritmo en cualquier lenguaje de programación.
- g) **Comprobación y verificación del programa:** Cada implementación de código dentro de un lenguaje de programación tiene su propia forma de comprobar y verificar si todo es correcto. Sin embargo, es preciso diferenciar que una aplicación puede ejecutarse de manera correcta pero no necesariamente resulta lo esperado. Para esto, existe una comprobación a nivel de aplicación y otra a nivel de usuario, ambos pueden ser controlados mediante instrucciones propias del lenguaje.
- h) **Despliegue:** Esta etapa consiste en la instalación y distribución de la aplicación para su uso.
- i) **Mejoramiento:** En esta fase se debe tomar en cuenta los resultados de la evaluación para mejorar, corregir, agregar nuevos módulos de tal manera que se pueda tener a futuro una serie de versiones que vayan adaptándose al interés de los usuarios, nuevos hardware, nuevos dispositivos, etc.

Grafico N° 15.01: Metodología de trabajo



15.2) RECURSOS USADOS

El desarrollo de este proyecto contará con el uso de los siguientes recursos:

- Un mueble de soporte.
- Un CPU, un Monitor.
- Un Teclado.
- Dos parlantes.
- Un mouse, un regulador de voltaje
- Programa HCanales V3.0, AutoCad 2011, PETH, Visual Studio 2010, Microsoft office, etc.
- Sistema operativo Windows 7.0
- Material bibliográfico (libros)

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUCIONES

16.0 EJECUCIÓN DEL PROYECTO

16.1) ALGORITMO PARA DE DISEÑO DE BOCATOMAS TIPO BARRAJE

16.1.1) Algoritmo general del software

A continuación se describe el algoritmo general para el diseño hidráulico y estructural de bocatomas tipo barraje:

- Definir los datos generales del proyecto, nombre, ubicación política y geográfica.
- Definir los caudales de diseño (Obligatorios: Caudal máximo instantáneo, caudal medio anual, caudal mínimo anual y caudal de derivación).
- Definir las cotas principales (Cota delante de la venta de captación).
- Diseño del canal de derivación.
- Definición del ancho de encauzamiento.
- Determinación del coeficiente de rugosidad del río.
- Determinación de las características hidráulicas del río.
- Diseño de las ventanas de captación y de la zona de limpia.
- Definición del perfil del flujo ventana de captación – canal de derivación.
- Diseño del barraje vertedor.
- Diseño del dissipador de energía.
- Determinación del contorno subterráneo de la presa.

- Muro de encauzamiento y estudio de la curva de remanso.
- Determinación de la socavación del cauce.
- Diseño de los muros de encauzamiento.
- Diseño de los muros laterales.
- Análisis de estabilidad del barraje.

16.1.2) Algoritmo para diseño de canal de derivación

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ El canal es de máxima eficiencia hidráulica?
- ✓ Pendiente del fondo del canal, coeficiente de rugosidad, Talud, ancho de solera, forma de calcular borde libre (Tabla N° 6.04, 6.05), incremento del intervalo para calibración de canal.

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de las formulas descritas en el capítulo 6.0 para diseño de canal.

Resultados obtenidos:

- ✓ Tirante normal, área hidráulica, perímetro mojado, radio hidráulico, velocidad, espejo de agua, numero de Froude, borde libre

16.1.3) Algoritmo para la definición del ancho de encauzamiento

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Pendiente del río, ancho de cauce natural, factor de fondo, factor de orilla, coeficiente de Altunin, valor de K1

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de fórmulas 4.01, 4.05, 4.06, 4.07d, 4.13, y 4.18.

Resultados obtenidos:

- ✓ Ancho estable B1, B2, B3, B4.

16.1.4) Algoritmo para determinación del coeficiente de rugosidad del río

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Material considerado, irregularidad en la sección recta, variaciones de la sección transversal del cauce, efecto relativo de obstrucciones, vegetación, meandros, D50, D75, D90.

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de fórmulas 5.01, 5.02, 5.03, 5.04, 5.06 y 5.07.

Resultados obtenidos:

- ✓ Coeficiente de rugosidad del río.

16.1.5) Algoritmo para características hidráulicas del río

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Talud natural del río, coeficiente de rugosidad del muro de encauzamiento

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de la fórmula de Maninng, y las formulas 6.01, 6.02, 6.03, 6.04, 6.05, 6.06, 6.07 y 6.08.

Resultados obtenidos:

- ✓ Características hidráulicas del río en su estado natural: Tirante normal, área hidráulica, velocidad, número de Froude, Radio hidráulico, Espejo de agua, etc.
- ✓ Características hidráulicas del río cuando existe los muros
Tirante normal, área hidráulica, velocidad, Numero de Froude, Radio hidráulico, Espejo de agua, etc.

16.1.6) Algoritmo para diseño de ventanas de captación y zona de limpia

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Ventanas de captación: Coeficiente de descarga, número de ventanas, ancho neta de las ventanas, ancho de pilares de separación, alfeizer de la ventana, carga de seguridad sobre la ventana, ángulo de inclinación de las rejillas, ángulo de ingreso del flujo, diámetro de las rejillas, espaciamiento de las rejillas.
- ✓ Zona de limpia: Caudal de diseño, numero de compuertas, ancho de compuertas, ancho de pilares de separación, profundidad de la poza, coeficiente de rugosidad, coeficiente del material a eliminar, diámetro del grano mayor.
- ✓ Barraje vertedor: Coeficiente de descarga.

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de las formulas 7.01, 7.02, 7.03, 7.04, 7.05, 7.06, 7.07, 7.08, 7.09, 7.10, 8.01, 8.02, 8.03, 8.04, 8.05, 8.06, 8.07, 8.08, 8.09, 8.10, 8.11, 8.12, 8.13, 8.14 y 8.15.

Resultados obtenidos:

- ✓ Barraje vertedor: Altura del barraje vertedor, longitud del barraje vertedor, Carga de agua sobre barraje, cota de cresta.
- ✓ Ventana de captación: Altura de la ventana, numero de rejillas, Ancho corregido de la ventana.
- ✓ Zona de limpia: Ancho total, ancho efectivo, altura de la compuerta, coeficiente de descarga, pendiente del canal de limpia, tirante en el canal de limpia, velocidad en el canal de limpia, velocidad para inicio de arrastre.

16.1.7) Algoritmo para definir el perfil del flujo ventana de captación – canal de derivación.

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Ventanas de captación: Coeficiente de descarga.
- ✓ Compuerta de admisión: Coeficiente de descarga, número de compuertas, ancho de compuerta, ancho de pilar de separación, alfeizer de la compuerta.
- ✓ Compuerta de desripiador: Coeficiente de descarga, número de compuertas, ancho de compuerta, ancho de pilar de separación.
- ✓ Canal de purga: Coeficiente de rugosidad, pendiente del canal.
- ✓ Vertedor de excedencias: Caudal admisible en canal de derivación, coeficiente de descarga.
- ✓ Canal de excedencias: Coeficiente de rugosidad, pendiente del canal, ancho de solera.
- ✓ Datos adicionales: Borde libre en muro de encauzamiento, borde libre en muro de desripiador, longitud del canal aductor.

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de las ecuaciones 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, 7.18, 7.19, 7.20, 7.21, 7.22, 7.23, 7.24, 7.25, 7.26, 7.27, 7.28, 7.29, 7.30, 7.31, 7.32, 7.33, 7.34, 7.35, 7.36, 7.37, 7.38, 7.39, 7.40, 7.41,

7.42, 7.43, 7.44, 7.45, 7.46, 7.47, 7.48, 7.49, 7.40, 7.41, 7.42, 7.43, 7.44, 7.55, 7.56 y 7.57.

Resultados obtenidos:

- ✓ Zona de barraje: Altura de velocidad, carga de agua sobre barraje, tirante en la sección 1, desnivel río – desripiador, velocidad en la sección 1.
- ✓ Ventana de captación: Perdida de carga, velocidad en sección 2.
- ✓ Compuerta de admisión: Caudal de descarga, tirante en la sección 3, altura de compuerta de admisión, velocidad en la sección 3, velocidad en la sección 4.
- ✓ Compuerta de desripiador: Altura de la compuerta, velocidad en sección 8.
- ✓ Desripiador: Ancho de base en sección 2, ancho de base en sección 3, longitud.
- ✓ Canal de aducción: Pendiente del canal, ancho de solera, tirante, borde libre, velocidad.
- ✓ Canal de transición: Ancho de base en sección 5, ancho de base en sección 6, longitud, desnivel.
- ✓ Canal de purga: Longitud, ancho de solera, tirante, borde libre, velocidad.
- ✓ Vertedor excedencias: Tirante en canal de derivación, altura del umbral del vertedor, tirante en canal de derivación, longitud del vertedor.
- ✓ Canal de excedencias: Caudal en canal de excedencias, tirante normal, borde libre, velocidad.
- ✓ Cotas principales.

16.1.8) Algoritmo para diseño de barraje vertedor

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Coeficiente de descarga (método de USBR, método de Gehy)
- ✓ Perfil del cimacio (criterio de USBR, criterio de WES)
- ✓ Diferencia de altura.
- ✓ Radio de la curvatura de descarga (fórmula 01, formula 02).

- ✓ Angulo de la curva de descarga (definido por el programa, definido por el usuario).
- ✓ Intervalo para definir el perfil del cimacio.
- ✓ Borde libre del muro aguas abajo.

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de las ecuaciones 9.01, 9.02, 9.03, 9.04, 9.05, 9.06, 9.07, 9.08, 9.09, 9.10, 9.11, 9.12, 9.13, 9.14, 9.15, 9.16, 9.17, 9.18, 9.19, 9.20 y 9.21

Resultados obtenidos:

- ✓ Carga de agua y coeficiente de descarga del barraje: Longitud efectiva del barraje, carga de agua sobre el barraje, altura de velocidad, velocidad el canal de aproximación, coeficiente de descarga del barraje.
- ✓ Resalto hidráulico: Profundidad de la poza de disipación, tirante contraído en pie de barraje, velocidad al pie del barraje, numero de Froude, tirante conjugado en sección 2, velocidad en sección 2.
- ✓ Perfil del cimacio: Coeficiente adimensional k , coeficiente adimensional n , coordenada de abscisa x_c , coordenada de ordenada y_c , radio R_1 , radio R_2 , radio de la curva de descarga R_3 , ángulo del arco de circulo.

16.1.9) Algoritmo para diseño del dissipador de energía

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de las ecuaciones 10.01, 10.02, 10.03, 10.04, 10.05, 10.06, 10.07, 10.08, 10.09, 10.10, 10.11, 10.12, 10.13, 10.14, 10.15, 10.16, 10.17, 10.18, 10.19, 10.20, 10.21, 10.22, 10.23, 10.24, 10.25 y 10.26.

Resultados obtenidos:

- ✓ Resalto hidráulico: Tirante contraído al pie del barraje, numero de Froude Fr_1 , Velocidad al pie del barraje, tirante conjugado en sección 2, numero de Froude Fr_2 , velocidad en la sección 2.
- ✓ Características del resalto: Tipo de resalto formado, perdida de energía, longitud del resalto.
- ✓ Perfil de cimacio corregido: Profundidad de la poza de disipación, base del barraje, ángulo del arco del círculo.

16.1.10) Algoritmo para determinación del contorno subterráneo de la presa

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Subpresión: Método utilizado (Lane, Bligh), coeficiente C (Lane, Bligh), factor de subpresión que depende del terreno, peso específico del agua, concreto, coeficiente de Bligh.
- ✓ Dimensiones de dentellones: L1-2, L2-3, L3-4, L4-5, L5-6, L6-7, L7-8, L8-k, Lk-9, L9-10, L10-11, L11-12, e1, y e2.
- ✓ Fenómeno de tubificación: Gravedad específica del material, relación de vacíos del mismo.

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de las ecuaciones 11.01, 11.02, 11.03, 11.04, 11.05, 11.06, 11.07, 11.08, 11.09, 11.10, 11.11, 11.12, 11.13, 11.14, 11.15, 11.16, 11.17, 11.18, 11.19, 11.20, 11.21, 11.22, 11.23, 11.24, 11.25, 11.26, 11.27, 11.28, 11.29 y 11.30.

Resultados obtenidos:

- ✓ Diferencia máxima del nivel de agua, socavación al pie del dissipador, longitud de la escollera, factor de seguridad a la tubificación, supresión.

16.1.11) Algoritmo para muro de encauzamiento y curva de remanso

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Número de tramos.

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de las ecuaciones 12.01, 12.02, 12.03, 12.04, 12.05, 12.06, 12.07, 12.08, 12.09, 12.10, 12.11, 12.12, 12.13, 12.14, 12.15, 12.16, 12.17, 12.18, 12.19, 12.20, 12.21, 12.22, 12.23, 12.24, 12.25, 12.26, 12.27, 12.28, 12.29, 12.30, 12.31, 12.32, 12.33, 12.34, 12.35, 12.36, 12.37, y 12.38

Resultados obtenidos:

- ✓ Tirante crítico, tirante en sección de control, tirante normal del río, decremento del tirante.
- ✓ Longitud de la curva de remanso: Método aproximado, método de integración gráfica, método del paso directo.

16.1.12) Algoritmo para determinación de la socavación del cauce

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Diámetro medio de las partículas del material granular.
- ✓ Selección de los métodos aplicados (Lischtvan – Levediev, Straub, Liu, Chang y Skinner, y Artamonov).
- ✓ Método de Lischtvan – Levediev: Periodo de retorno, coeficiente de contracción, tipo de suelo, peso específico de la muestra agua – sedimento, peso específico del sedimento.
- ✓ Método de Skinner: Condición del muro.
- ✓ Método de Artamonov: Coeficiente K_θ , coeficiente K_Q , coef. K_m .

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de ecuaciones 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 y 4.33.

Resultados obtenidos:

- ✓ Condición del flujo.
- ✓ Socavación general: Método de Lischtvan – Levediev (profundidad de la socavación, tirante después de ocurrido la socavación), método de Straub (profundidad de la socavación, tirante después de ocurrido la socavación).
- ✓ Socavación local: Método de Liu, Chang y Skinner (profundidad de socavación), método de Artamonov (profundidad de socavación, tirante después de ocurrido la socavación).

16.1.13) Algoritmo para diseño de muros de encauzamiento

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Materiales: Peso específico del concreto, resistencia del concreto, esfuerzo de fluencia del acero.
- ✓ Suelo de fundación: Capacidad de carga admisible, ángulo de fricción interna, coeficiente de fricción concreto – terreno.
- ✓ Peso específico del relleno, peso específico del suelo saturado.
- ✓ Muro en análisis (aguas arriba, aguas abajo del barraje).

- ✓ Acero de refuerzo: Recubrimiento en pantalla, recubrimiento en zapata, refuerzo vertical en pantalla, refuerzo horizontal en pantalla, refuerzo en talón anterior, refuerzo en talón posterior.
- ✓ Sobre carga, dimensiones t_1 , t_2 , E, B, G, H, F, D, y C.

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de ecuaciones 13.01, 13.02, 13.03, 13.04, 13.05, 13.06, 13.07, 13.08, 13.09, 13.10, 13.11, 13.12, 13.13, 13.14, 13.15, 13.16, 13.17, 13.18, 13.19, 13.20, 13.21, 13.22, 13.23, y 13.24.

Resultados obtenidos:

- ✓ Pivote en punto A: Momentos actuantes (fuerza, Brazo, momento), momentos resistentes (fuerza, Brazo, momento).
- ✓ Pivote en punto B: Momentos actuantes (fuerza, Brazo, momento), momentos resistentes (fuerza, Brazo, momento).
- ✓ Estabilidad: Seguridad al volteo, seguridad al deslizamiento, punto de paso de la resultante, reacciones del terreno.
- ✓ Armadura en pantalla: Momento en la base, acero vertical, acero mínimo vertical, acero mínimo horizontal arriba, abajo.
- ✓ Armadura talón posterior: Momento en la base, acero longitudinal, acero mínimo longitudinal.
- ✓ Armadura talón anterior: Momento en la base, acero longitudinal, acero mínimo longitudinal.

16.1.14) Algoritmo para diseño de muros laterales

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Materiales: Peso específico del concreto, resistencia del concreto, esfuerzo de fluencia del acero.
- ✓ Suelo de fundación: Capacidad de carga admisible, ángulo de fricción interna, coeficiente de fricción concreto – terreno, peso específico del relleno.
- ✓ Acero de refuerzo: Recubrimiento en pantalla, refuerzo vertical en pantalla, refuerzo horizontal en pantalla, recubrimiento en zapata, refuerzo en talón anterior, refuerzo en talón posterior.
- ✓ Sobre carga, dimensiones t , E, B, G, H, F, D, y C.

Procesos realizados:

- ✓ Aplicación de ecuaciones 13.01, 13.02, 13.03, 13.04, 13.05, 13.06, 13.07, 13.08, 13.09, 13.10, 13.11, 13.12, 13.13, 13.14, 13.15, 13.16, 13.17, 13.18, 13.19, 13.20, 13.21, 13.22, 13.23, y 13.24.

Resultados obtenidos:

- ✓ Pivote en punto A: Momentos actuantes (fuerza, Brazo, momento), momentos resistentes (fuerza, Brazo, momento).
- ✓ Pivote en punto B: Momentos actuantes (fuerza, Brazo, momento), momentos resistentes (fuerza, Brazo, momento).
- ✓ Estabilidad: Seguridad al volteo, seguridad al deslizamiento, punto de paso de la resultante, reacciones del terreno.
- ✓ Armadura en pantalla: Momento en la base, fuerza cortante mayorada, acero vertical, mínimo vertical, mínimo horizontal.
- ✓ Armadura talón posterior: Momento en la base, acero longitudinal, acero mínimo longitudinal.
- ✓ Armadura talón anterior: Momento en la base, acero longitudinal, acero mínimo longitudinal.

16.1.15) Algoritmo para análisis de estabilidad del barraje

Ingresar los siguientes datos:

- ✓ Suelo de fundación: Capacidad de carga admisible, ángulo de fricción interna, coeficiente de fricción concreto – terreno, peso específico.
- ✓ Peso específico del concreto, peso específico del suelo saturado.
- ✓ Datos adicionales: Altura de sedimentos, altura para definir figura equivalente.

Procesos realizados:

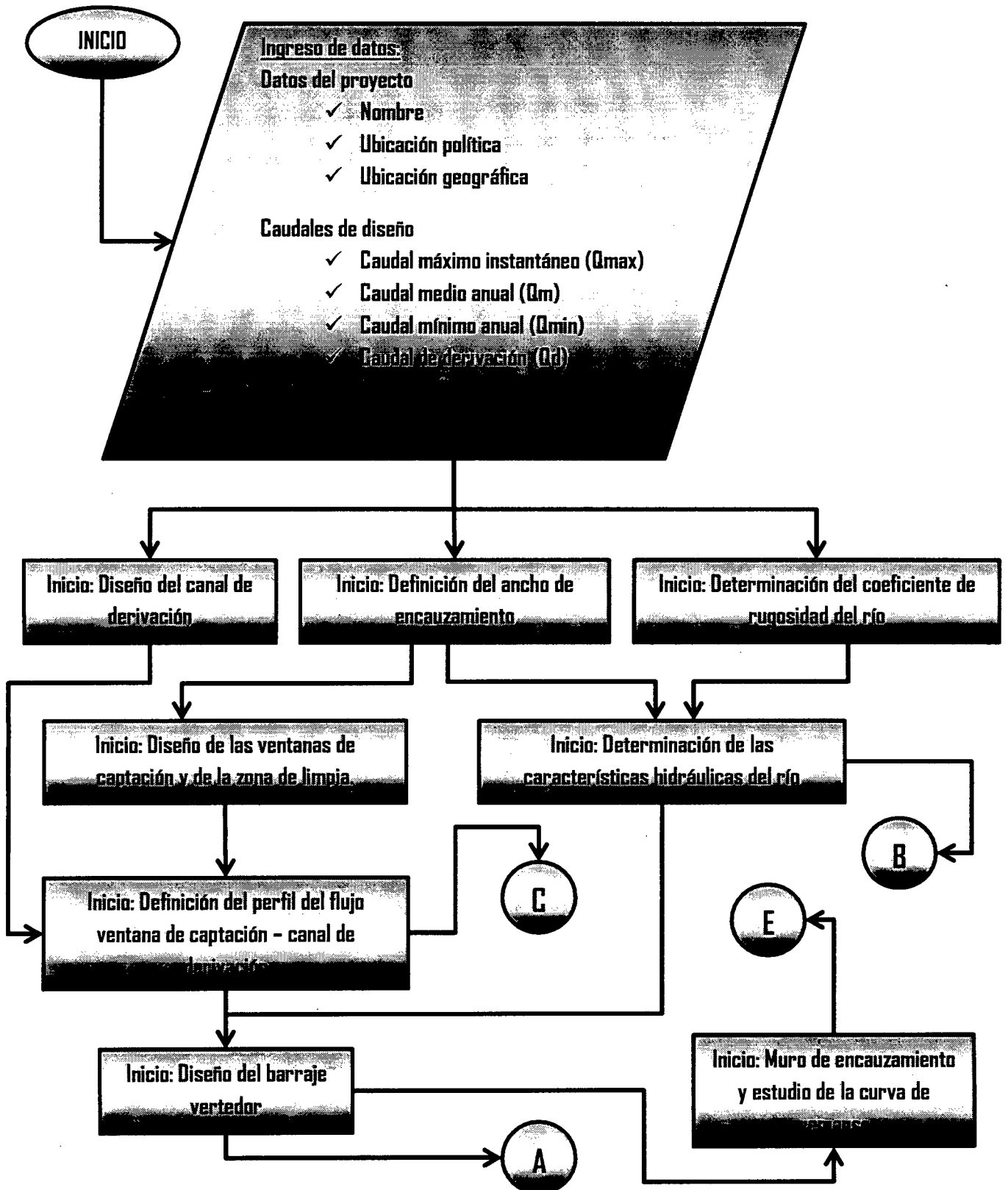
- ✓ Aplicación de ecuaciones 14.01, 14.02, 14.03, 14.04, 14.05, 14.06, 14.07, 14.08, y 14.09.

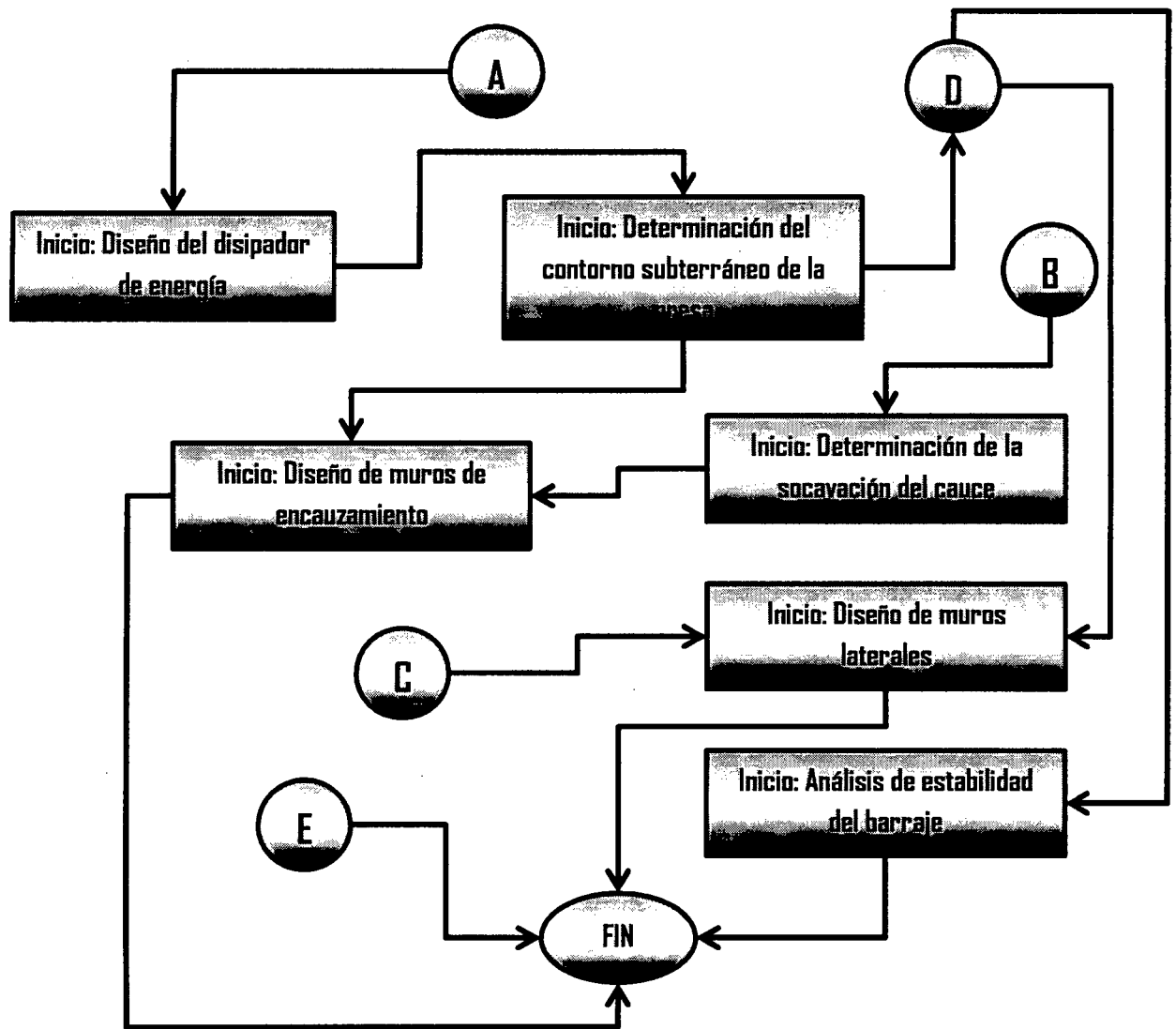
Resultados obtenidos:

- ✓ Pivote en punto k: Momentos actuantes (fuerza, Brazo, momento), momentos resistentes (fuerza, Brazo, momento).
- ✓ Pivote en punto n: Momentos actuantes (fuerza, Brazo, momento), momentos resistentes (fuerza, Brazo, momento).
- ✓ Estabilidad: Seguridad al volteo, seguridad al deslizamiento, punto de paso de la resultante, reacciones del terreno.

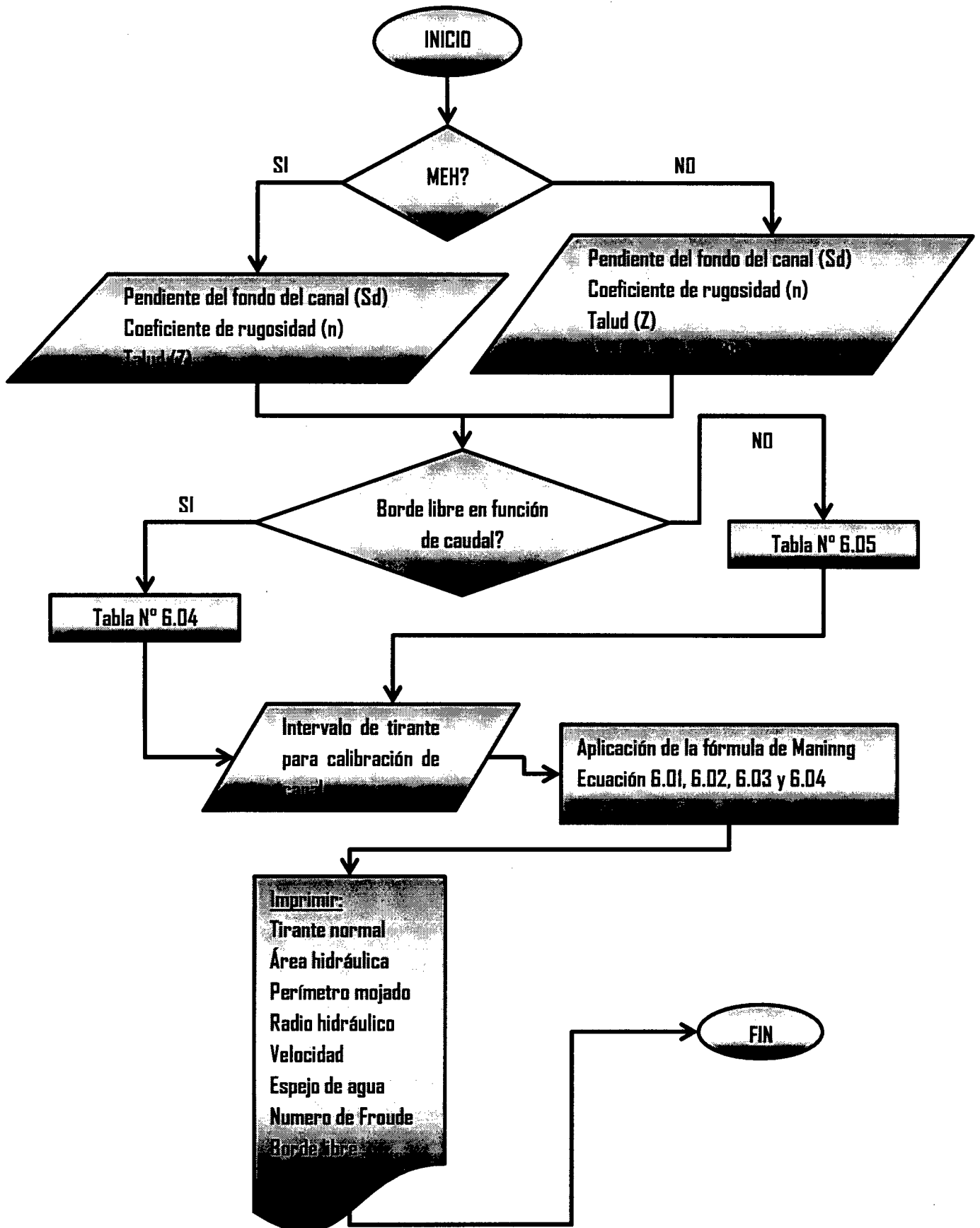
16.2) DIAGRAMAS DE FLUJO PARA DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DE BOCATOMAS TIPO BARRAJE

16.2.1) Diagrama de flujo general del software

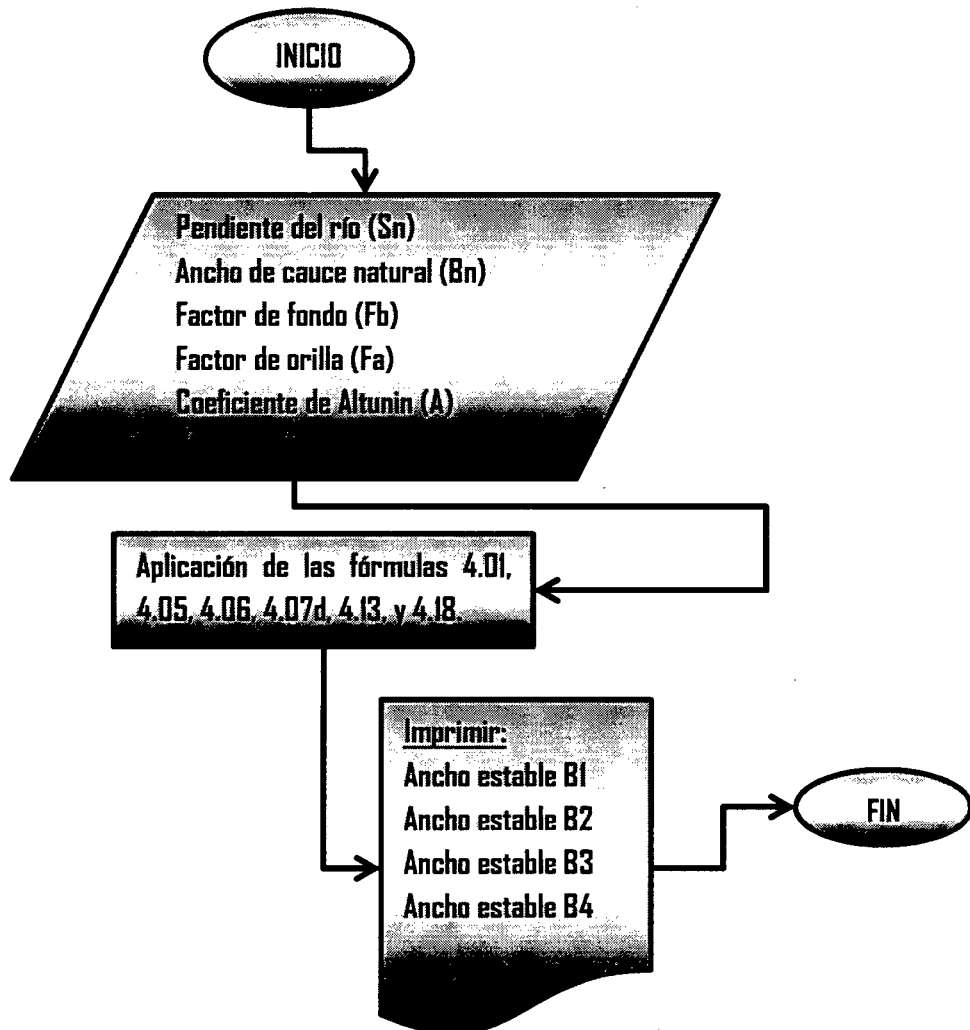




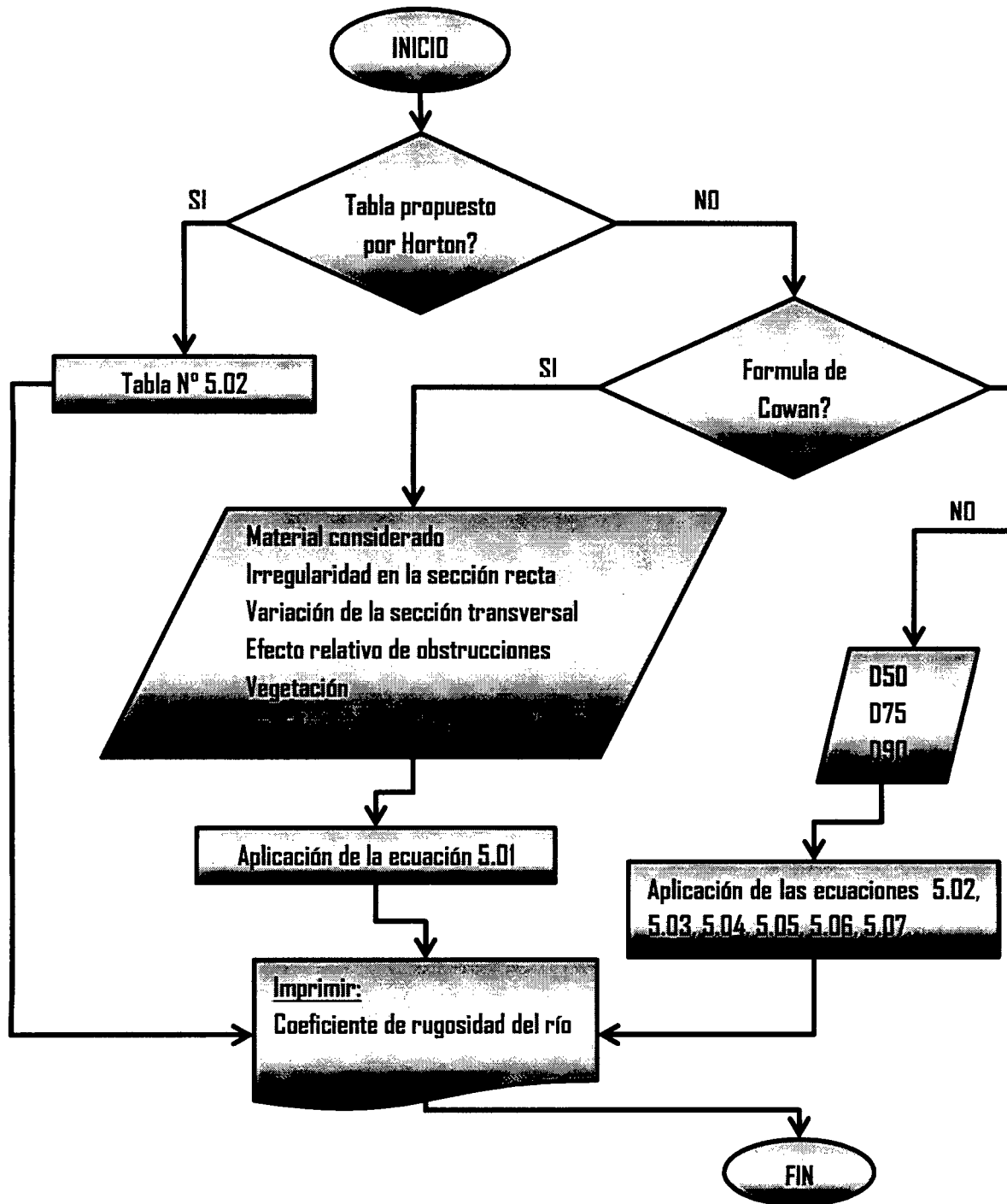
16.2.2) Diagrama de flujo: Diseño del canal de derivación



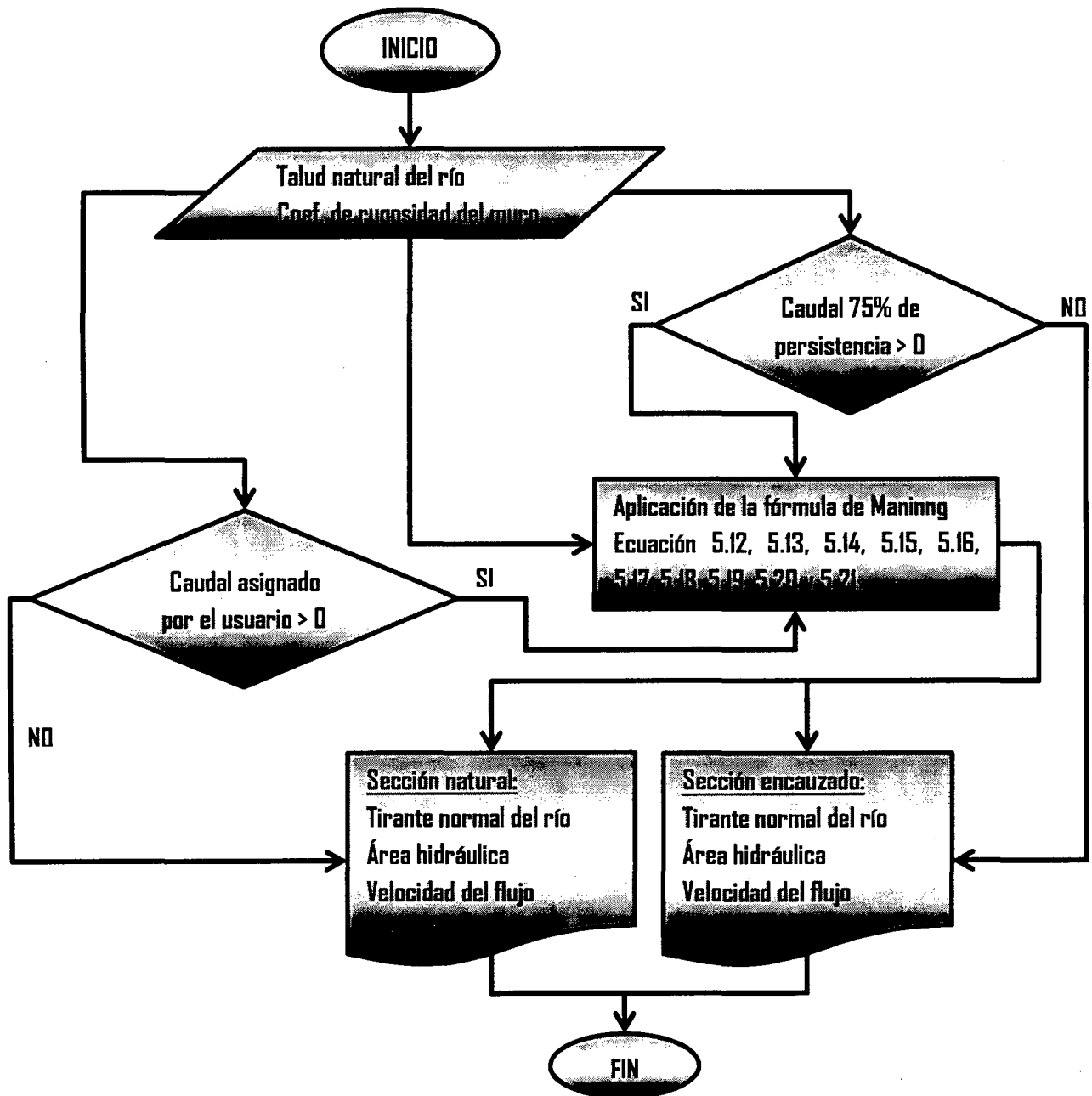
16.2.3) Diagrama de flujo: Definición del ancho de encauzamiento



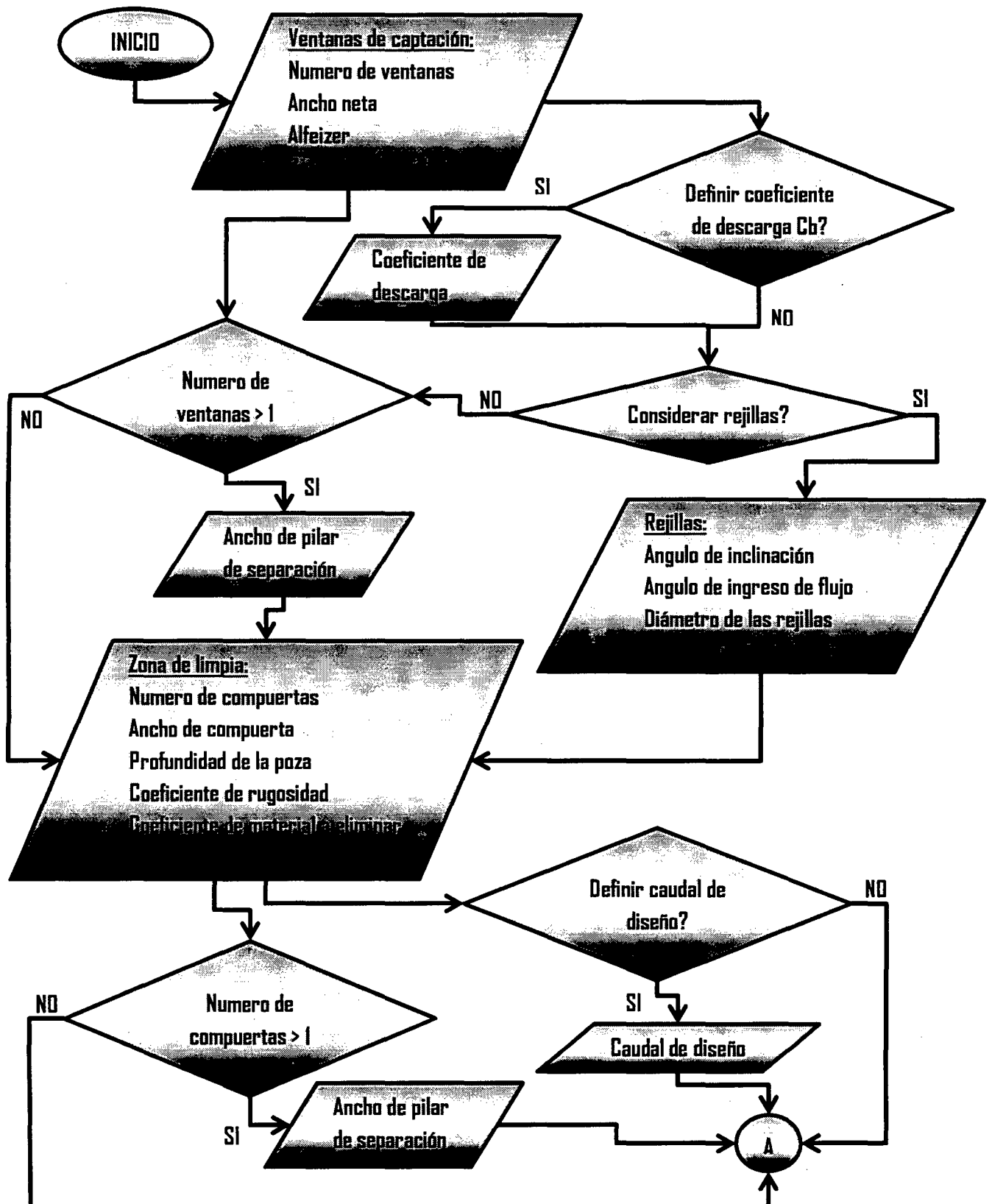
16.2.4) Diagrama de flujo: Determinación del coeficiente de rugosidad del río



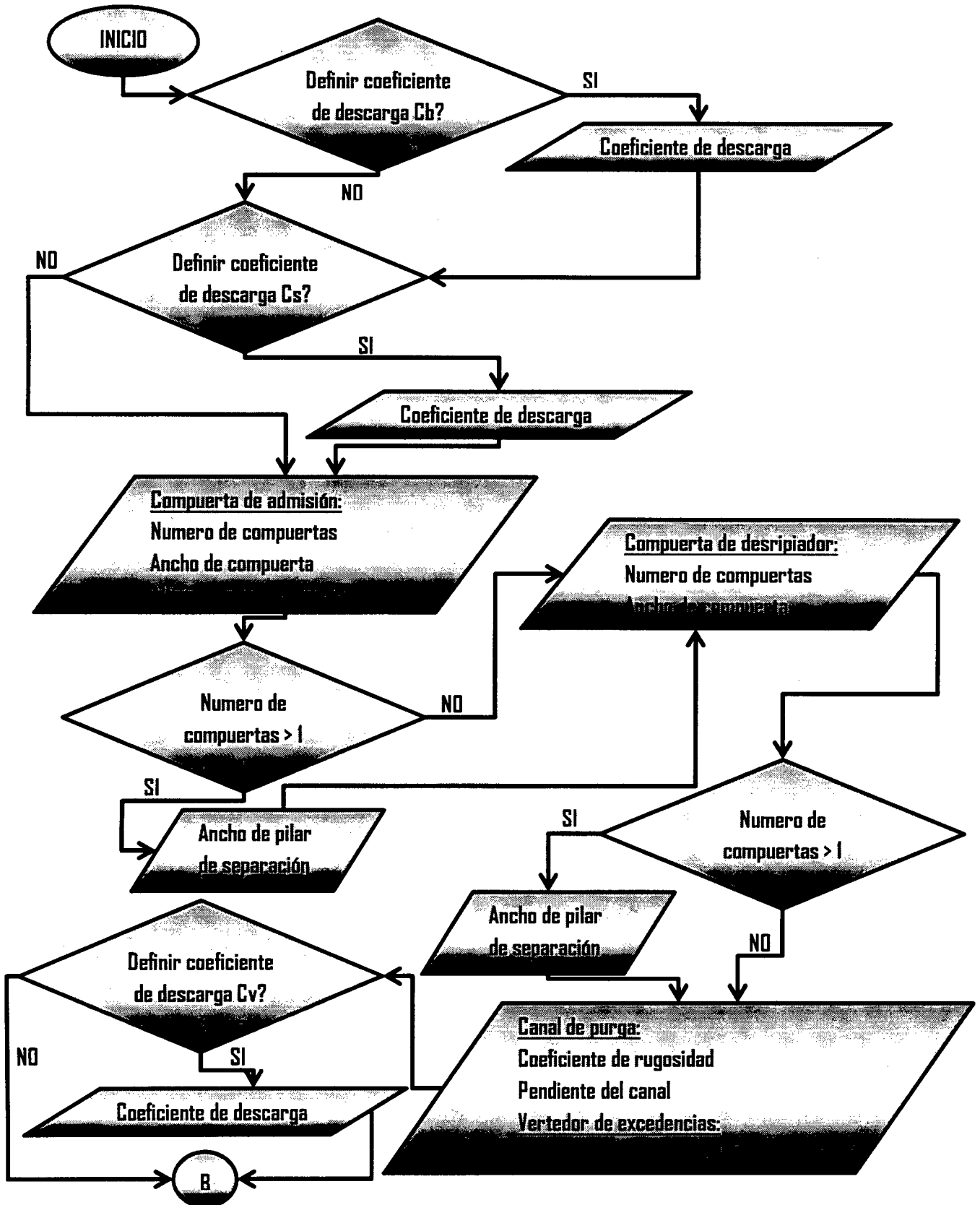
16.2.5) Diagrama de flujo: Características hidráulicas del río

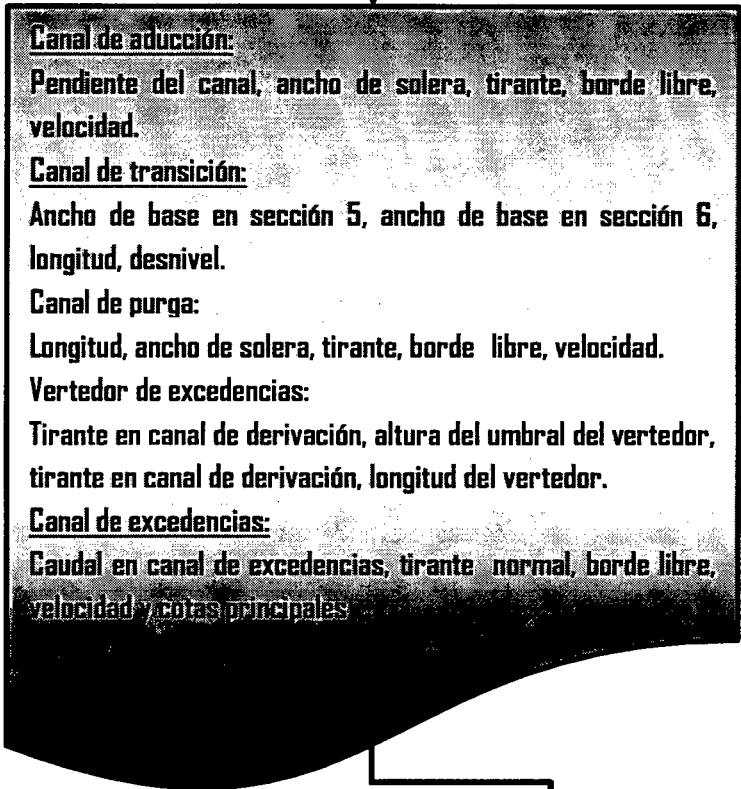
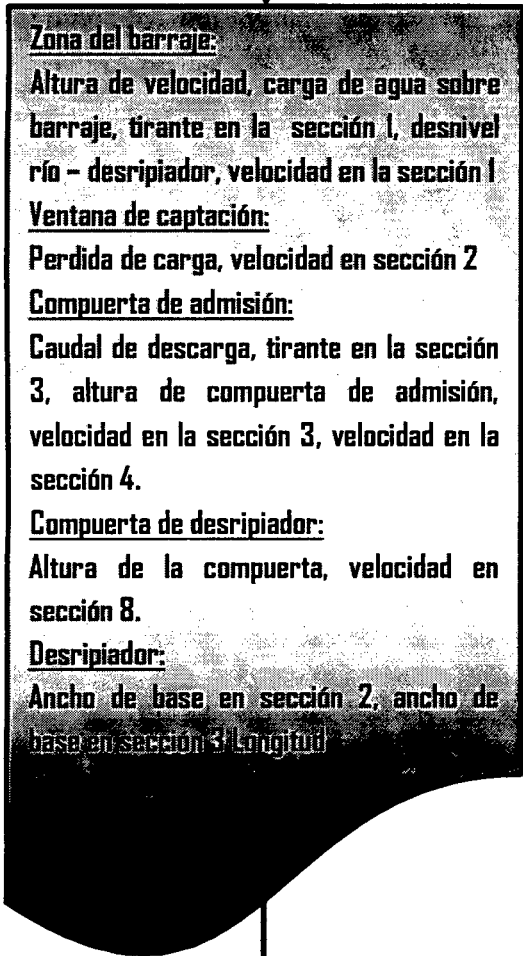
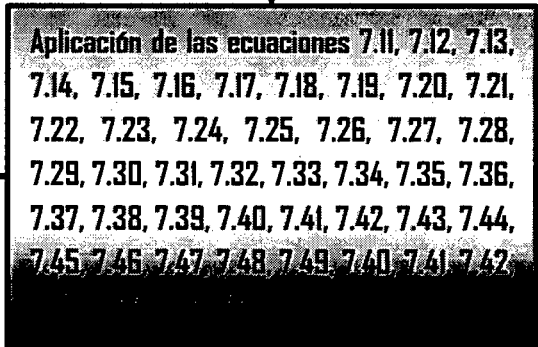
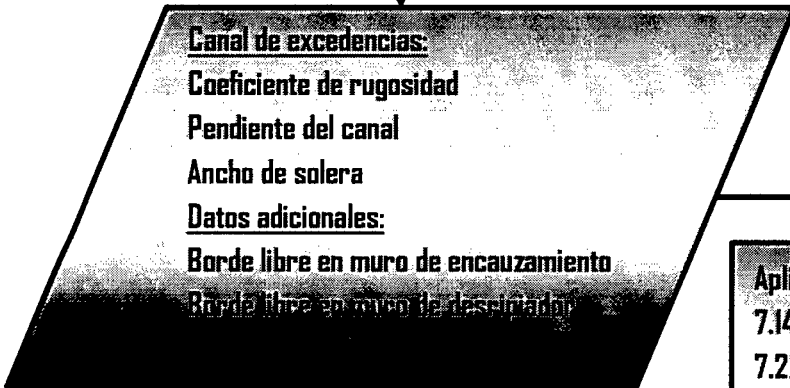


16.2.6) Diagrama de flujo: Diseño de ventanas de captación y zona de limpia

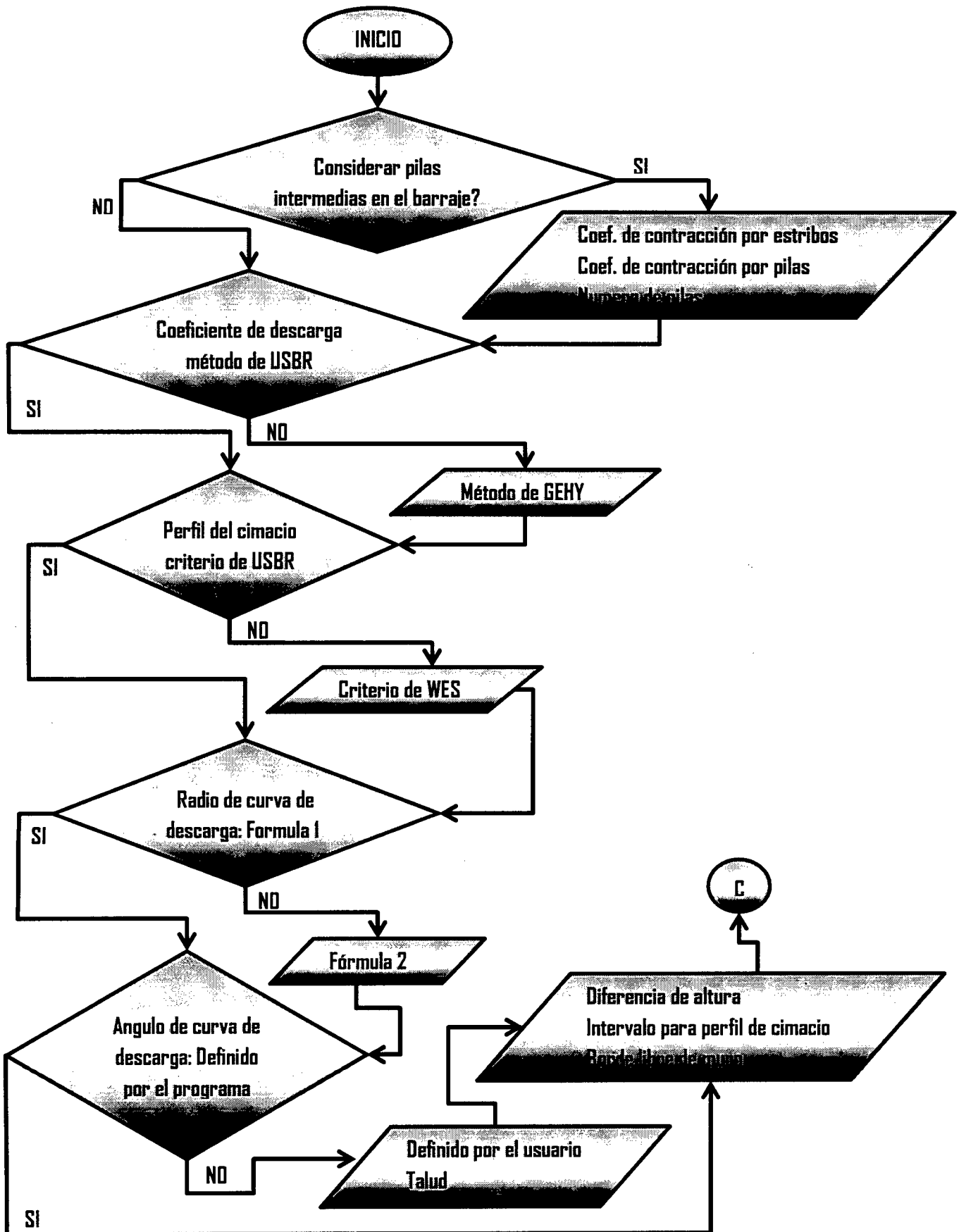


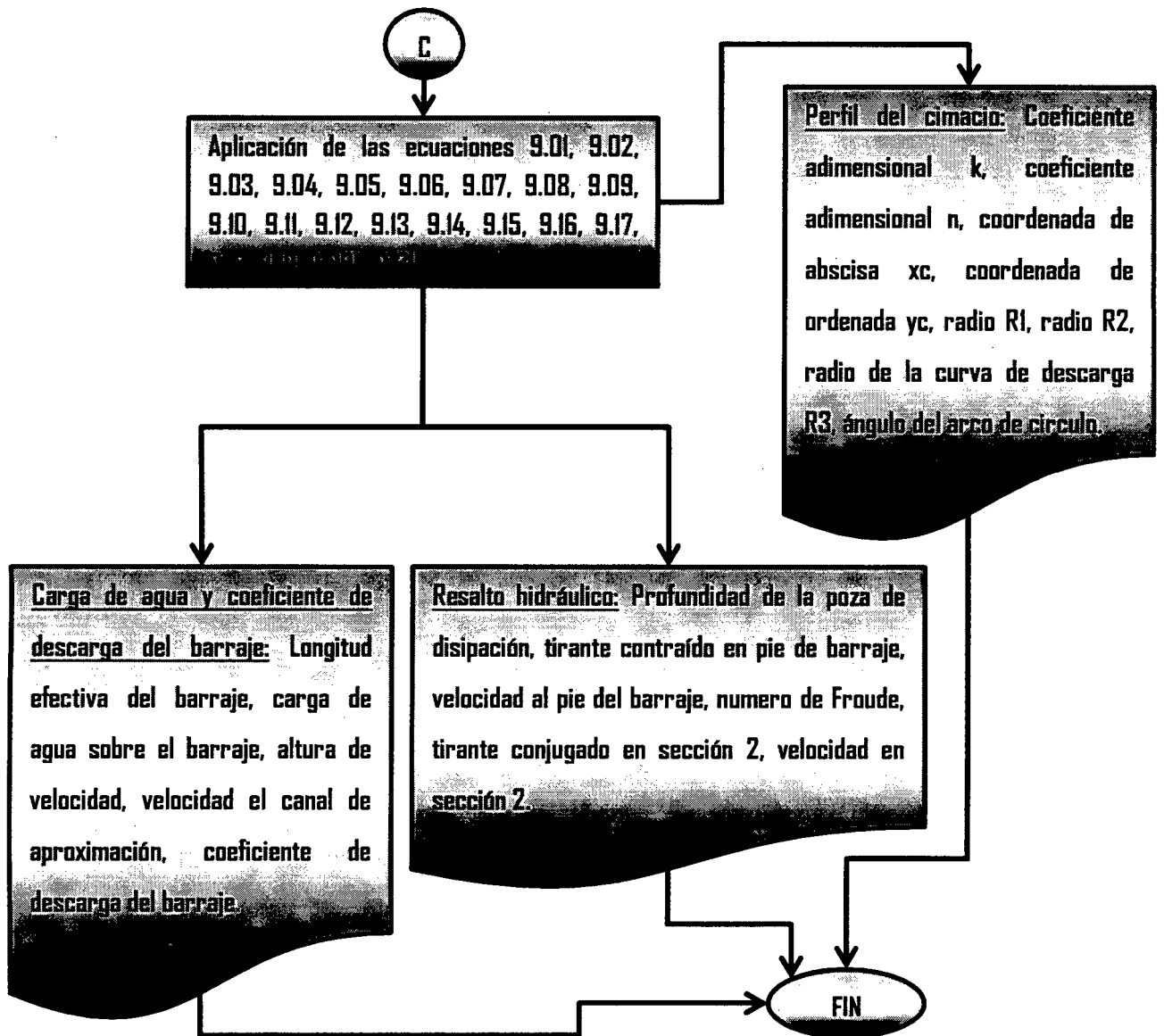
16.2.7) Diagrama de flujo: Perfil del flujo ventana de captación – canal de derivación.



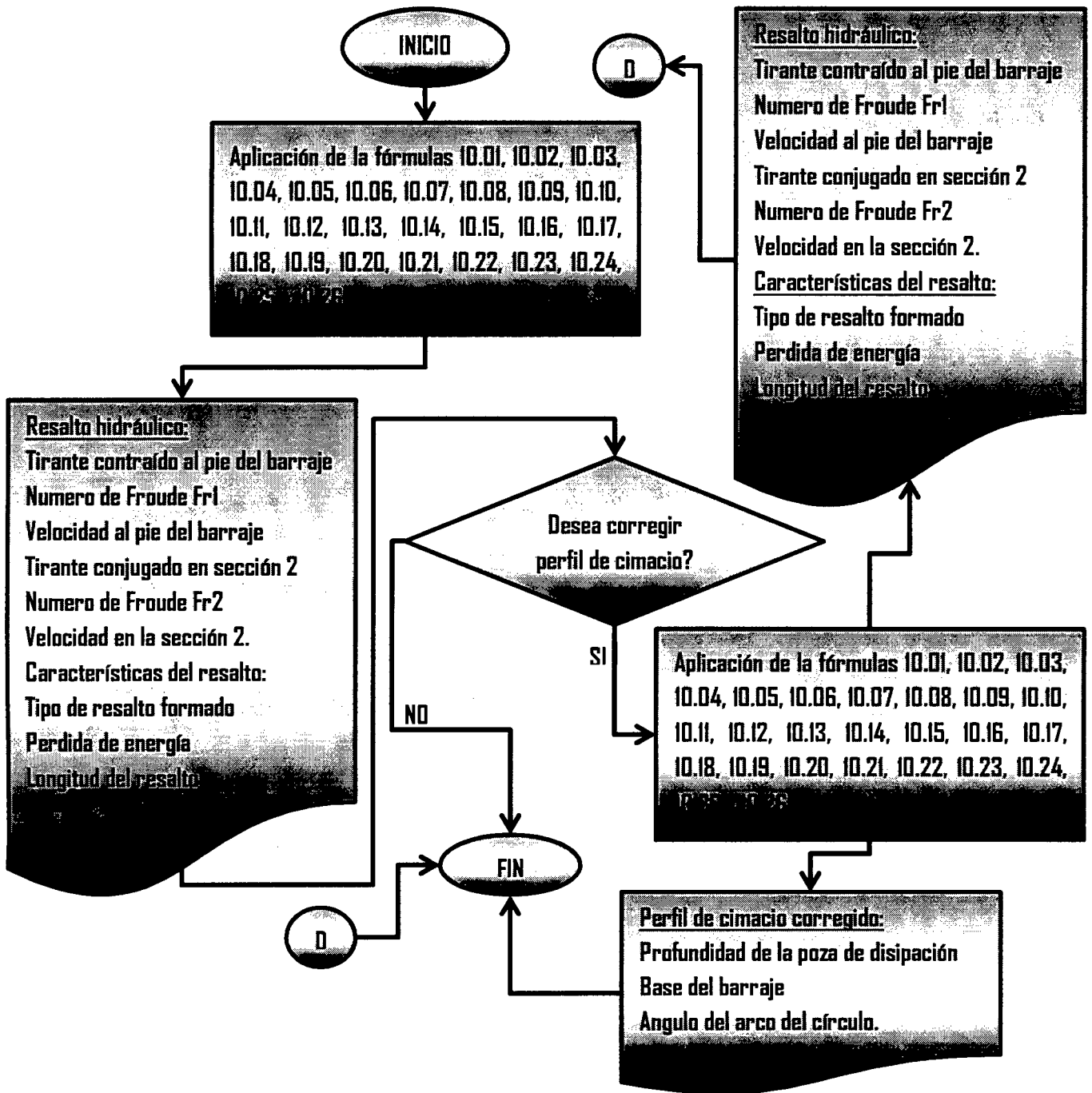


16.2.8) Diagrama de flujo: Diseño del barraje vertedor

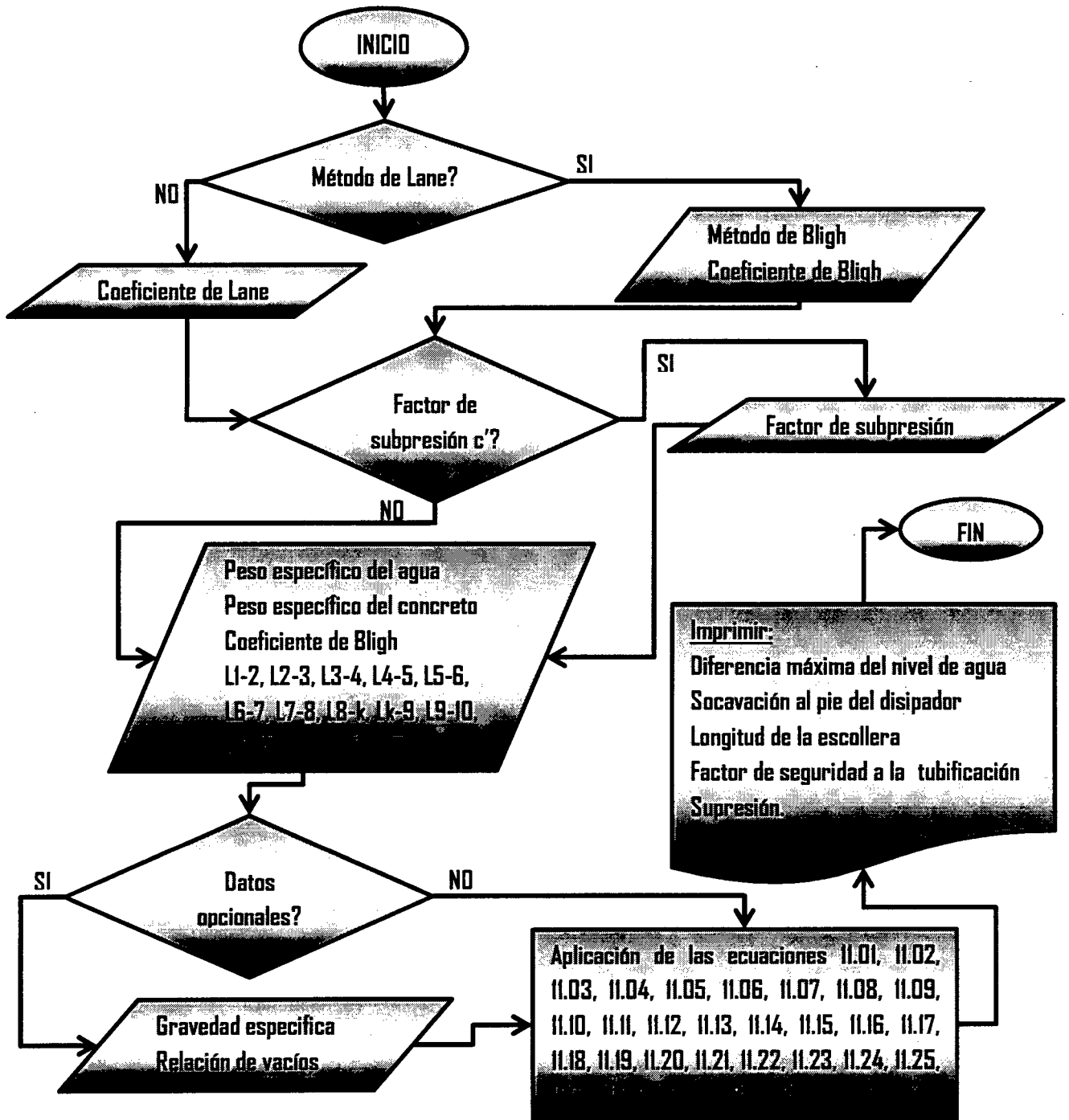




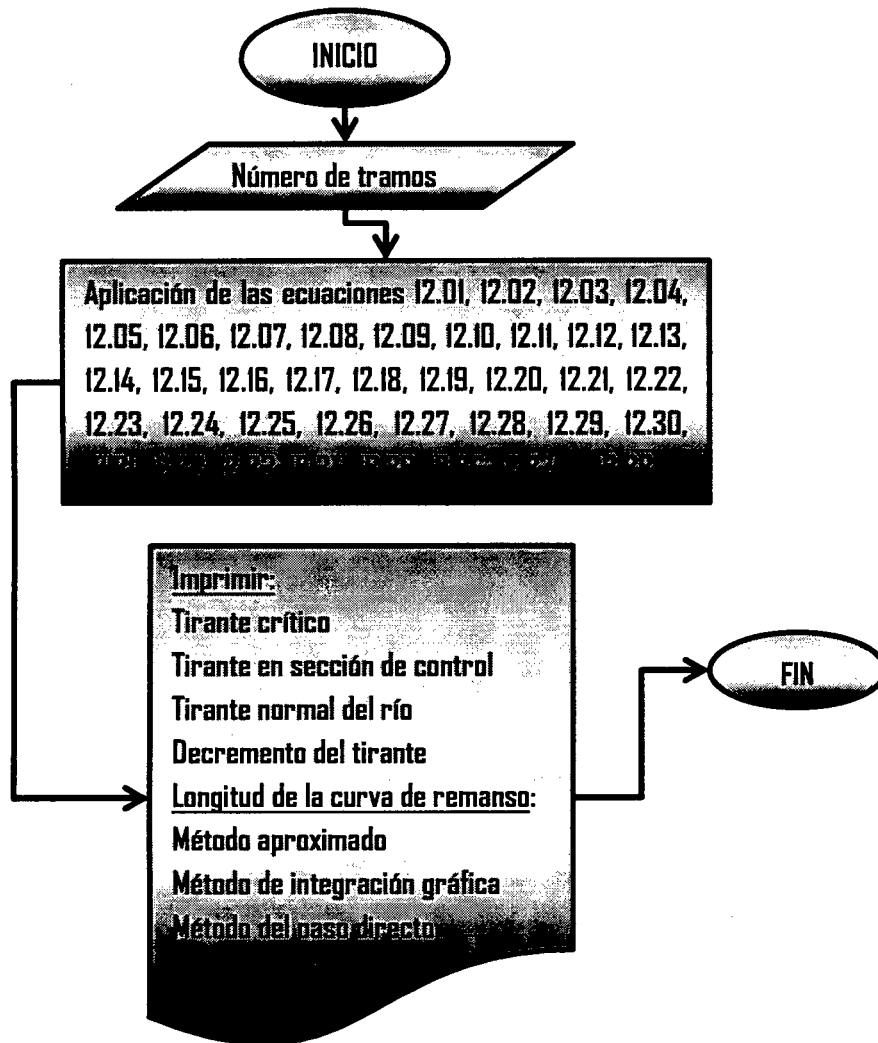
16.2.9) Diagrama de flujo: Diseño del disipador de energía



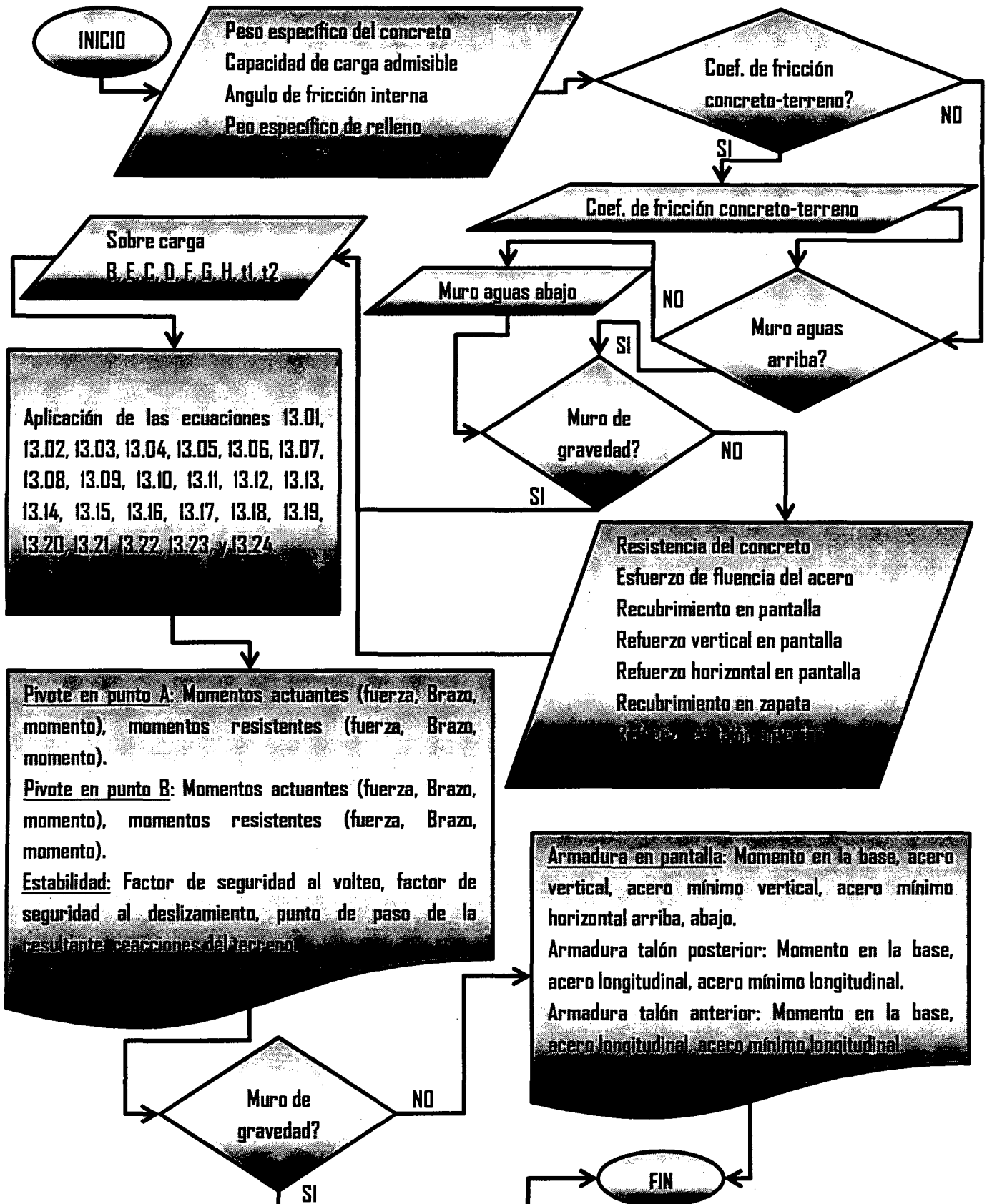
16.2.10) Diagrama de flujo: Determinación del contorno subterráneo de la presa



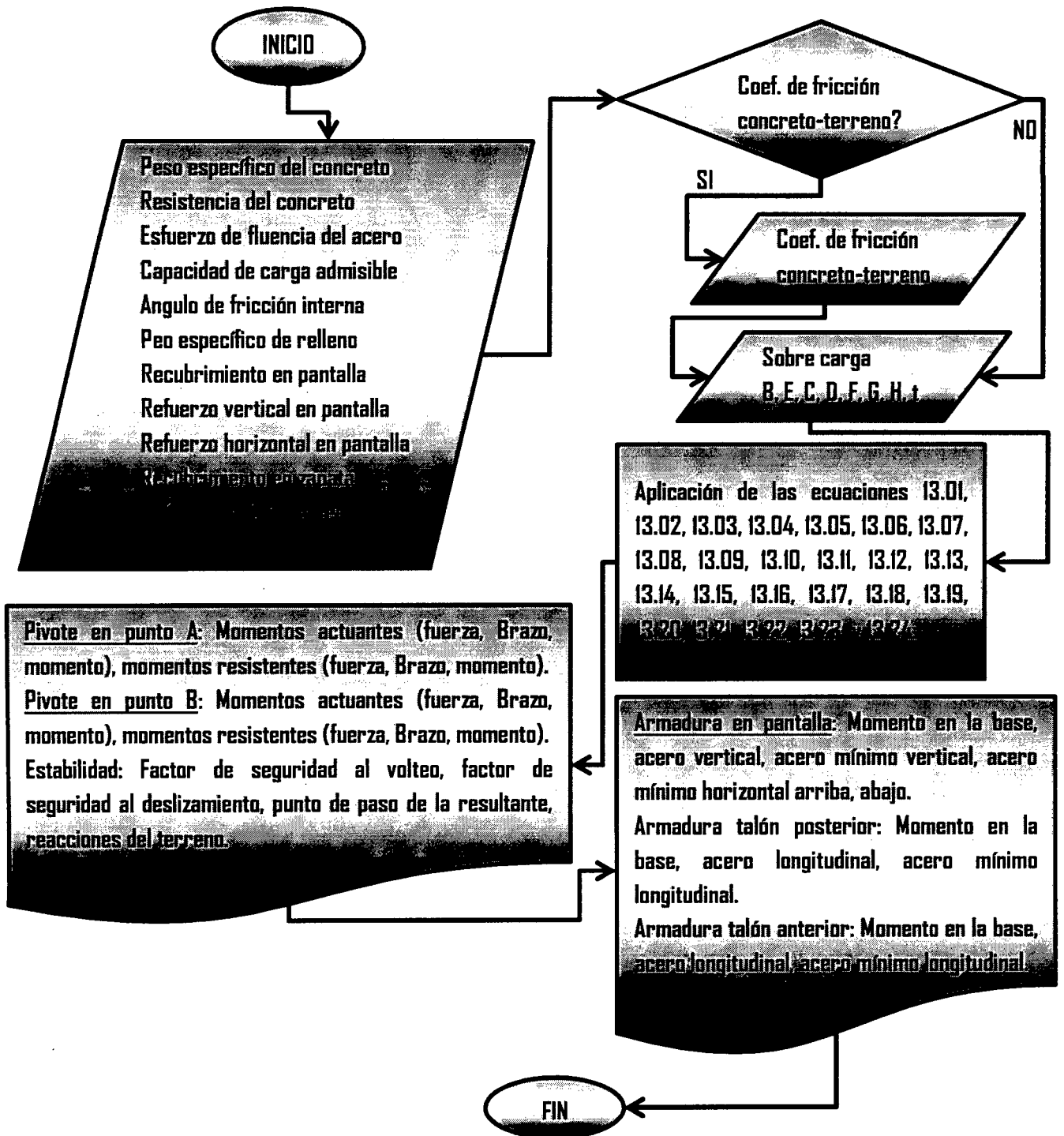
16.2.11) Diagrama de flujo: Muro de encauzamiento y curva de remanso



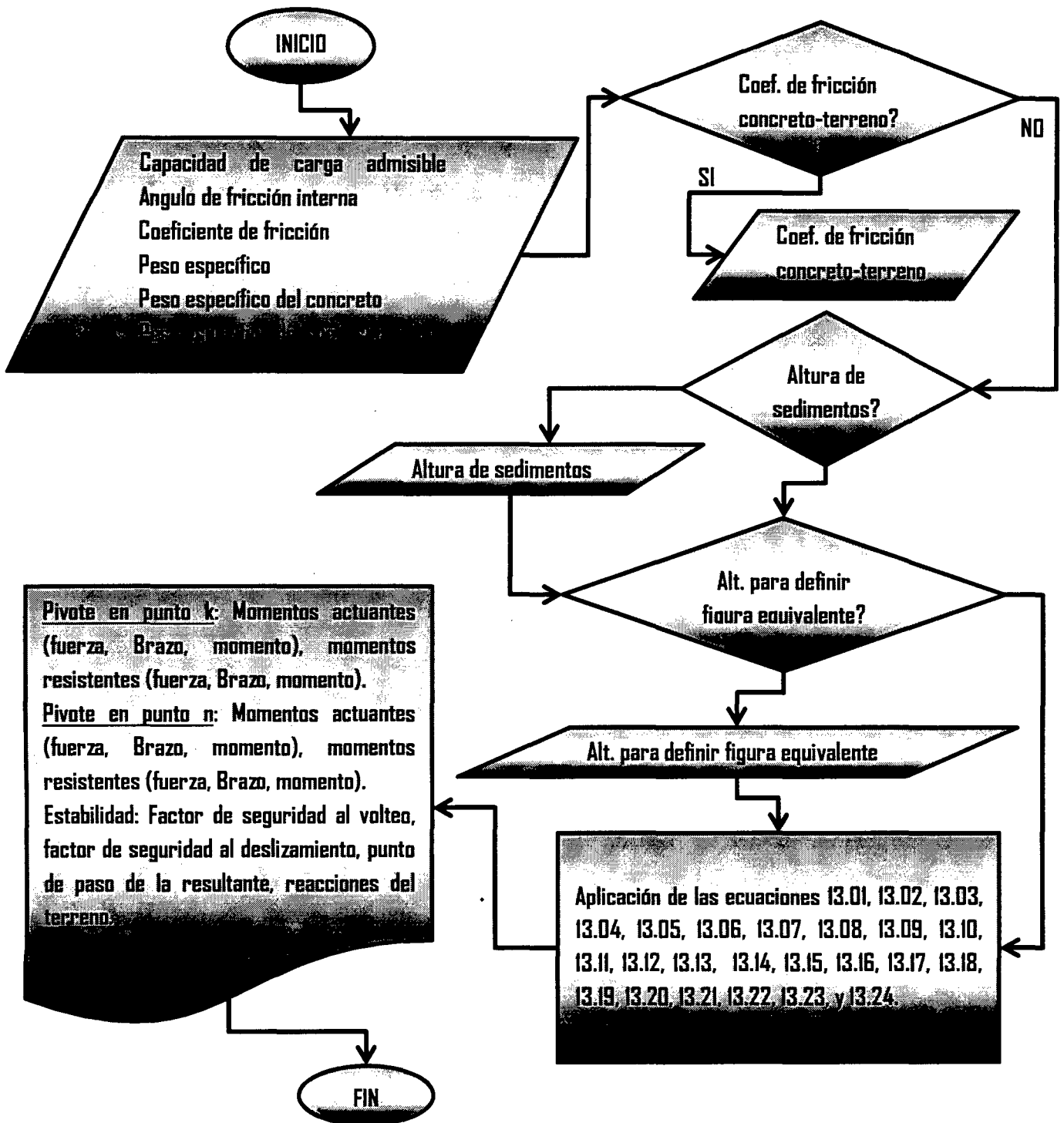
16.2.13) Diagrama de flujo: Diseño de muros de encauzamiento



16.2.14) Diagrama de flujo: Diseño de muros laterales



16.2.15) Diagrama de flujo: Análisis de estabilidad del barraje



16.3) DESCRIPCIÓN DEL LENGUAJE USADO

16.3.1) Visual Studio 2010

Visual Studio es un completo conjunto de herramientas de desarrollo para crear aplicaciones Windows, Web ASP.NET, Web Services XML, aplicaciones de escritorio, y aplicaciones móviles. Visual Basic, Visual C# y visual C++ utilizan el mismo entorno de desarrollo integrado (IDE), herramienta que permite compartir y facilitar la creación de soluciones de lenguaje mixto. Además estos lenguajes usan la funcionalidad de .NET Framework, el cual, proporciona acceso a las tecnologías clave que simplifican el desarrollo de aplicaciones.

16.3.2) Net Framework 4.0

El "Framework" o marco de trabajo, constituye la base de la plataforma .NET y denota la infraestructura sobre la cual se reúnen un conjunto de lenguajes, herramientas y servicios que simplifican el desarrollo de aplicaciones en entorno de ejecución distribuido.

16.3.3) Visual Basic 2010

Visual - Basic es una herramienta de diseño de aplicaciones para Windows, en la que estas se desarrollan en una gran parte a partir del diseño de una interface gráfica. En una aplicación Visual - Basic, el programa está formado por una parte de código puro, y otras partes asociadas a los objetos que forman la interface gráfica.

Es por tanto un término medio entre la programación tradicional, formada por una sucesión lineal de código estructurado, y la programación orientada a objetos. Combina ambas tendencias. Ya que no podemos decir que VB pertenezca por completo a uno de esos dos tipos de programación, debemos inventar una palabra que la defina: PROGRAMACION VISUAL.

17.0 RESULTADOS OBTENIDOS

17.1) SOFTWARE PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL DE BOCATOMAS TIPO BARRAJE (DHEBB V2.0.0)

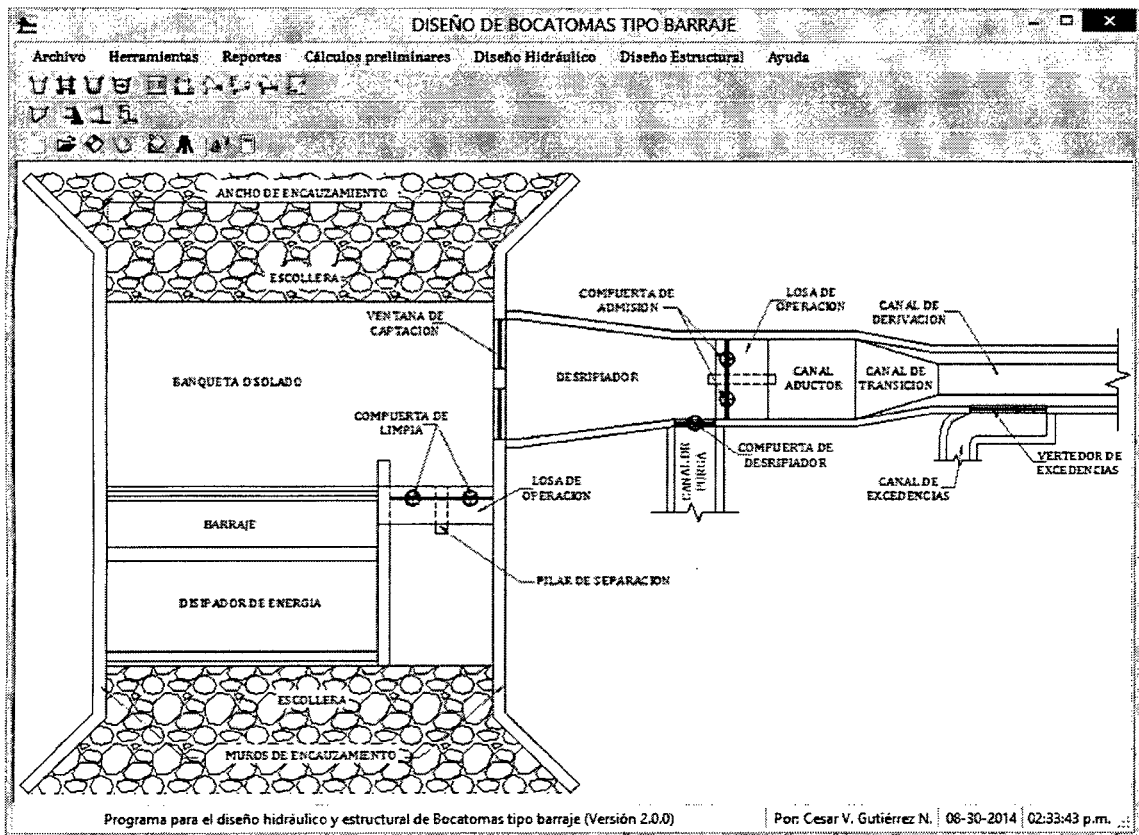
El programa de ingeniería denominado DHEBB V2.0.0 tiene como objetivo el diseño hidráulico y estructural de cada uno de los componentes que forman parte de una bocatoma tipo barraje, tomando en consideración los datos propios de cada zona, donde se requiera el diseño y posterior construcción de esta obra de aprovechamiento hidráulico.

Como se mencionó anteriormente el lenguaje usado para la programación del software “**Diseño hidráulico y estructural de bocatomas tipo barraje**” fue el Visual Basic 2010. A continuación como resultado a los objetivos planteados, se describirán las partes más importantes del programa y la forma de utilizarlas, el manual completo o la guía de uso del programa puede verse en el ítem 17.2.

El programa consta de catorce módulos de cálculo, las cuales comparten datos (envían y/o reciben) durante la ejecución del software, y como resultado final obtenemos el diseño de la bocatoma tipo barraje, los módulos mencionados son los siguientes:

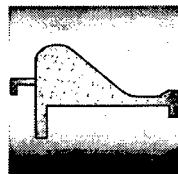
- Diseño del canal de derivación.
- Definición del ancho de encauzamiento.
- Determinación del coeficiente de rugosidad del río.
- Determinación de las características hidráulicas del río.
- Diseño de las ventanas de captación y de la zona de limpia.
- Definición del perfil del flujo ventana de captación – canal de derivación.
- Diseño del barraje vertedor.
- Diseño del dissipador de energía.
- Determinación del contorno subterráneo de la presa.
- Muro de encauzamiento y estudio de la curva de remanso.
- Determinación de la socavación del cauce.
- Diseño de los muros de encauzamiento.
- Diseño de los muros laterales.

➤ Análisis de estabilidad del barrage.



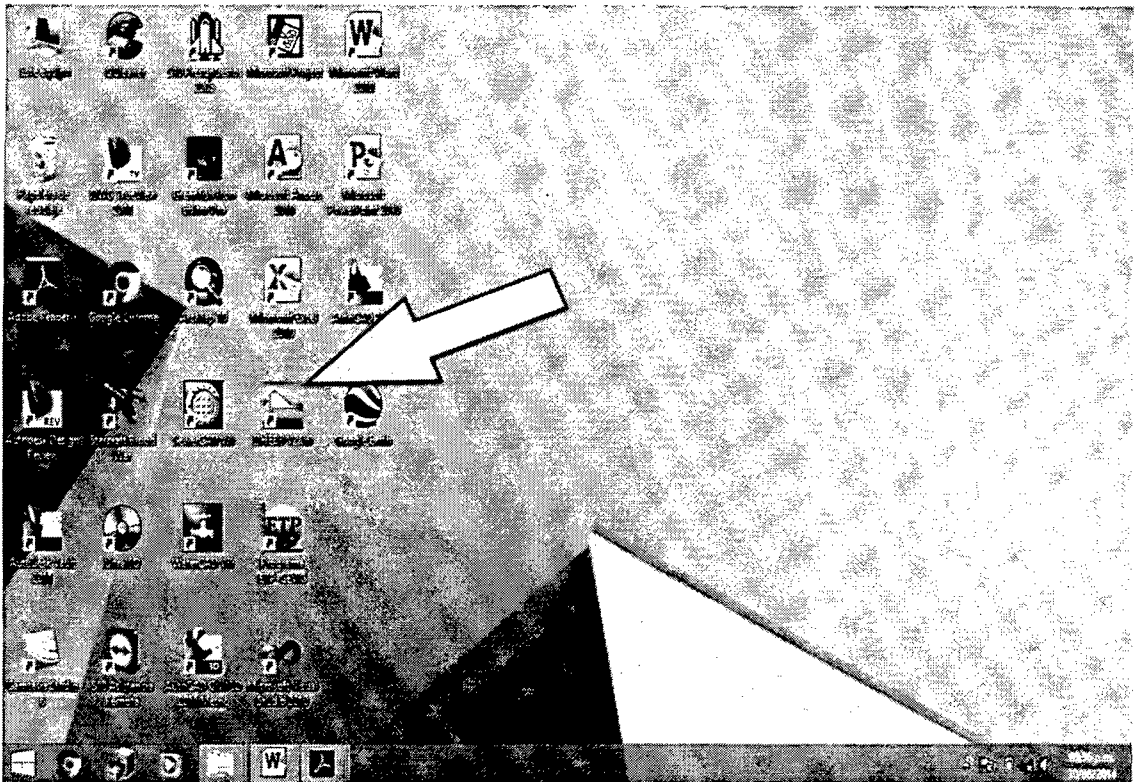
17.2) MANUAL DEL USUARIO DEL SOFTWARE DHEBB V2.0.0

Para hacer referencia al software DHEBB V2.0.0 dentro del sistema operativo de Windows, que tiene instalado en su computadora personal, puede identificarse a través del siguiente icono:

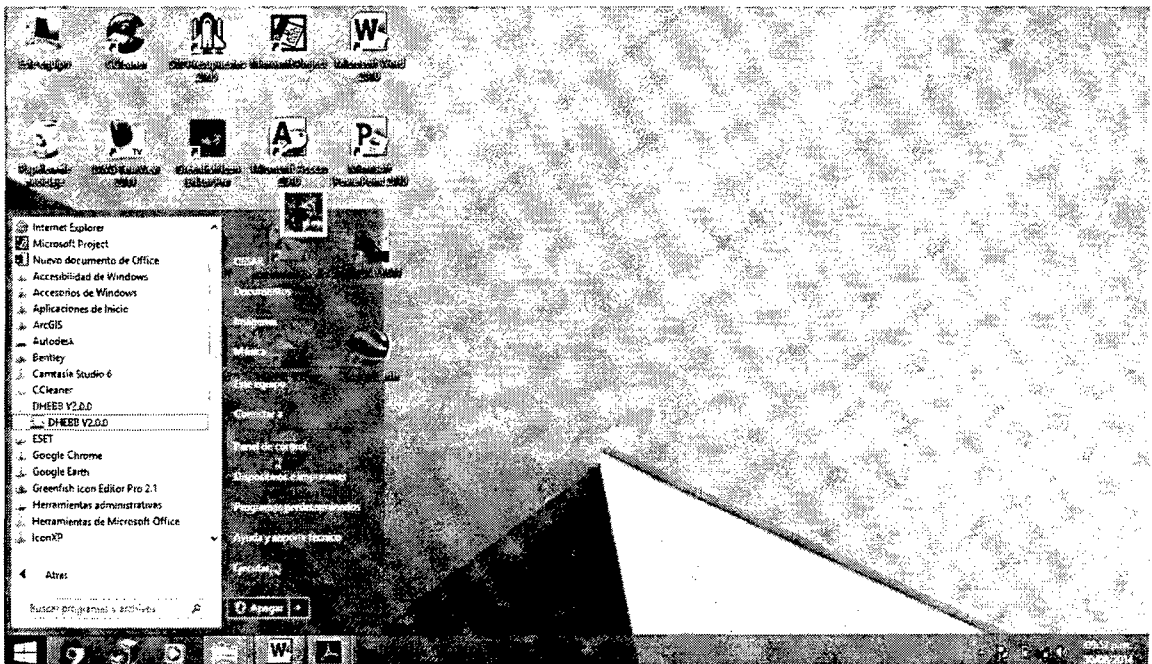


17.2.1) Como ingresar al programa

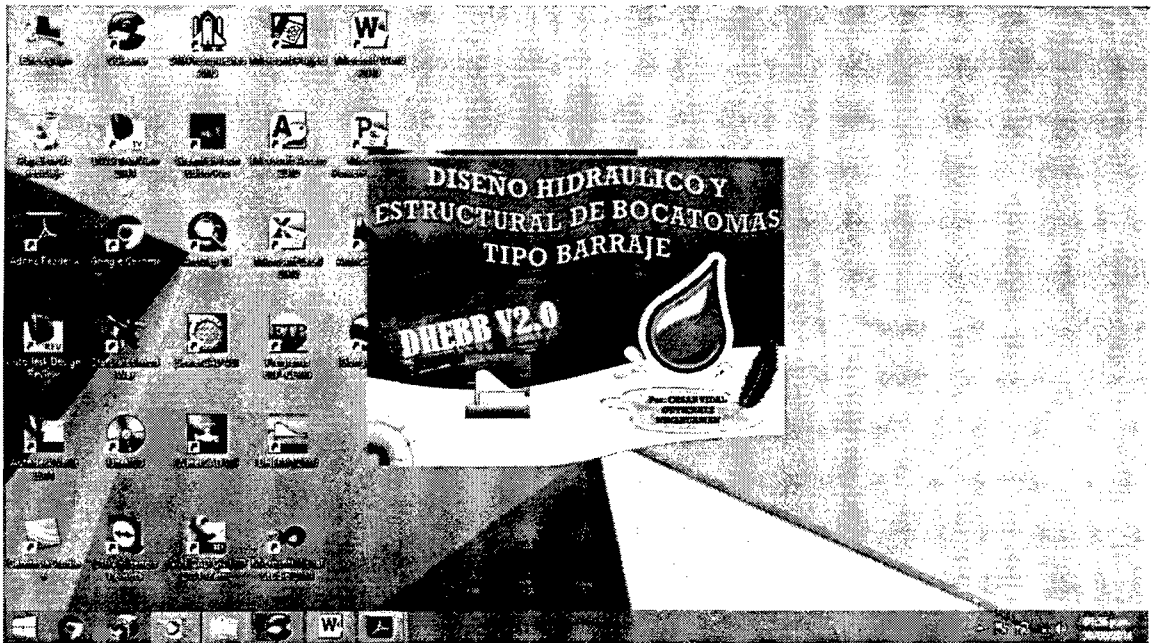
Para poder ingresar al software DHEBB V2.0.0, puede hacerlo desde el icono que se encuentra en el escritorio, doble click sobre él para ejecutarlo.



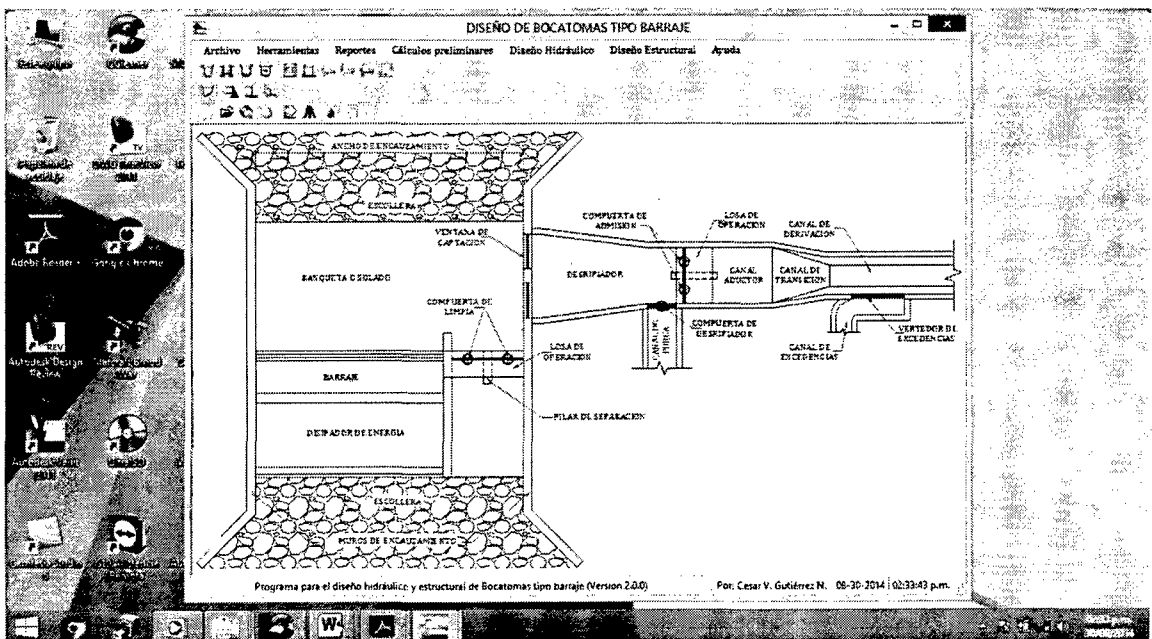
Otra forma de ingresar al software es a través del menú inicio, elección de la carpeta DHEBB V2.0.0, y click en el icono del software.



Después de ejecutado el software, la siguiente ventana que veremos es la pantalla de presentación, esperar unos segundos a que cargue:

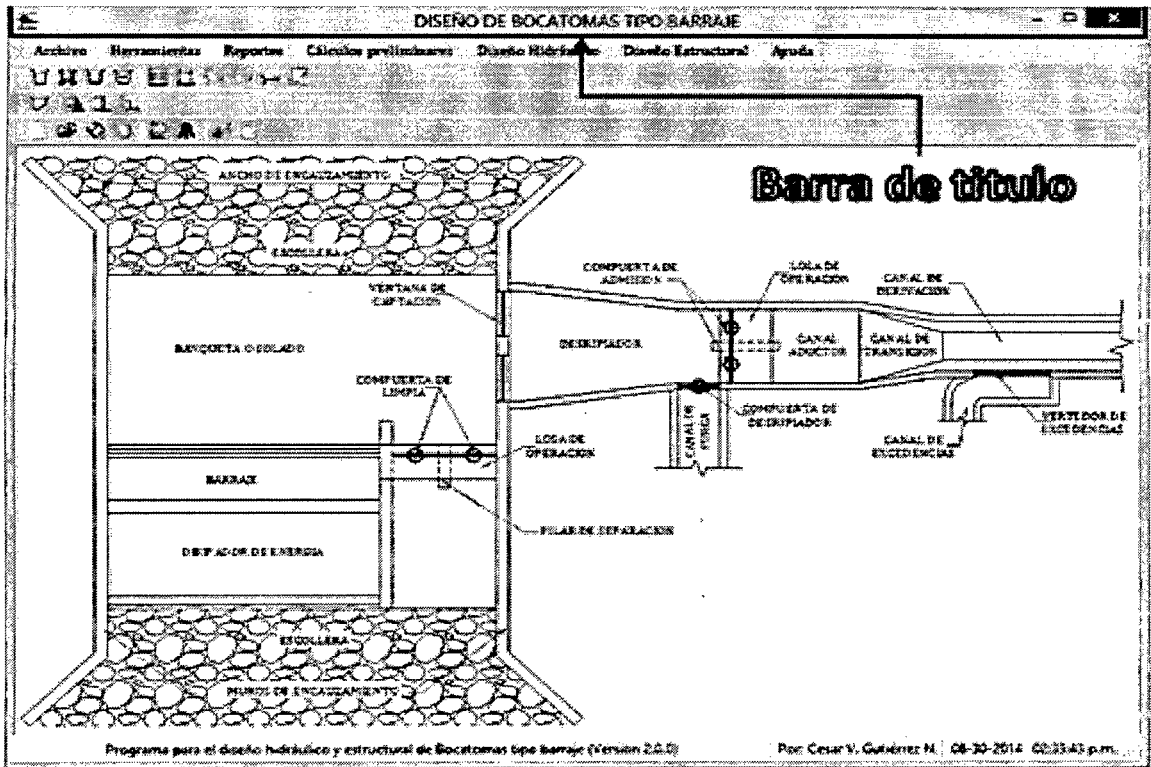


A continuación muestra la pantalla principal del software, desde donde tenemos acceso a la barra de menús, barras de herramientas (Diseño hidráulico, diseño estructural y herramientas). Es la ventana desde donde puede gestionarse todo el proyecto de diseño, ingreso hacia a los diferentes módulos de diseño, ingreso a las principales herramientas, administrar el proyecto, etc.

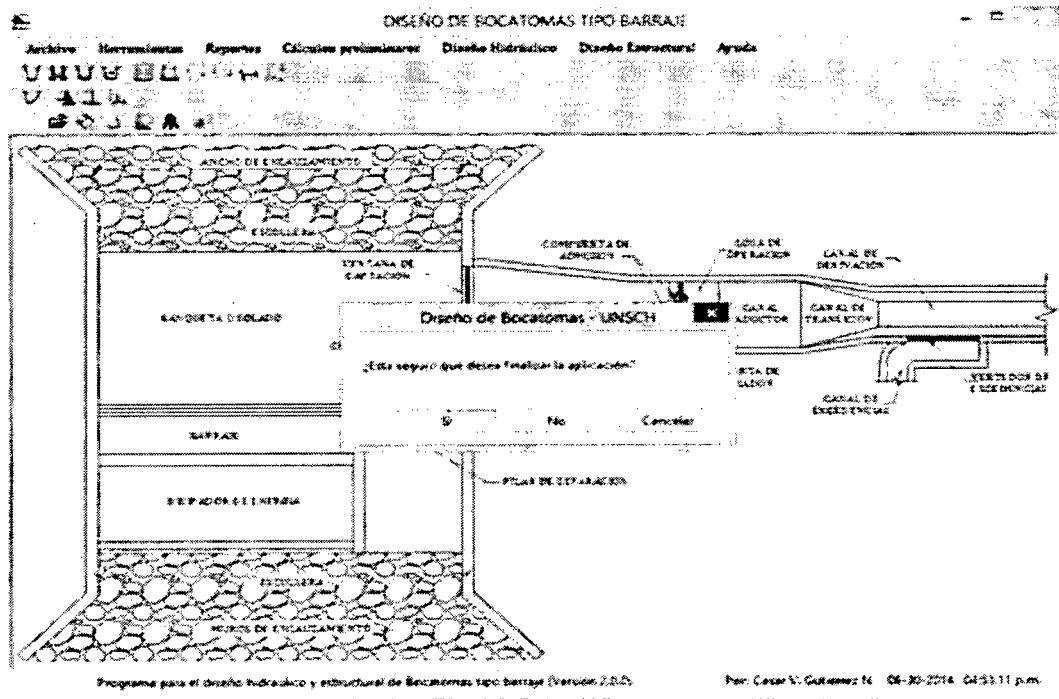


17.2.2) Barra de Título

Muestra el icono, los botones de administración del formulario y el título de la aplicación:

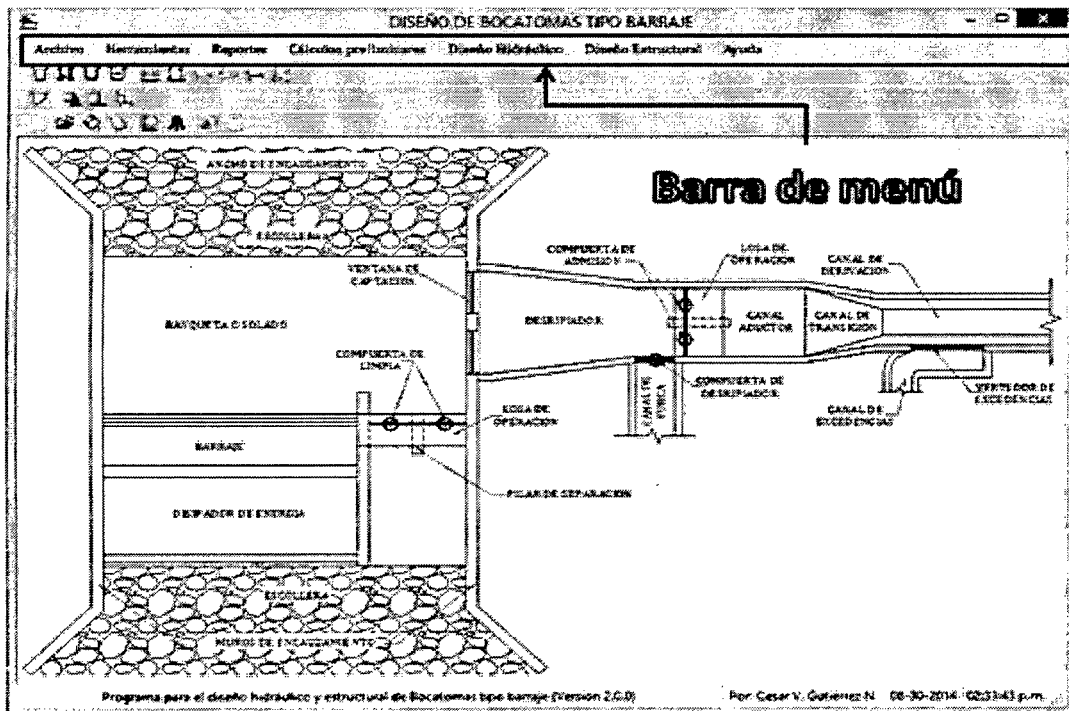


Los botones de administración del formulario principal permiten realizar las siguientes acciones: Minimizar, maximizar, y cerrar.

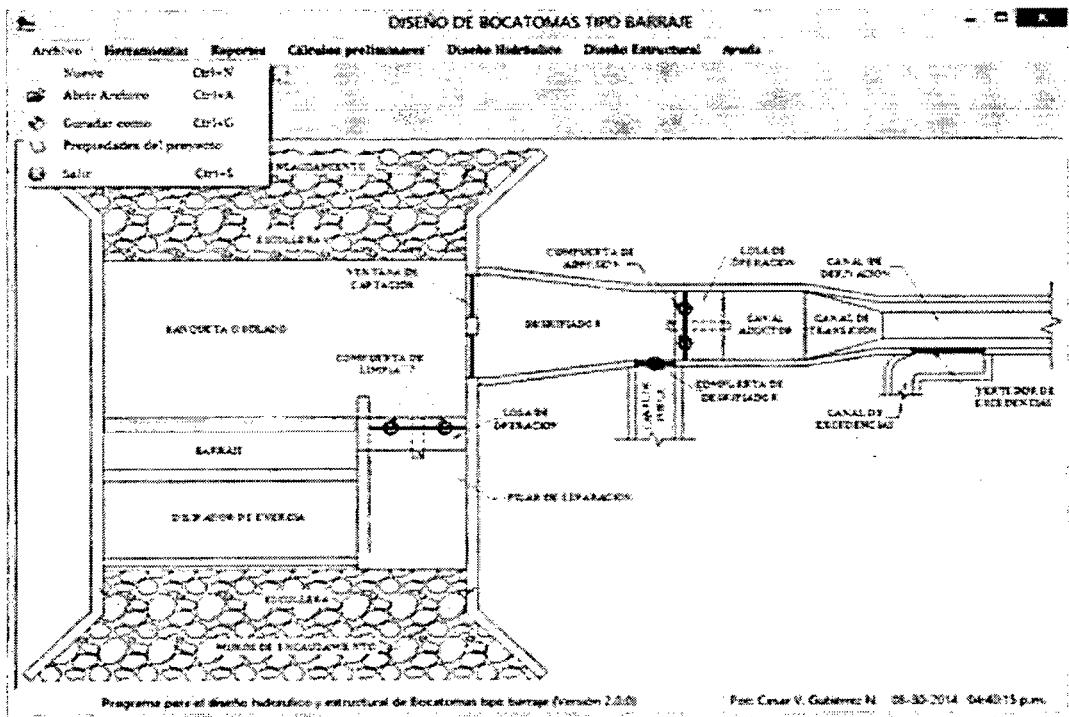


17.2.3) Barra de menús


En esta sección explicaremos casa uno de los componentes, de la barra de menús. A continuación presentamos la barra de menús:



a) Menú Archivo



El menú Archivo contiene las opciones: Nuevo, abrir archivo, guardar como, propiedades del proyecto, salir.

 **Nuevo (Ctrl+N):** Reinicia el proyecto, para empezar uno nuevo, perderá datos y resultados que actualmente está trabajando.

 **Abrir Archivo (Ctrl+A):** Puede abrir un proyecto existente,

anteriormente guardado, con la extensión .BOC, para poder continuar con el diseño, o modificación del proyecto. Vale recalcar que solo puede abrir datos, mas no así resultados.



Guardar como (Ctrl+G): Puede guardar un proyecto terminado, o un proyecto que no pudo concluir, para posteriormente trabajarlo. Esta herramienta permite guardar solo datos, mas no así resultados.

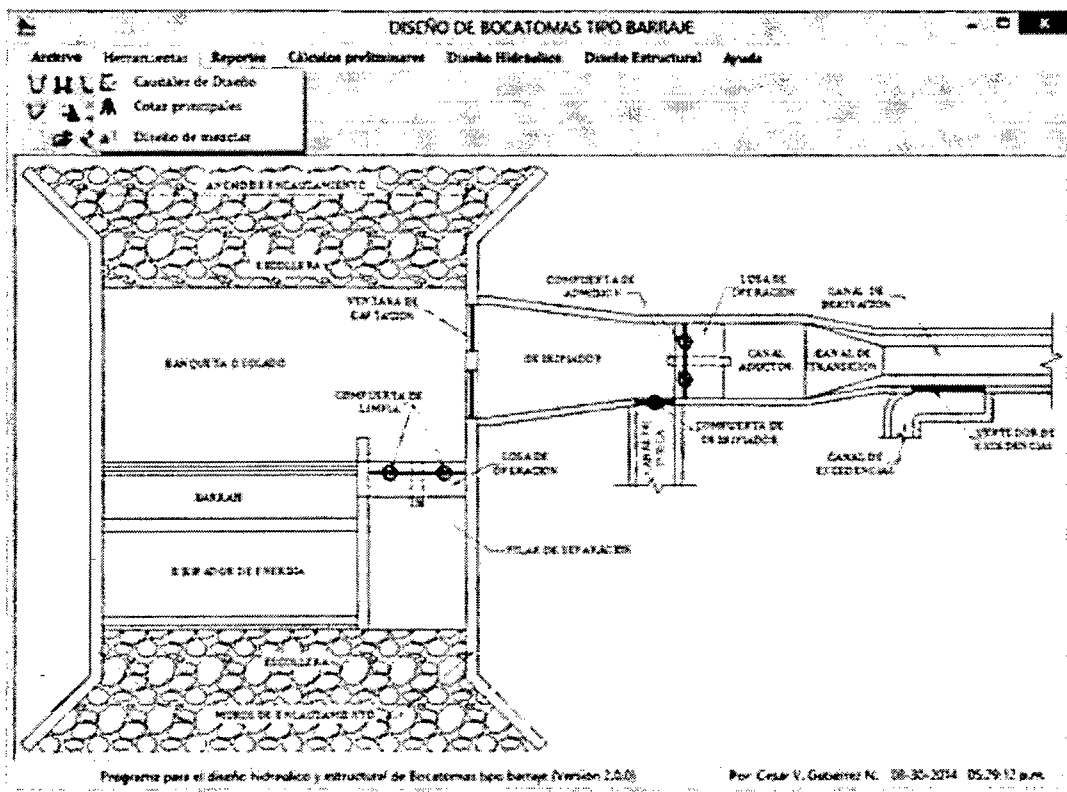


Propiedades del proyecto: Permite el ingreso hacia una nueva ventana, donde puede ingresar datos básicos del proyecto, nombre del proyecto, ubicación política y geográfica. Es importante ingresar esta información, de lo contrario el encabezado de los reportes estarán vacías.



Cerrar (Ctrl+S): Finaliza la ejecución de la aplicación.

b) Menú Herramientas



El menú Herramientas contiene las siguientes opciones: Caudales de diseño, Cotas principales, y diseño de mezclas.



Caudales de diseño: A través de esta herramienta puede ingresar los caudales de diseño (caudal máximo instantáneo, caudal mínimo anual, caudal medio anual, caudal de derivación, etc.).

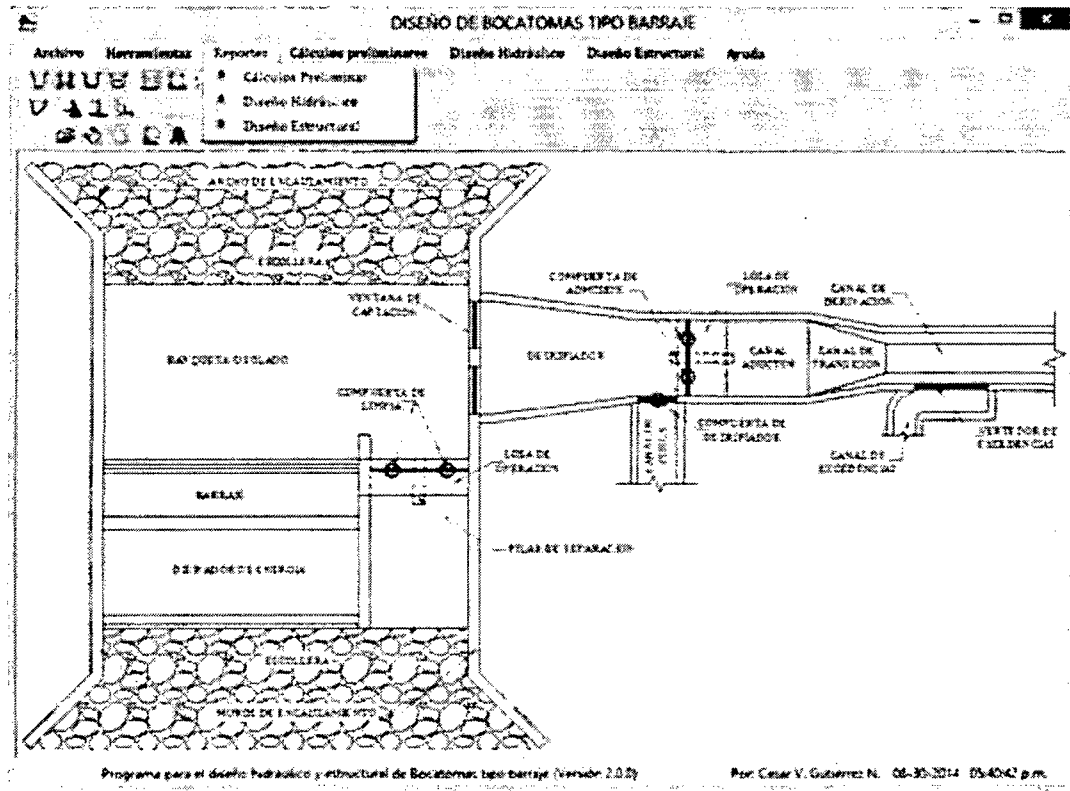


Cotas principales: Puede ingresar la cota delante de la ventana de captación, a partir del cual calculará las demás cotas en la estructura de captación.



Diseño de mezclas: Realiza la dosificación del concreto, en masa, en volumen, y determina los rendimientos de cada uno de los materiales.

c) Menú reportes



El menú reportes tiene tres opciones: Cálculos preliminares, diseño hidráulico, diseño estructural.

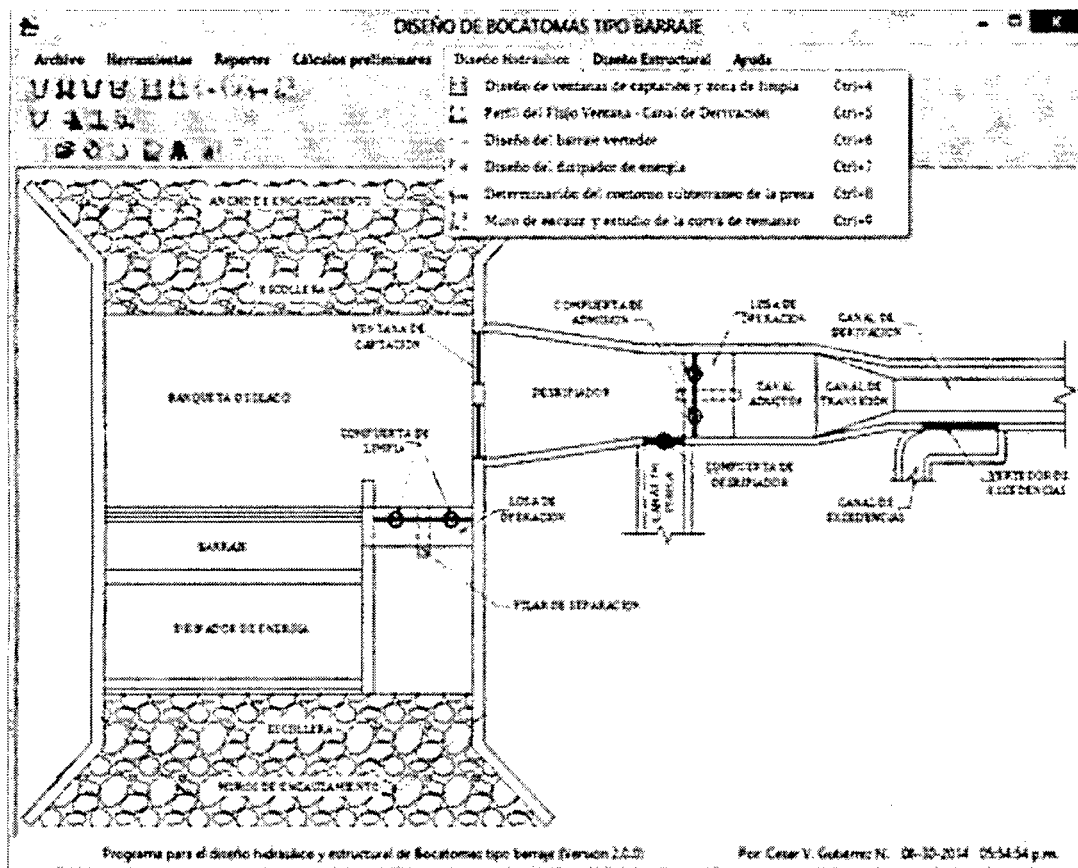


Cálculos preliminares: Realiza el reporte de resultados de los módulos, diseño del canal de derivación, definición del ancho de encauzamiento, determinación del coeficiente de rugosidad del río, y determinación de las características hidráulicas del río.



Diseño hidráulico: Realiza el reporte de resultados de los módulos, diseño de las ventanas de captación y de la zona de limpia, definición del perfil del flujo ventana de captación–canal de derivación, diseño del barraje vertedor, diseño del dissipador de energía, determinación del contorno subterráneo de la presa, muro de encauzamiento y estudio de la curva de remanso.

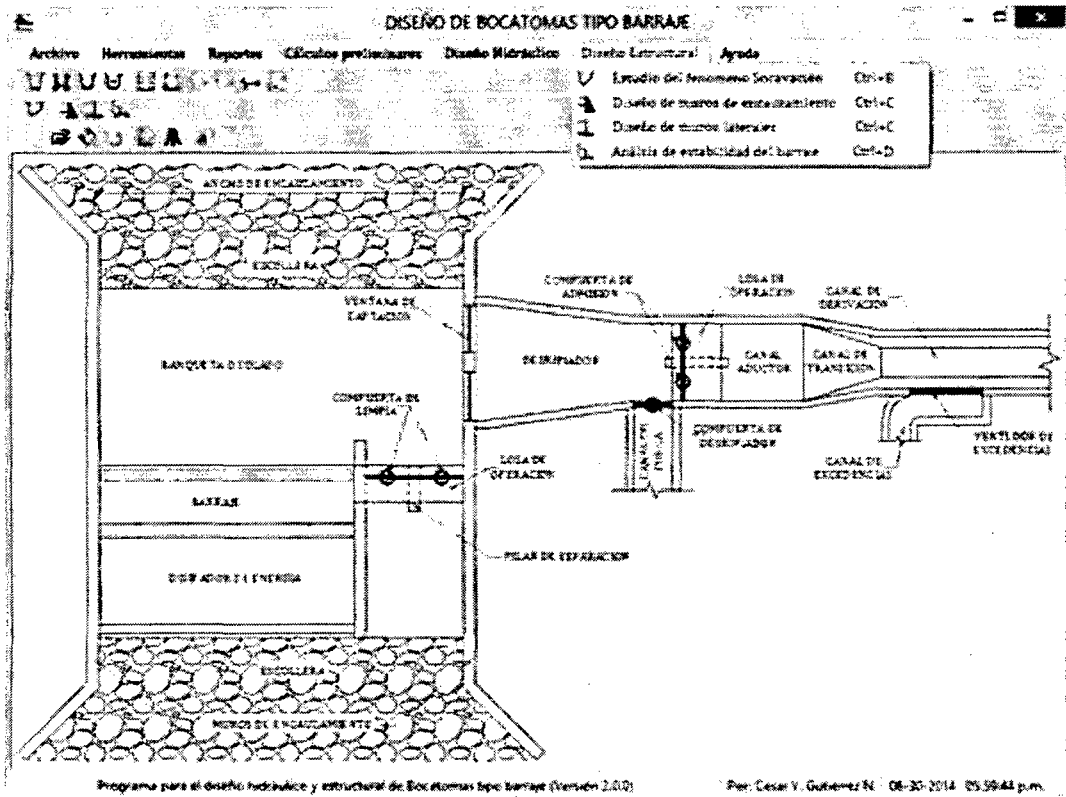
e) Menú Diseño Hidráulico



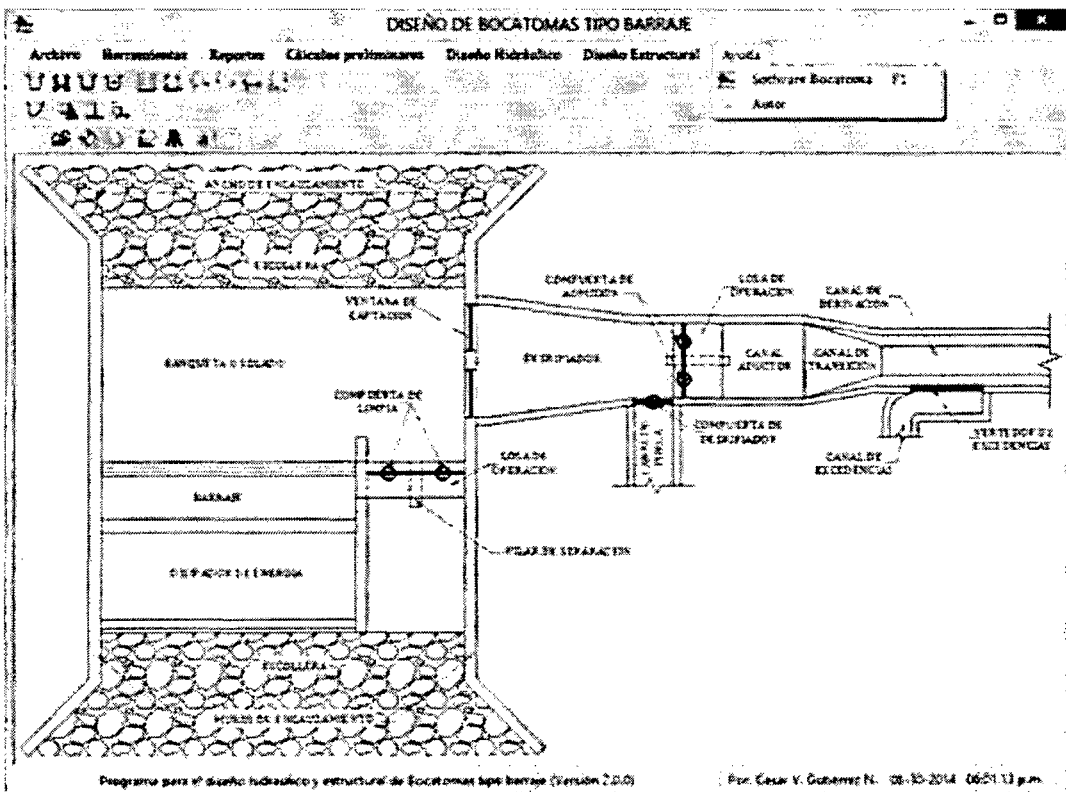
El menú diseño hidráulico contiene seis opciones, las cuales permiten el ingreso a los diferentes módulos: Diseño de las ventanas de captación y de la zona de limpia, definición del perfil del flujo ventana de captación–canal de derivación, diseño del barraje vertedor, diseño del dissipador de energía, determinación del contorno subterráneo de la presa, muro de encauzamiento y estudio de la curva de remanso.

f) Menú Diseño Estructural

El menú diseño estructural contiene cuatro opciones, las cuales permiten el ingreso a los diferentes módulos: Determinación de la socavación del cauce, diseño de los muros de encauzamiento, diseño de los muros laterales, análisis de estabilidad del barraje.



g) Menú ayuda



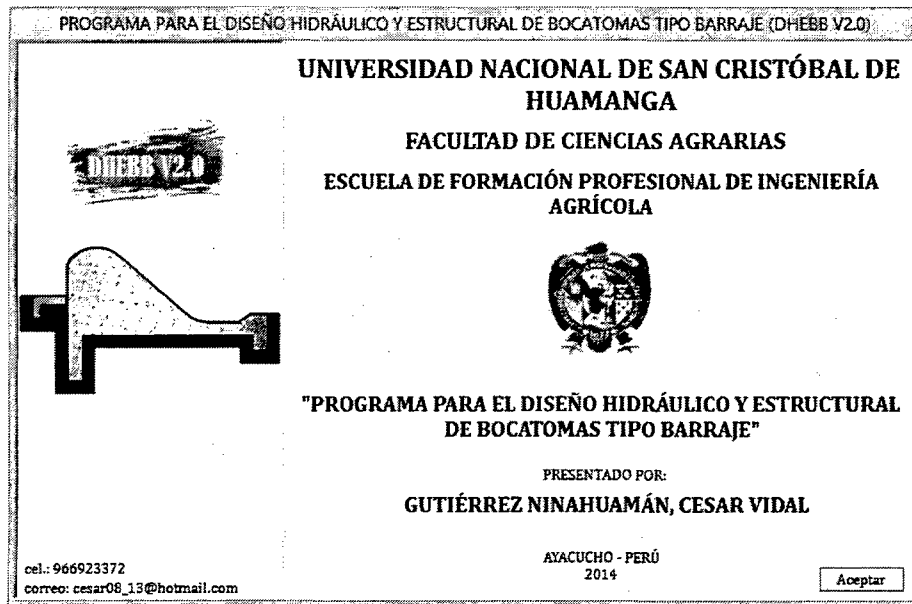
El menú ayuda tiene dos opciones: Software Bocatoma, autor.



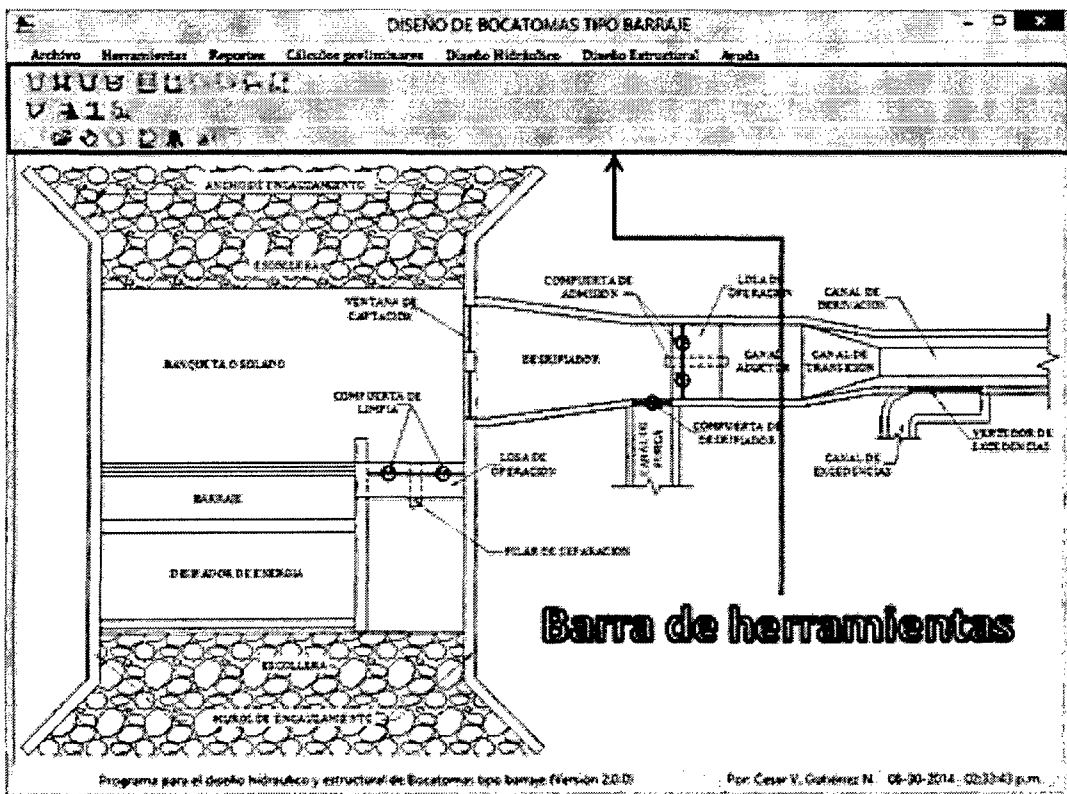
Software Bocatoma (F1): Muestra la ventana de ayuda al usuario.



Autor: Al hacer click sobre esta opción muestra la ventana de información del desarrollador del software.

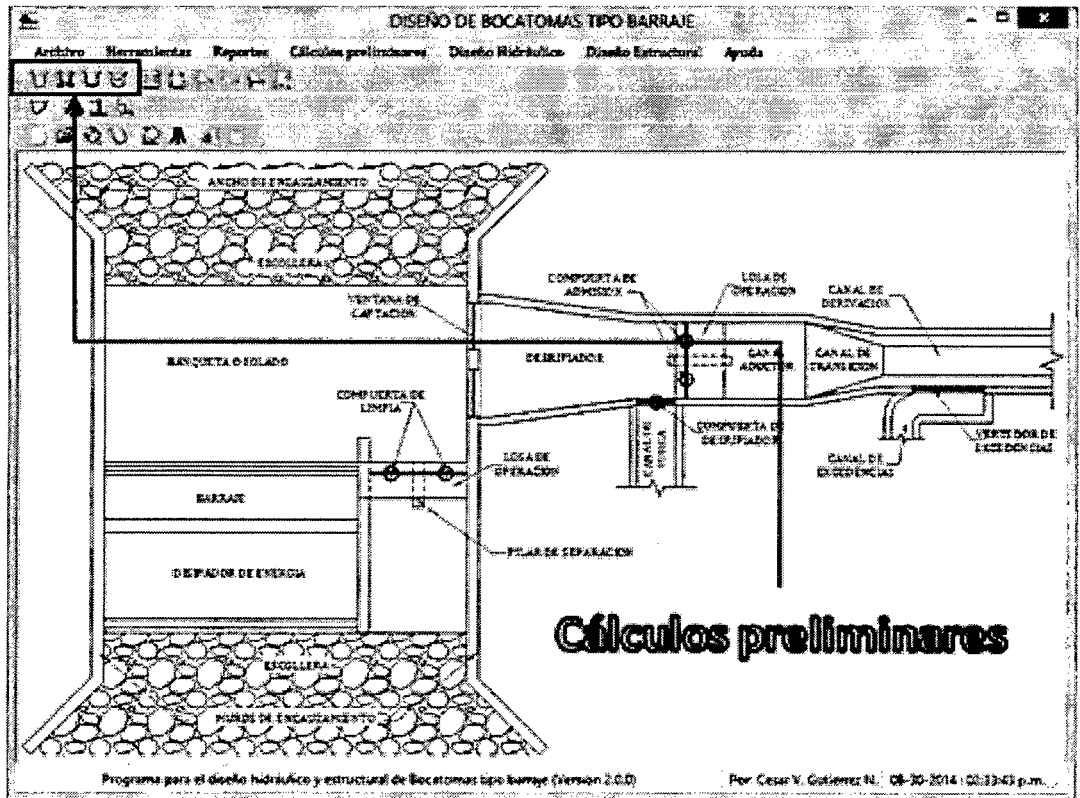


17.2.4) Principales herramientas



La barra de herramientas está dividida en tres niveles, el primero referido al diseño hidráulico, el segundo al diseño estructural y el tercero a contiene algunas herramientas complementarios al software.

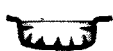
- a) **Diseño hidráulico:** Está dividido en dos partes, cálculos preliminares, y el diseño hidráulico propiamente dicho. A continuación se describe cada uno de ellos, y sus respectivos iconos.



Permite el ingreso al modulo de diseño del canal de derivacion (Ctrl+0).



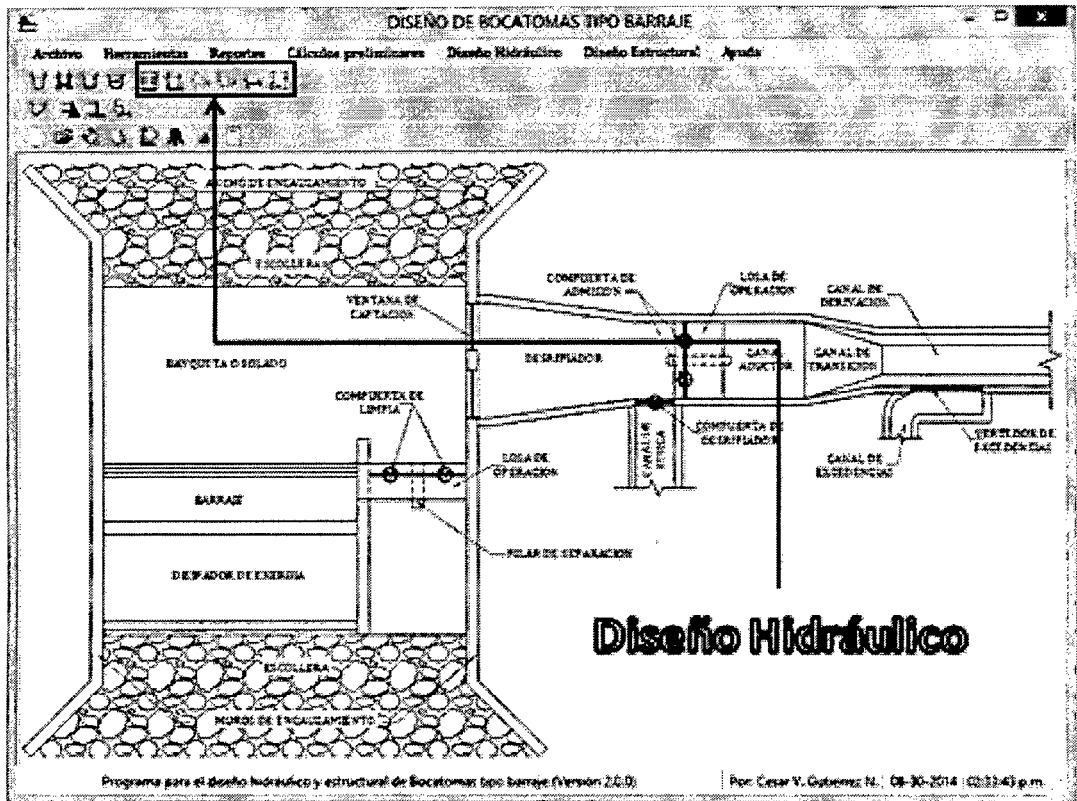
Permite el ingreso al modulo para definir el ancho de encauzamiento (Ctrl+1).



Permite el ingreso al modulo para determinar el coeficiente de rugosidad del río (Ctrl+2).



Permite el ingreso al modulo para determinar las características hidraulicas del río (Ctrl+3).



Permite el ingreso al modulo para diseñar las ventanas de captacion y de la zona de limpia (Ctrl+4).



Permite el ingreso al modulo para definir el perfil del flujo ventana de captacion – canal de derivacion (Ctrl+5).



Permite el ingreso al modulo para diseñar el barraje vertedor (Ctrl+6).



Permite el ingreso al modulo para diseñar el dissipador de energia (Ctrl+7).

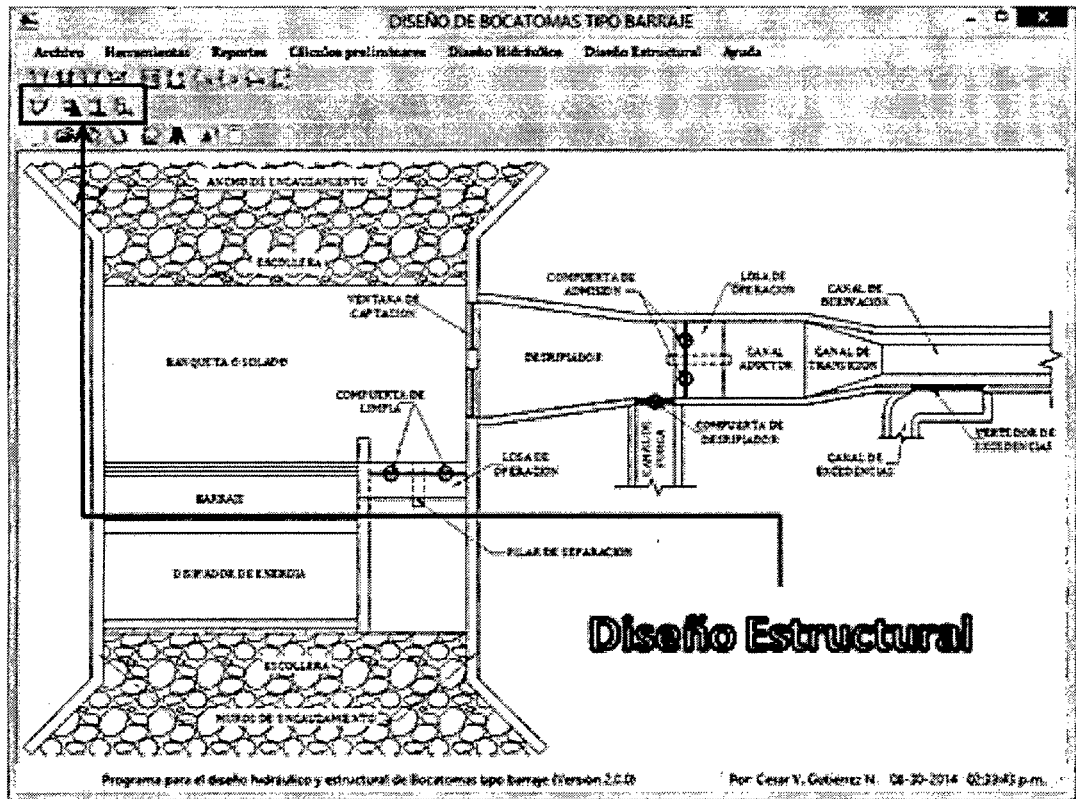


Permite el ingreso al modulo para definir el contorno subterraneo de la presa (Ctrl+8).



Permite el ingreso al modulo para definir el muro de encauzamiento y el estudio de la curva de remanso (Ctrl+9).

b) Diseño estructural



Permite el ingreso al modulo para calcular el fenomeno de socavacion del cauce (Ctrl+B).



Permite el ingreso al modulo para diseñar el muro de encauzamiento (Ctrl+C).



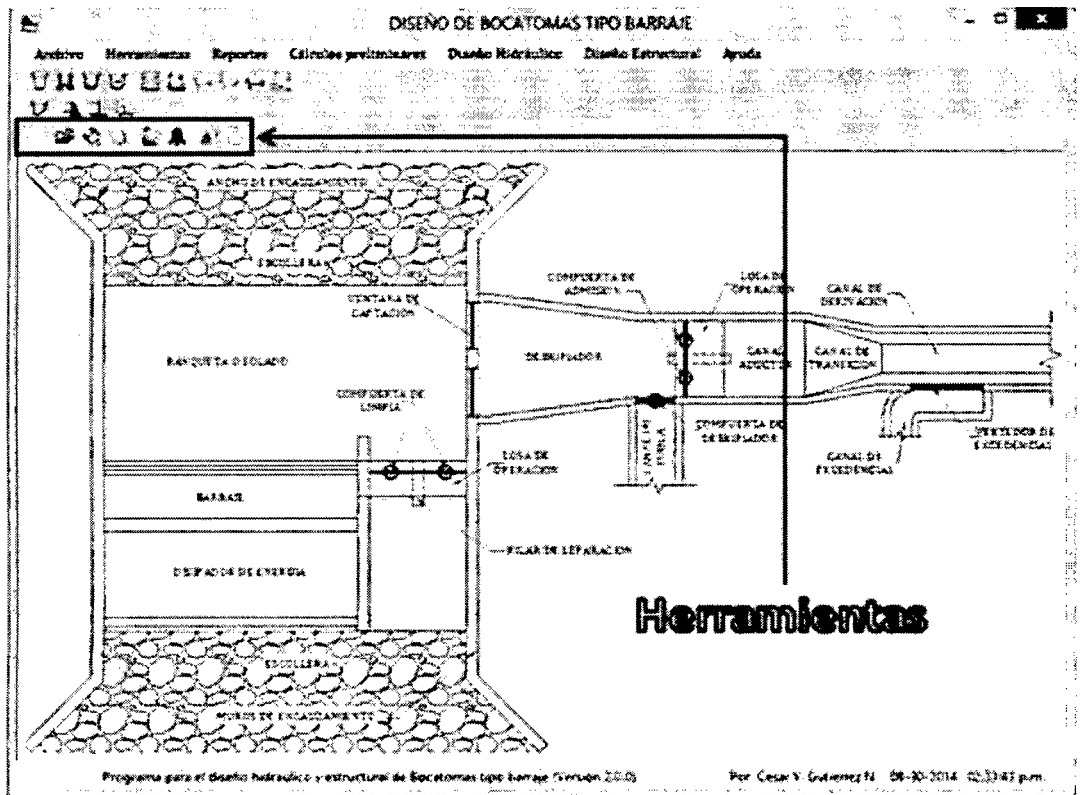
Permite el ingreso al modulo para diseñar los muros laterales (Ctrl+D).



Permite el ingreso al modulo para analizar la estabilidad del barraje (Ctrl+E).

c) Herramientas

Las herramientas básicas con las que trabaja la aplicación son los siguientes: Nuevo (Ctrl+N), Abrir archivo (Ctrl+A), guardar como (Ctrl+G), propiedades del proyecto, caudales de diseño, cotas principales, diseño de mezclas, y calculadora.



Propiedades del proyecto:

DATOS GENERALES DEL PROYECTO

DATOS GENERALES DEL PROYECTO

Nombre del proyecto:

Ubicación de la bocatoma

| | |
|--|---|
| <p>Ubicación política:</p> <p>Departamento: <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p>Provincia: <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p>Distrito: <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p>Lugar: <input style="width: 100%;" type="text"/></p> | <p>Ubicación geográfica:</p> <p>Latitud: <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p>Longitud: <input style="width: 100%;" type="text"/></p> <p>Altitud: <input style="width: 100%;" type="text"/></p> |
|--|---|



Caudales de diseño:

CAUDALES DE DISEÑO

Caudales del río

Caudal máximo instantáneo m³/s

| Descripción | Caudal |
|-------------|--------|
|-------------|--------|

Caudal de captación

Caudal de derivación (Qd): m³/s



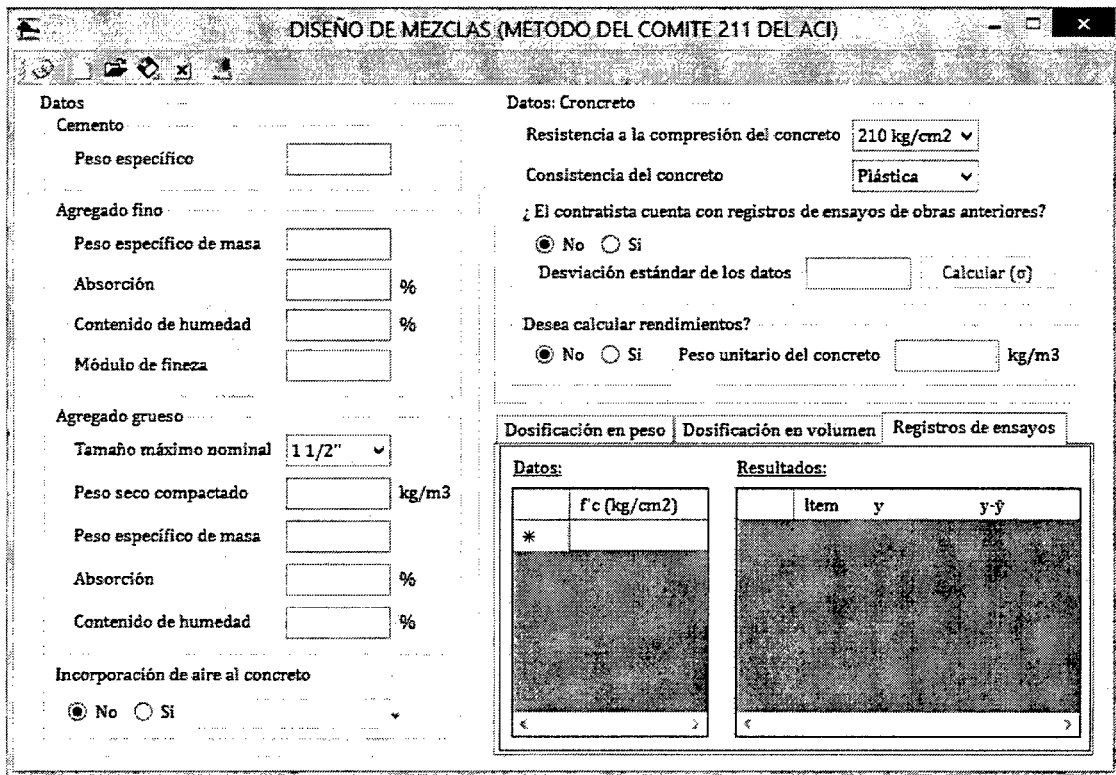
Cotas principales:

PRINCIPALES COTAS

Cota

Cota delante de la ventana de captación (C_o): msnm

Diseño de mezclas:



DISEÑO DE MEZCLAS (METODO DEL COMITE 211 DEL ACI)

Datos

Cemento

Peso específico

Agregado fino

Peso específico de masa

Absorción %

Contenido de humedad %

Módulo de fineza

Agregado grueso

Tamaño máximo nominal 1 1/2"

Peso seco compactado kg/m³

Peso específico de masa

Absorción %

Contenido de humedad %

Incorporación de aire al concreto

No Si

Datos: Concreto

Resistencia a la compresión del concreto 210 kg/cm²

Consistencia del concreto Plástica

¿El contratista cuenta con registros de ensayos de obras anteriores?

No Si

Desviación estándar de los datos

Calcular (σ)

Desea calcular rendimientos?

No Si

Peso unitario del concreto kg/m³

Dosificación en peso | Dosificación en volumen | Registros de ensayos

Datos:

| f'c (kg/cm ²) |
|---------------------------|
| * |

Resultados:

| Item | y | y-y |
|---------------|---|-----|
| [Shaded area] | | |

17.2.5) Módulos con las que trabaja el programa

A continuación se describirá los módulos con las cuales trabaja el DHEBB V2.0.0, las herramientas, y la forma de funcionamiento de cada uno de estas.

a) Diseño del canal de derivación

En esta sección se realiza el diseño del canal de derivación, tiene la alternativa de que pueda ser de tipo rectangular o trapezoidal, aparte de calcular las características hidráulicas del canal, realiza la calibración del canal (a cada tirante le corresponde un determinado caudal), con el solo hecho de colocar un limnómetro en el canal, sabríamos la cantidad de agua que conduce. A continuación mostramos la interfaz de este módulo:

DISEÑO DEL CANAL DE DERIVACIÓN

Datos

Canal de Máxima Eficiencia Hidráulica

Pendiente del fondo del canal (Sd): m/m

Coefficiente de rugosidad (n):

Talud (Z):

Ancho de solera (Bd): m

Borde libre

Función del caudal Función de la solera

Intervalos de tirante para calibración de canal m

Resultados

Tirante normal (Yd): m

Área hidráulica (Ad): m²

Perímetro mojado (Pd): m

Radio hidráulico (Rh): m

Velocidad (Vd): m/s

Espejo de agua (Td): m

Número de Froude (Fd):

Borde libre (BL): m

Sección del canal de derivación

Dimensiones finales del canal

Ancho de solera (Bd): m

Talud (Z):

Tirante normal (Yd): m

Borde libre (BL): m

Características hidráulicas del canal de derivación:

| | Velocidad (m/s) | Borde libre (m) | Caudal (m ³ /s) |
|--|-----------------|-----------------|----------------------------|
| | | | |

b) Definición del ancho de encauzamiento

DEFINICIÓN DEL ANCHO DE ENCAUZAMIENTO

Datos

Pendiente del río (Sn): m/m

Ancho de cause natural (Bn): m

Método de Blench

Factor de fondo (Fb):

Factor de orilla (Fa):

Concentración de sedimento (Ca): ppm

Diam. medio de las partículas (Dm): mm

Método de Altunin

Coefficiente de Altunin (A):

Método de Simons y Henderson

Valores de Ki:

Opciones de calculo (Fb)

Si el río arrastra poco sedimento y el fondo es arenoso

Si existe arrastre de sedimento y el fondo arenoso

Calcular Fb Cancelar

Resultados

Método de Blench

Ancho estable (B1): m

Método de Altunin

Ancho estable (B2): m

Método de Pettit

Ancho estable (B3): m

Método de Simons y Henderson

Ancho estable (B4): m

Dimensión final para diseño

Ancho de encauzamiento (Br): m

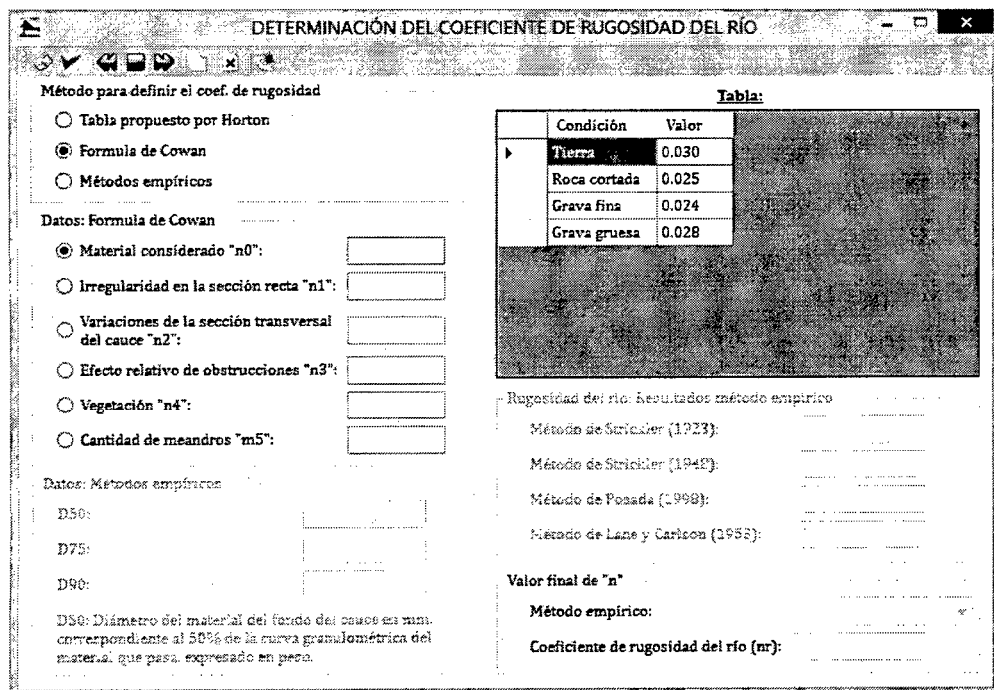
Tabla:

| Descripción | Fb |
|-----------------|-----|
| Material fino | 0.8 |
| Material grueso | 1.2 |

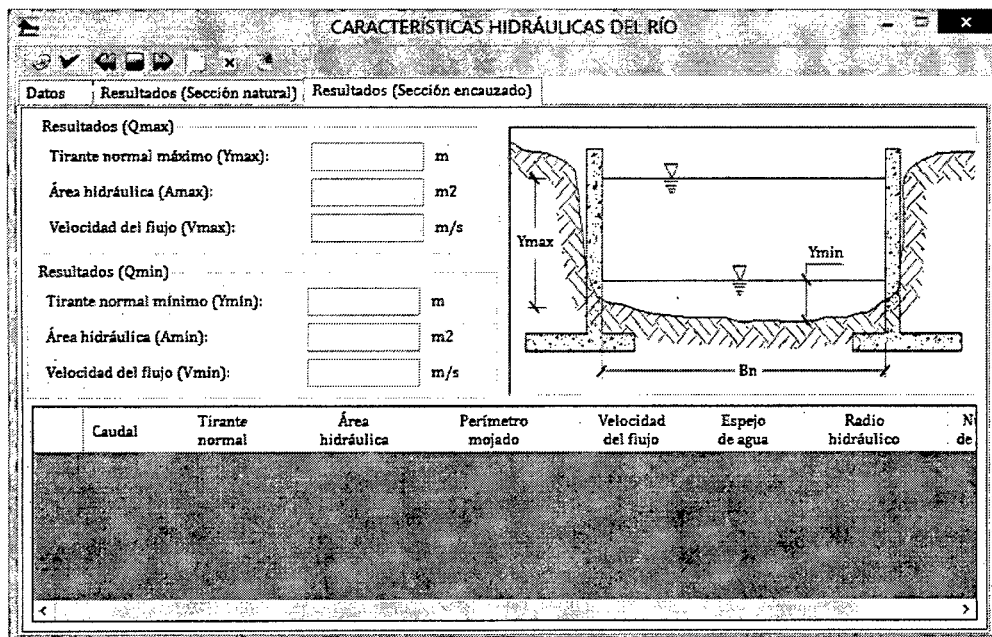
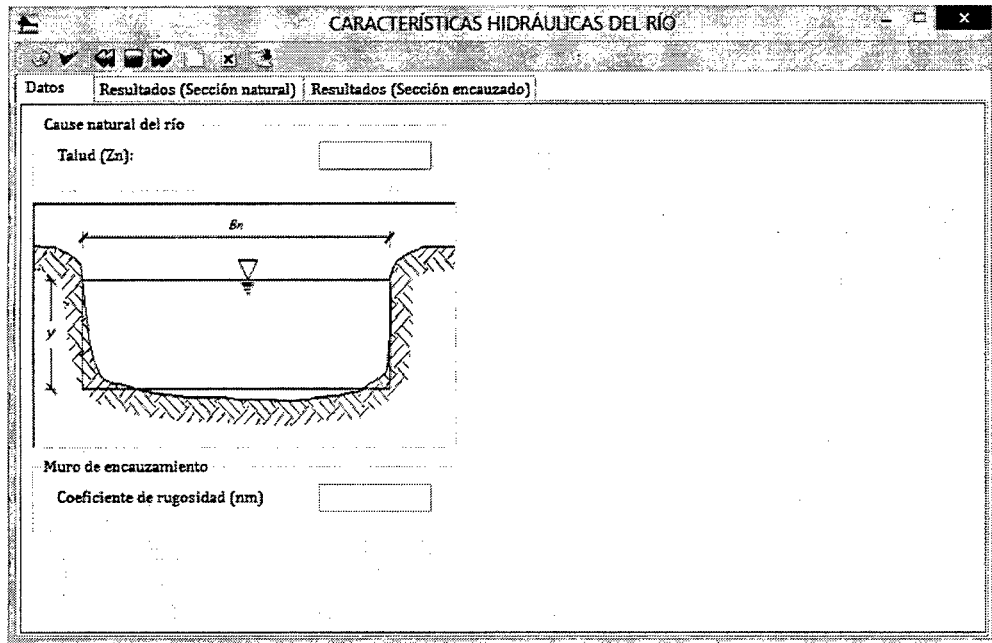
En el presente modulo puede definirse el ancho que ocupará la captación en la sección del río, haciendo uso de metodologías para definir el ancho estable del cauce, o en su defecto puede definirse un ancho determinado en campo, de acuerdo a las condiciones topográficas del lugar.

c) Determinación del coeficiente de rugosidad del río

La finalidad de este módulo, es determinar el coeficiente de rugosidad del cauce. La aplicación permite determinar de tres maneras diferentes, la primera, mediante la tabla propuesto por Horton o el usuario puede definirlo de manera libre, la segunda, mediante la fórmula de Cowan, y la tercera, haciendo uso de métodos empíricos, para cada uno de ellos se requiere el ingreso de datos diferentes. A continuación se muestra el mencionado modulo:



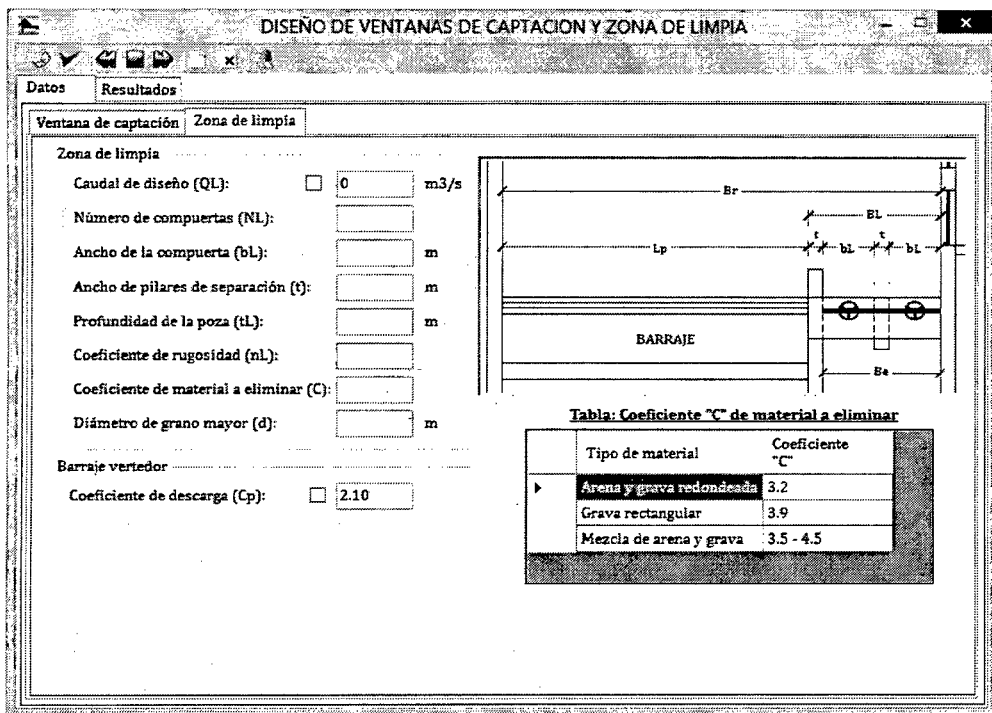
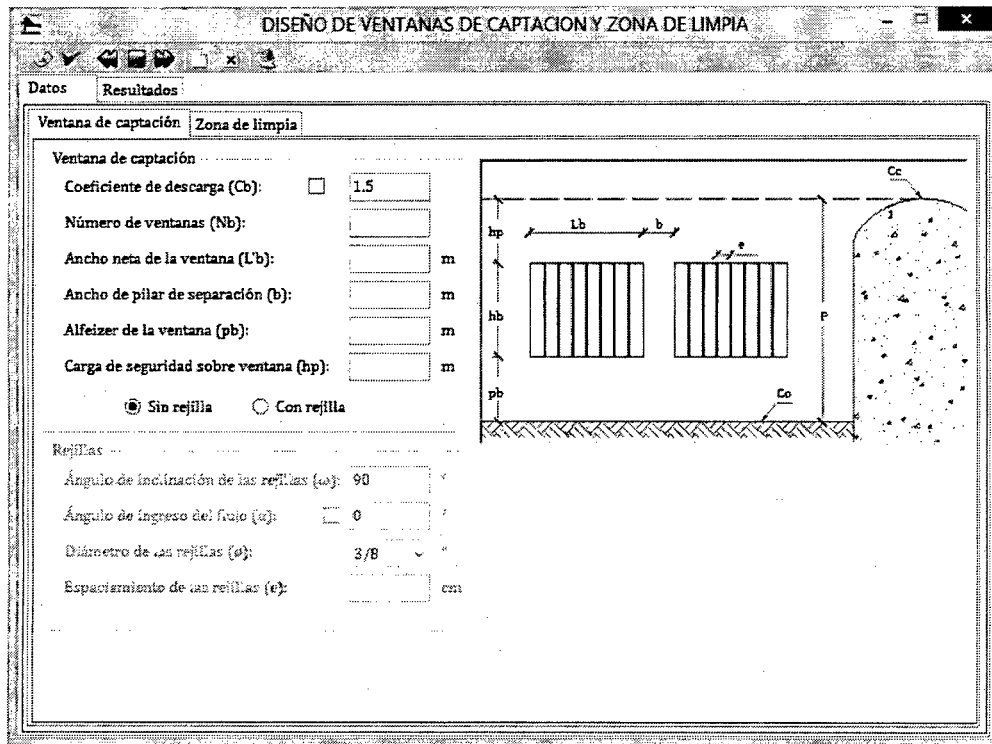
d) Determinación de las características hidráulicas del río



En este módulo se define las características hidráulicas del río, llámese tirante, radio hidráulico, perímetro mojado, espejo de agua, área hidráulica, velocidad, número de Froude, para una condición natural del río, y otra en la cual el río está encauzado.

Para los diferentes caudales alimentados en la sección de caudales de diseño (Caudal máximo instantáneo, caudal medio anual, caudal mínimo anual, etc.)

e) Diseño de las ventanas de captación y de la zona de limpia



En este módulo se realiza el dimensionamiento de las ventanas de captación; el diseñador puede hacer uso de la opción de colocar rejillas en las ventanas cuando lo vea por conveniente. También, se realiza el dimensionado de las compuertas de limpia; por defecto se

hace pasar el caudal medio anual a través de él, pero puede ser modificado por el diseñador.

f) Definición del perfil del flujo ventana de captación–canal de derivación

En este módulo se puede determinar el perfil del agua desde las ventanas de captación hasta el canal de derivación, para los diferentes caudales ingresados en el la sección de caudales de diseño.

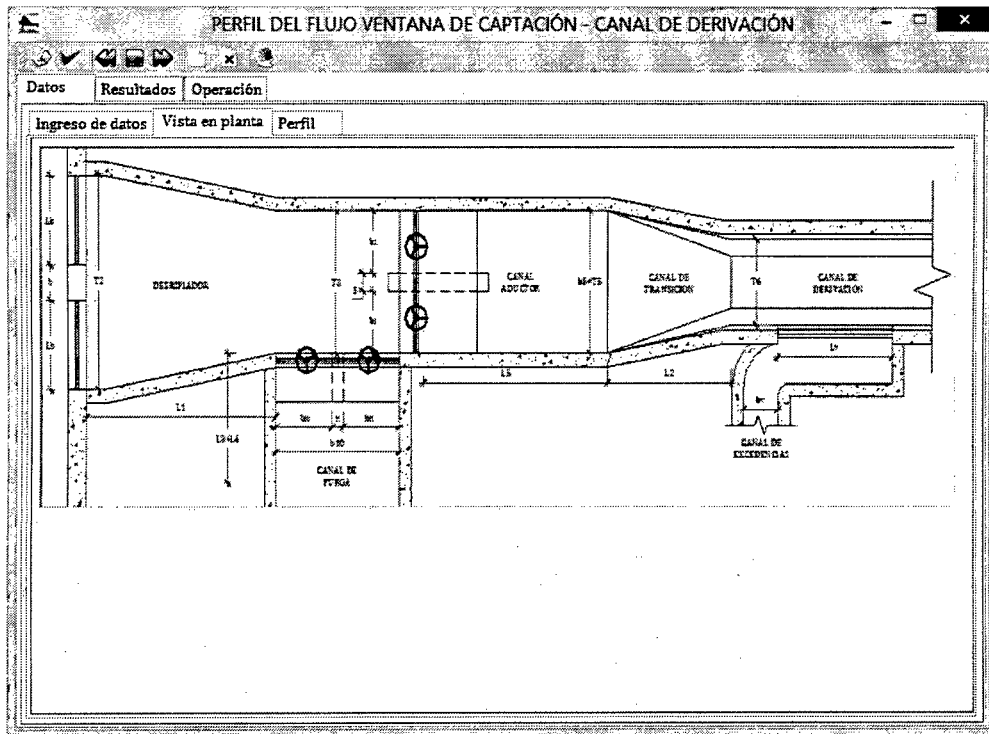
También, determina las dimensiones de las compuertas de admisión, de desripador, canal de aducción, canal de transición, canal de purga, vertedor, canal de excedencias, y determina las cotas principales en este componente de la captación.

PERFIL DEL FLUJO VENTANA DE CAPTACIÓN - CANAL DE DERIVACIÓN

Datos Resultados Operación

Ingreso de datos Vista en planta Perfil

| | |
|--|---|
| Ventana de captación Coeficiente de descarga (Cb): <input type="checkbox"/> 0.65 | Canal de purga Coeficiente de rugosidad (np): <input type="text"/> Pendiente del canal (Sp): <input type="text"/> m/m |
| Compuerta de admisión Coeficiente de descarga (Cs): <input type="checkbox"/> 0.60 Numero de compuertas (Ns): <input type="text"/> Ancho de compuerta (bs): <input type="text"/> m Ancho de pilar de separación (s): <input type="text"/> m Alfeizer de la compuerta (ps): <input type="text"/> m | Vertedor de excedencias Caudal admisible en canal de derivación (Q12): <input type="text"/> m ³ /s Coeficiente de descarga (Cv): <input type="checkbox"/> 1.50 |
| Compuerta de desripiador Coeficiente de descarga (Cn): <input type="text"/> Numero de compuertas (Nn): <input type="text"/> Ancho de compuerta (bn): <input type="text"/> m Ancho de pilar de separación (n): <input type="text"/> m | Canal de excedencias Coeficiente de rugosidad (nv): <input type="text"/> Pendiente del canal (Sv): <input type="text"/> m/m Ancho de solera (bv): <input type="text"/> m |
| | Datos adicionales Borde libre en muro de encauzamiento (BLp): <input type="text"/> m Borde libre en muro de desripiador (BLs): <input type="text"/> m Longitud del canal aductor (L5): <input type="text"/> m |



PERFIL DEL FLUJO VENTANA DE CAPTACIÓN - CANAL DE DERIVACIÓN

Datos Resultados Operación


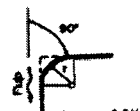
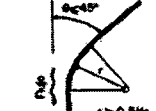
| Caudal mínimo anual | Caudal máximo instantáneo | Caudal medio anual | Caudal 75% persistencia | Caudal definido por usuario |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------------|
| Zona del barraje | | | | |
| Altura de velocidad (ha): | <input type="text"/> m | Compuerta de admisión | | |
| Carga de agua sobre barraje (ho): | <input type="text"/> m | Caudal de descarga (Qds): | <input type="text"/> m ³ /s | |
| Tirante en la sección 1 (T1): | <input type="text"/> m | Tirante en la sección 3 (T3): | <input type="text"/> m | |
| Desnivel río - desripiador (tb): | <input type="text"/> m | Altura de compuerta de admisión (ha): | <input type="text"/> m | |
| Velocidad en sección 1 (V1): | <input type="text"/> m/s | Velocidad en la sección 3 (V3): | <input type="text"/> m/s | |
| Ventana de captación | | | | |
| Pérdida de carga (Δh): | <input type="text"/> m | Velocidad en la sección 4 (V4): | <input type="text"/> m/s | |
| Velocidad en sección 2 (V2): | <input type="text"/> m/s | Compuerta de desripiador | | |
| | | Altura de la compuerta (hn): | <input type="text"/> m | |
| | | Velocidad en sección 8 (V8): | <input type="text"/> m/s | |

| Desripiador | Canal de aducción | Canal de transición | Canal de purga | Vertedor y canal de excedencias | Cotas principales |
|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------|---------------------------------|-------------------|
| Ancho de base en sección 2 (T2): | <input type="text"/> m | | | | |
| Ancho de base en sección 3 (T3): | <input type="text"/> m | | | | |
| Longitud (L1): | Método de Hind <input type="text"/> | | | | |

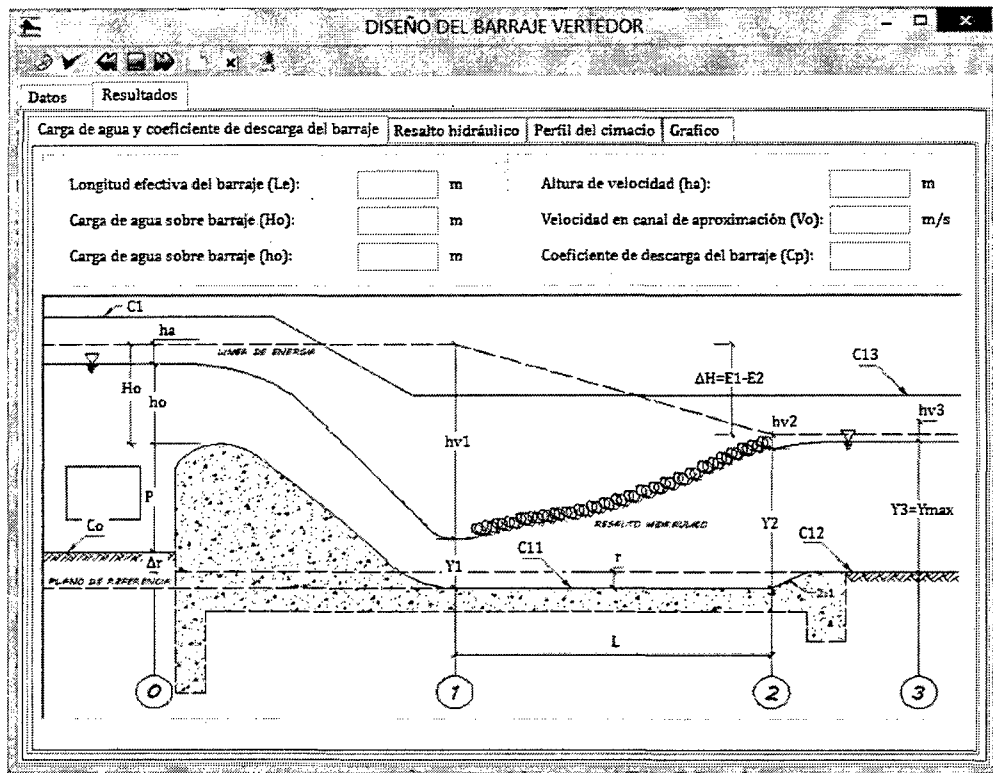
g) Diseño del barraje vertedor

DISEÑO DEL BARRAJE VERTEDOR

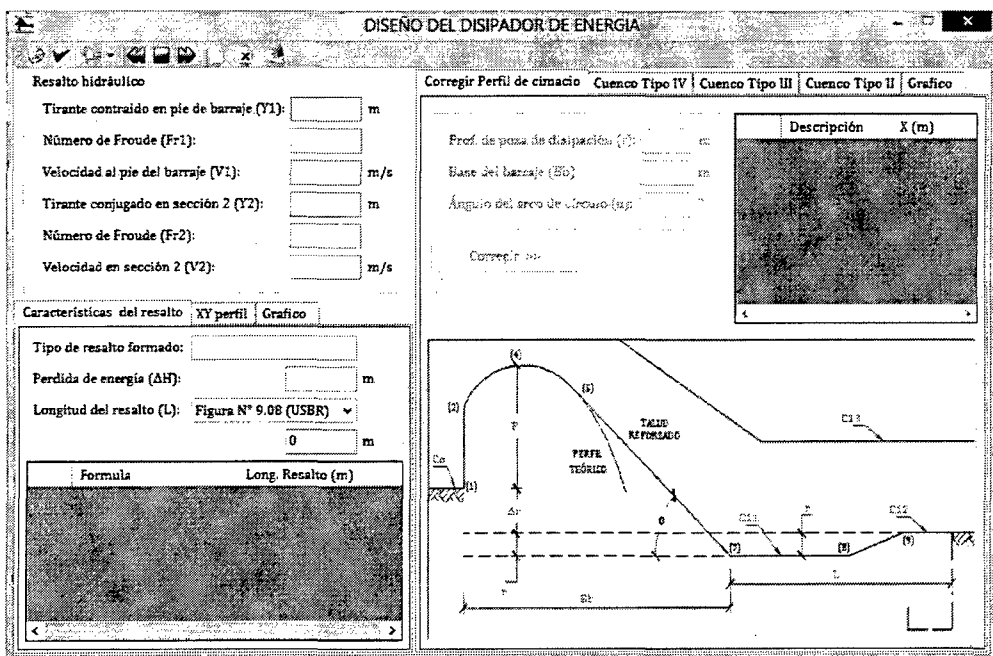
Datos Resultados

| | |
|--|---|
| <p>Datos</p> <p>Considerar pilas intermedias en el barraje? <input checked="" type="radio"/> No <input type="radio"/> Si</p> <p>Coefficiente de descarga</p> <p><input checked="" type="radio"/> Método de USBR <input type="radio"/> Método de Gehy</p> <p>Perfil del cimacio</p> <p><input checked="" type="radio"/> Criterio de diseño según el USBR</p> <p><input type="radio"/> Criterio de diseño según la WES</p> <p>Diferencia de altura (Δr): <input type="text"/> 0 m</p> <p>Radio de la curva de descarga (R3)</p> <p><input checked="" type="radio"/> Formula 01</p> <p><input type="radio"/> Formula 02</p> <p>Ángulo de la curva de descarga (α)</p> <p><input checked="" type="radio"/> Definido por el programa</p> <p><input type="radio"/> Definido por el usuario Zb: <input type="text"/></p> <p>Intervalo para definir el perfil del cimacio: <input type="text"/> 0.1 m</p> <p>Borde libre de muro aguas abajo de barraje: <input type="text"/> m</p> | <p>Datos: Pilas intermedias en barraje</p> <p>Coef de contracción por esribos (ka): <input type="text"/></p> <p>Coef de contracción por pilas (kp): <input type="text"/></p> <p>Número de pilas (Np): <input type="text"/></p> <p>Valores de ka Valores de kp</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">    </div> <p>a) Aristas iguales. Ka=0.2</p> <p>b) Aristas redondeadas. Ka=0.1</p> <p>c) Aristas redondeadas y muro de aziceno inclinado. Ka=0</p> |
|--|---|

En este módulo se realiza el diseño del barraje vertedor, paralelo a esto se determina la carga de agua sobre el barraje, los tirantes conjugados, velocidades, y demás parámetros del resalto hidráulico.



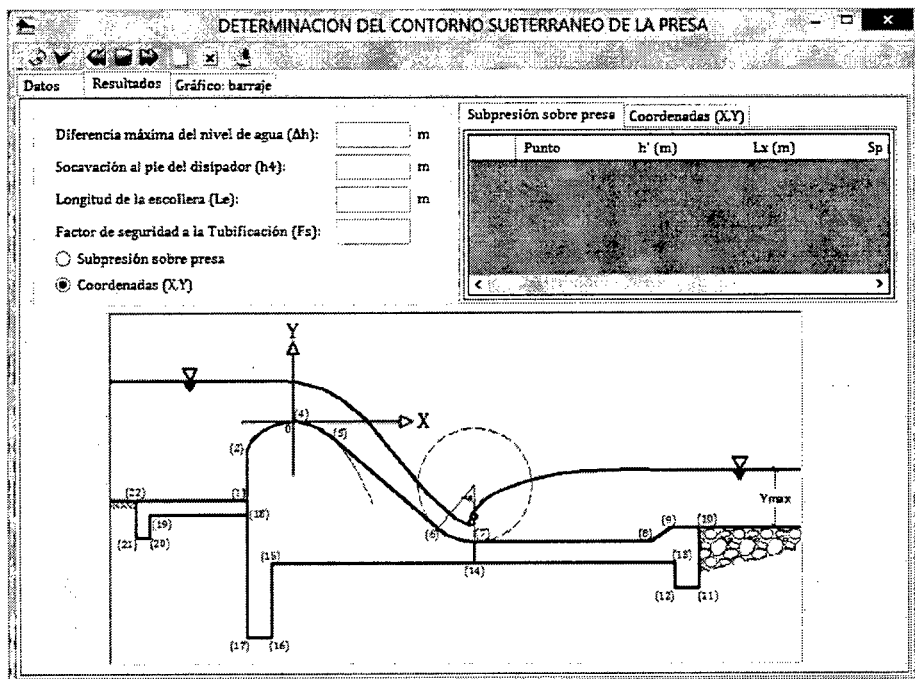
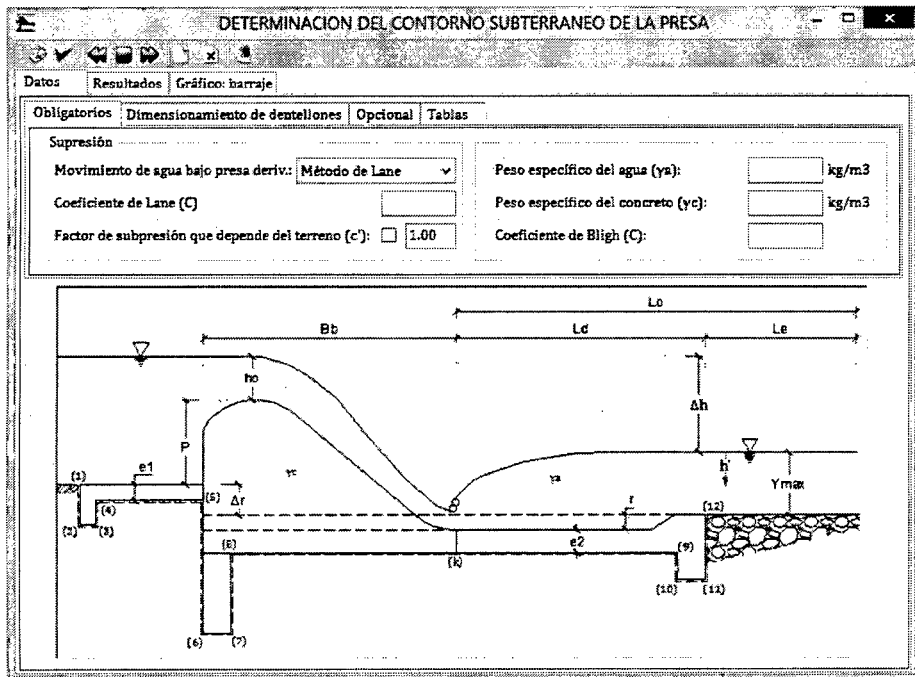
h) Diseño del dissipador de energía



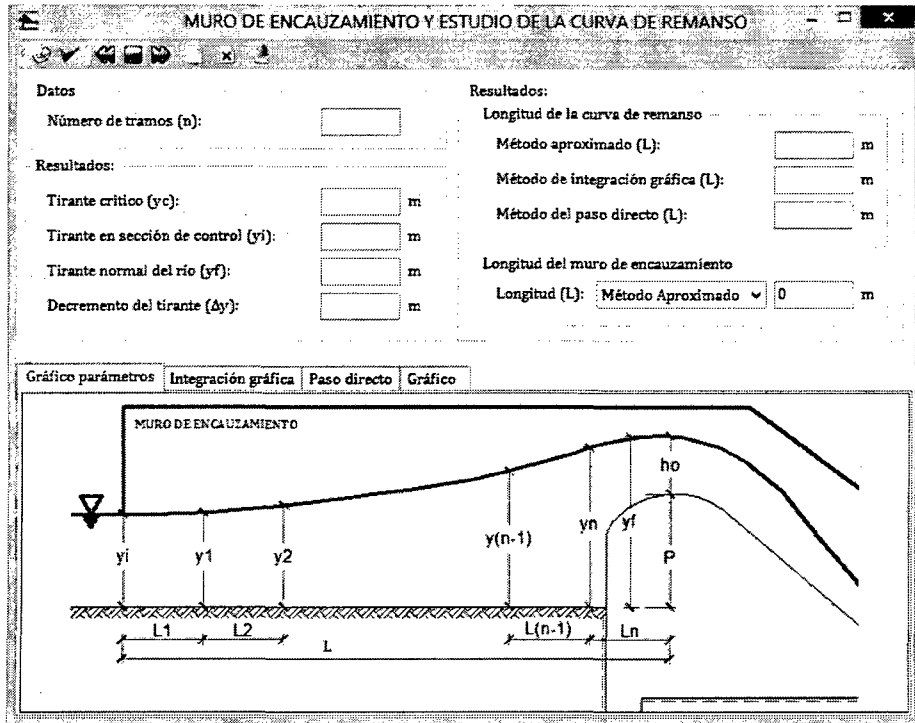
En este módulo se realiza el diseño del dissipador de energía, la aplicación permite el uso de diferentes tipos de dissipadores de energía. El diseñador tiene la posibilidad de elegir cualquiera de ellos, en función del factor económico, o dejar los resultados por defecto.

i) **Determinación del contorno subterráneo de la presa**

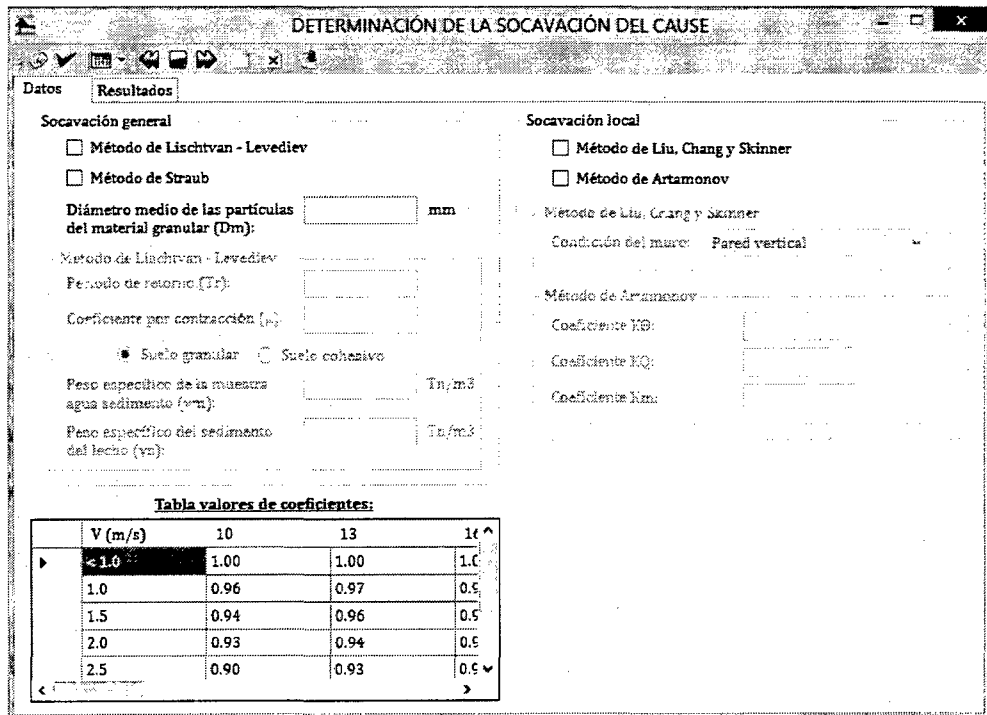
En este módulo se determina las dimensiones de los dentellones, al principio del barraje, y al final del dissipador de energía, las dimensiones de la banqueteta, para el control de filtración, y el fenómeno de tubificación, que con el transcurso del tiempo puede causar el colapso de la estructura. También, se determina la longitud de la escollera de protección, las subpresiones en el contorno subterráneo de la presa.



- j) **Muro de encauzamiento y estudio de la curva de remanso**
 Aguas arriba del barraje se genera una curva de remanso, en esta sección se definirá el perfil formado.



- k) **Determinación de la socavación del cauce**
 En este módulo se determina la socavación producida en el cauce, con la finalidad ver la profundidad de cimentación de los muros de encauzamiento.



DETERMINACIÓN DE LA SOCAVACIÓN DEL CAUSE

Datos Resultados

Condición de flujo: m

Socavación General

Método de Lischtván - Levediev

Profundidad de socavación (Ds): m

Tirante después de ocurrido la socavación (Hs): m

Método de Straub

Profundidad de socavación (Ds): m

Tirante después de ocurrido la socavación (Hs): m

Socavación local

Método de Liu, Chang y Skinner

Profundidad de socavación (ds): m

Método de Artamonov

Profundidad de socavación (ds): m

Tirante después de ocurrido la socavación (Ht): m

Socavación de diseño

Profundidad de socavación: Método de Lischván - Levediev

m

I) Diseño de los muros de encauzamiento

Este módulo permite el diseño de los muros de encauzamiento, tiene la opción de elegir entre un muro de gravedad y un muro en voladizo.

DISEÑO DE MUROS DE ENCAUZAMIENTO

Muro de gravedad Muro en voladizo

Datos Muro de gravedad Muro en voladizo

Datos generales:

Materiales

Peso específico del concreto (yc): kg/m³

Suelo de fundación

Capacidad de carga admisible (oadm): kg/cm²

Ángulo de fricción interna (φ): °

Coef. de fricción concreto-terreno (f):

Relleno

Peso específico (ys): kg/m³

Fondo río

Peso específico suelo saturado (ysat): kg/m³

Muro en análisis

Muro aguas arriba del barraje

Muro aguas abajo del barraje

Datos muro en voladizo:

Materiales

Resistencia del concreto (f'c): 210 kg/cm²

Esfuerzo de fluencia del acero (fy): 4200 kg/cm²

Acero de refuerzo:

Recubrimiento en pantalla: cm

Refuerzo vertical en pantalla (ρ): 5/8

Refuerzo horizontal en pantalla (ρ): 5/8

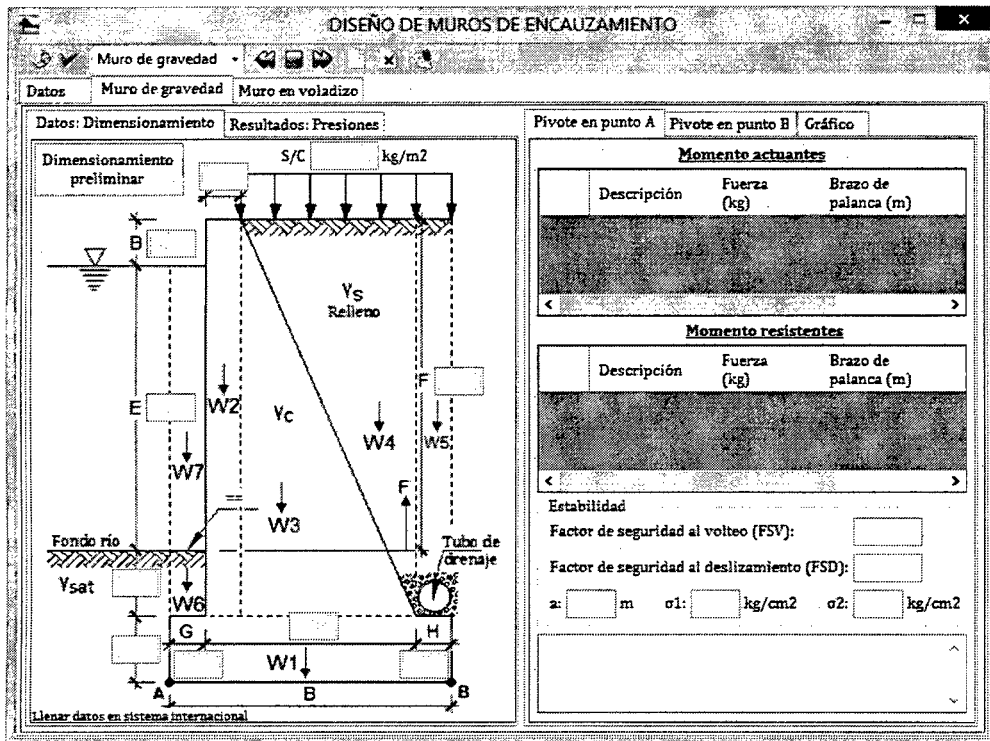
Recubrimiento en zapatas: cm

Refuerzo en talón anterior (ρ): 1/2

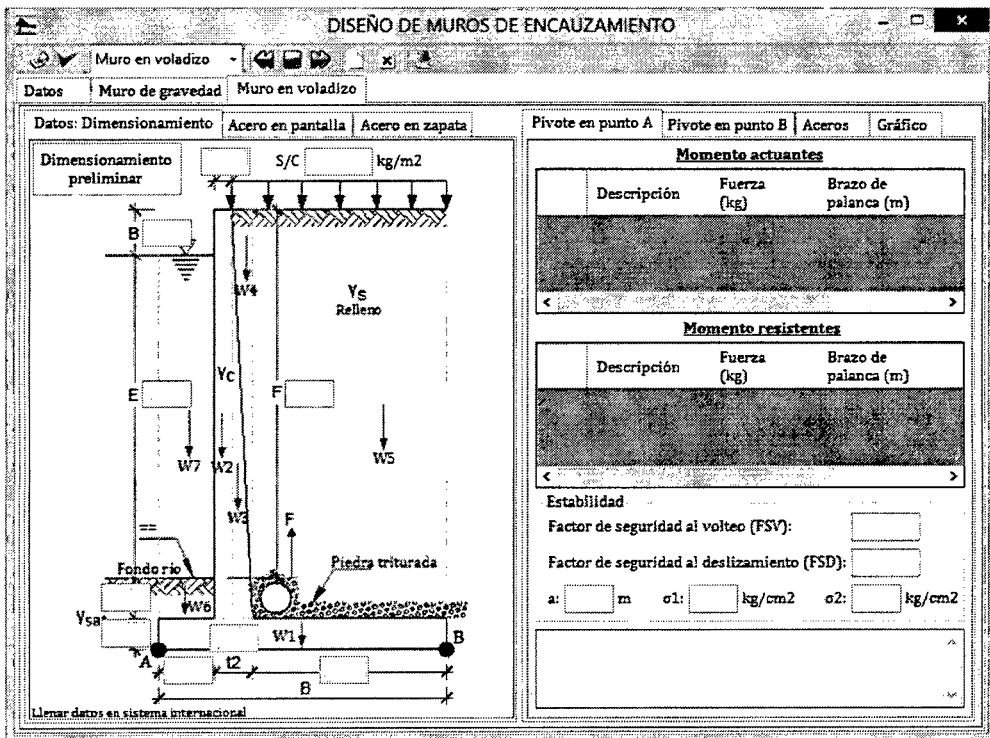
Refuerzo en talón posterior (ρ): 1/2

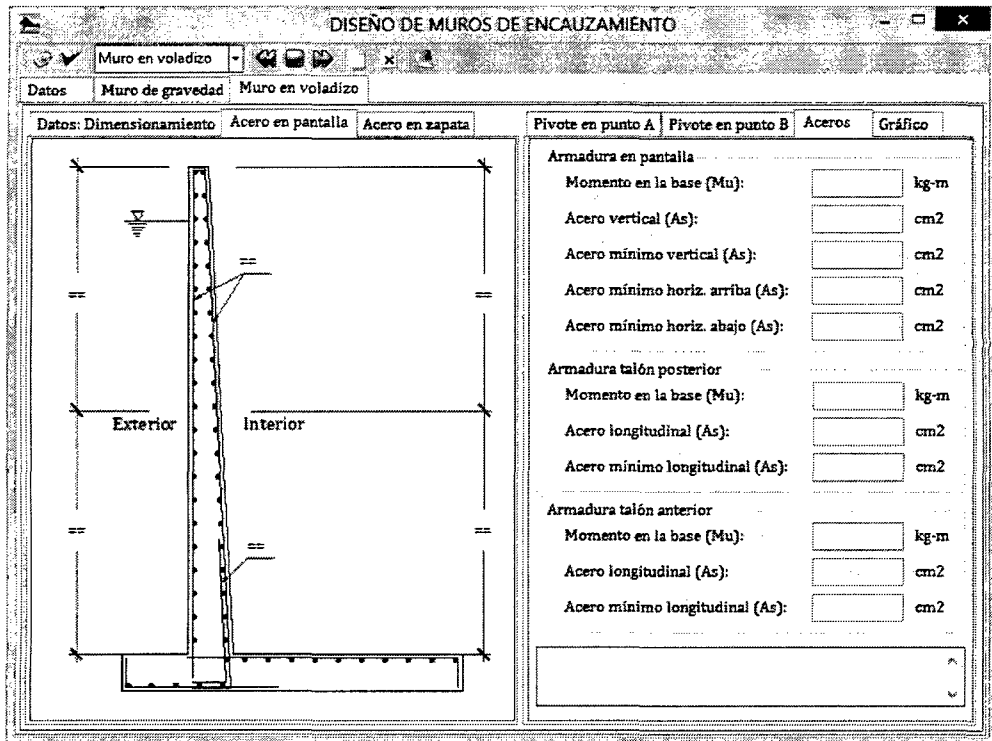
Peso específico y ángulo de fricción interna

| TIPO DE TERRENO | ys (kg/m ³) | φ (°) |
|-------------------|-------------------------|-----------|
| Arcilla suave | 1440 a 1920 | 0° - 15° |
| Arcilla media | 1600 a 1920 | 15° - 30° |
| Limo seco y su... | 1600 a 1920 | 27° - 30° |
| Limo denso | 1760 a 1920 | 30° - 35° |



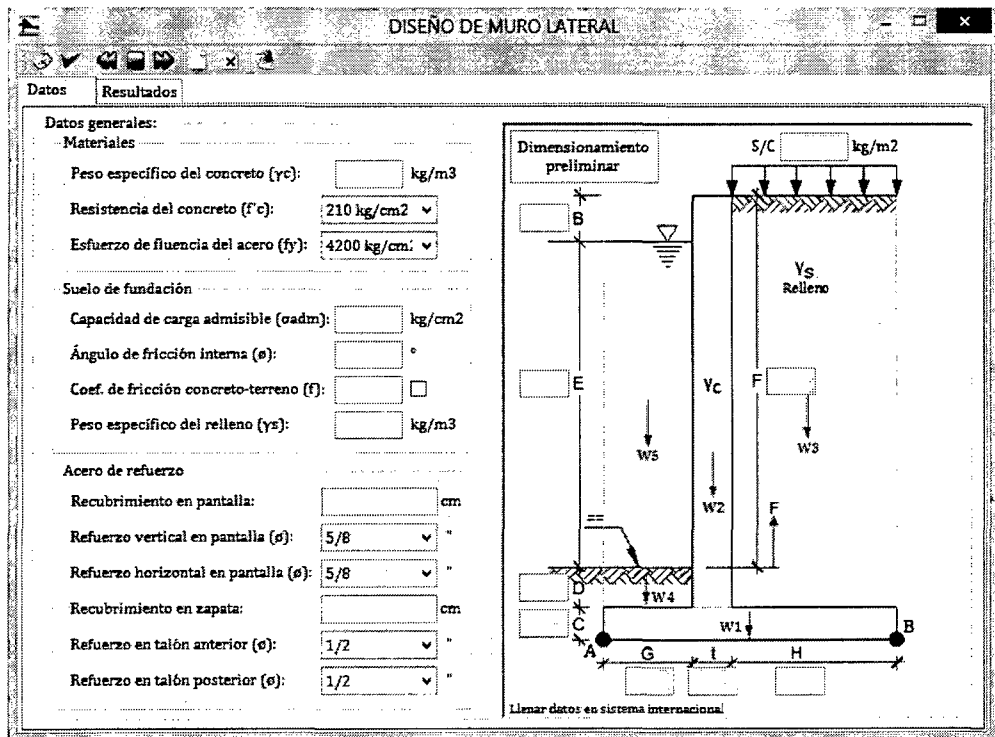
El software permite hacer la simulación para diferentes escenarios, muestra los factores de seguridad, y las dimensiones de la estructura para cada condición, con lo cual el diseñador puede tomar decisiones en el diseño final del muro.

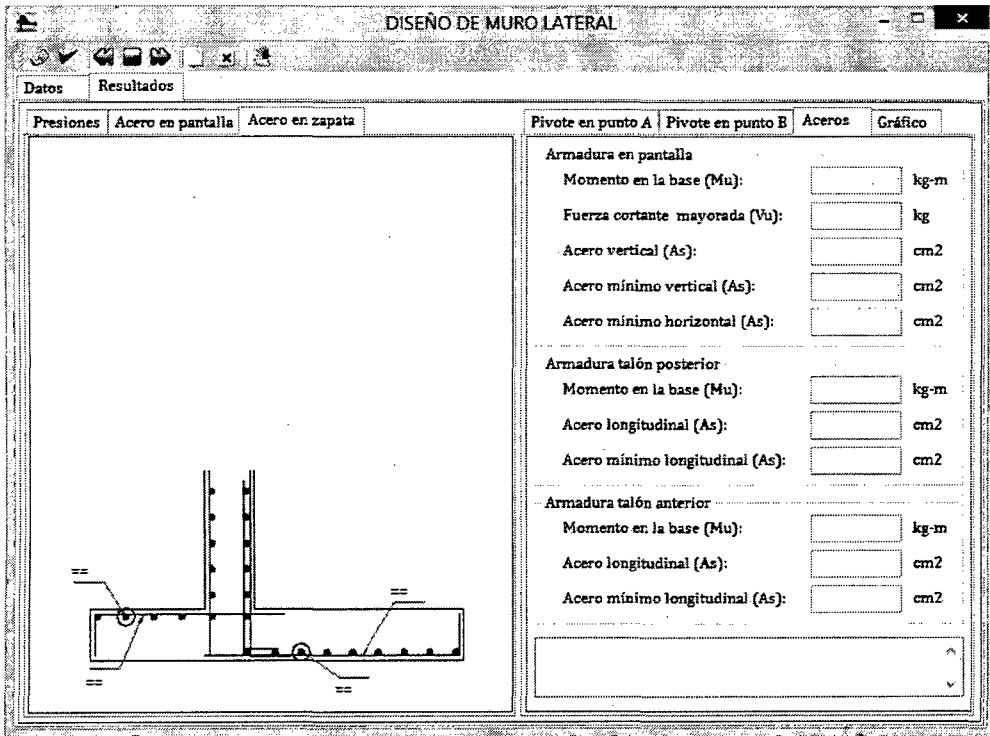
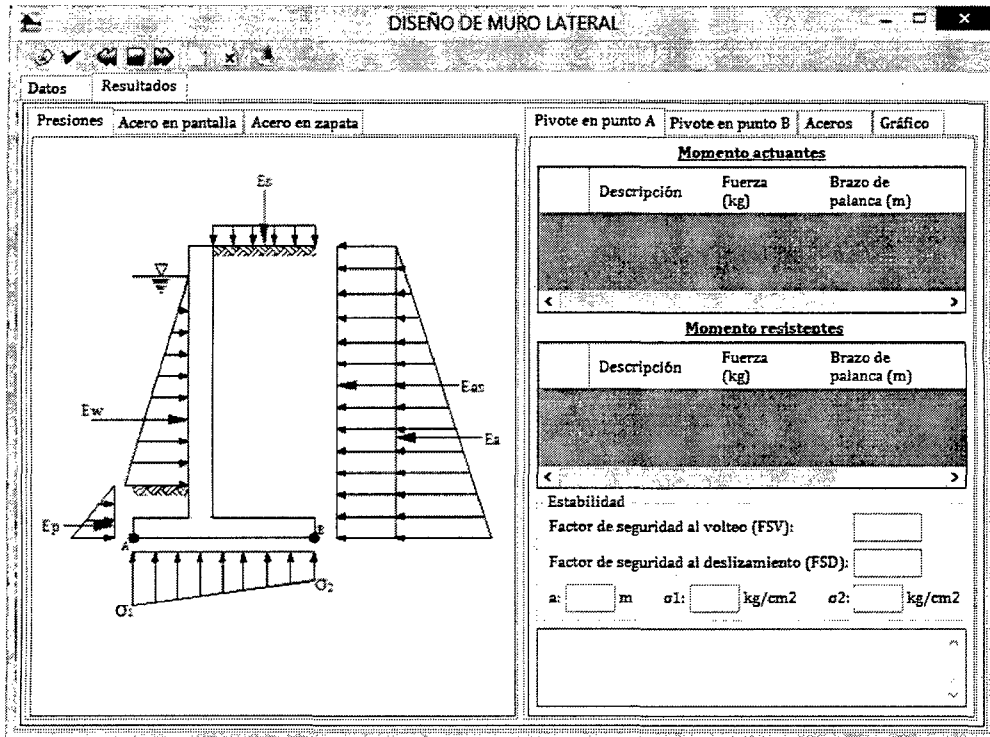




m) Diseño de los muros laterales

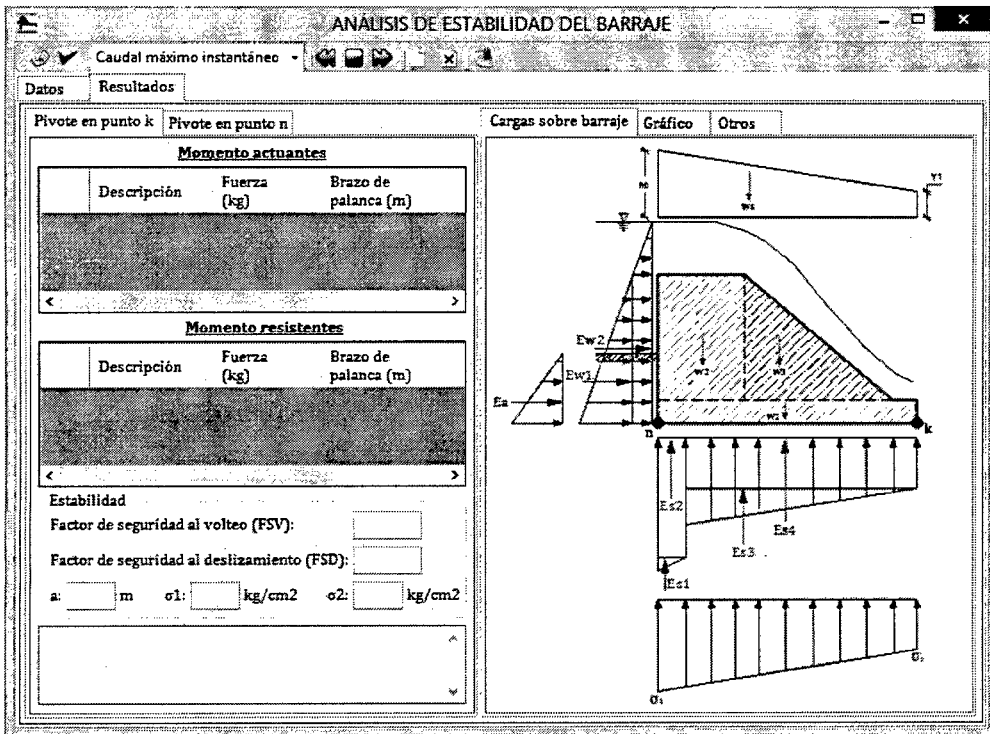
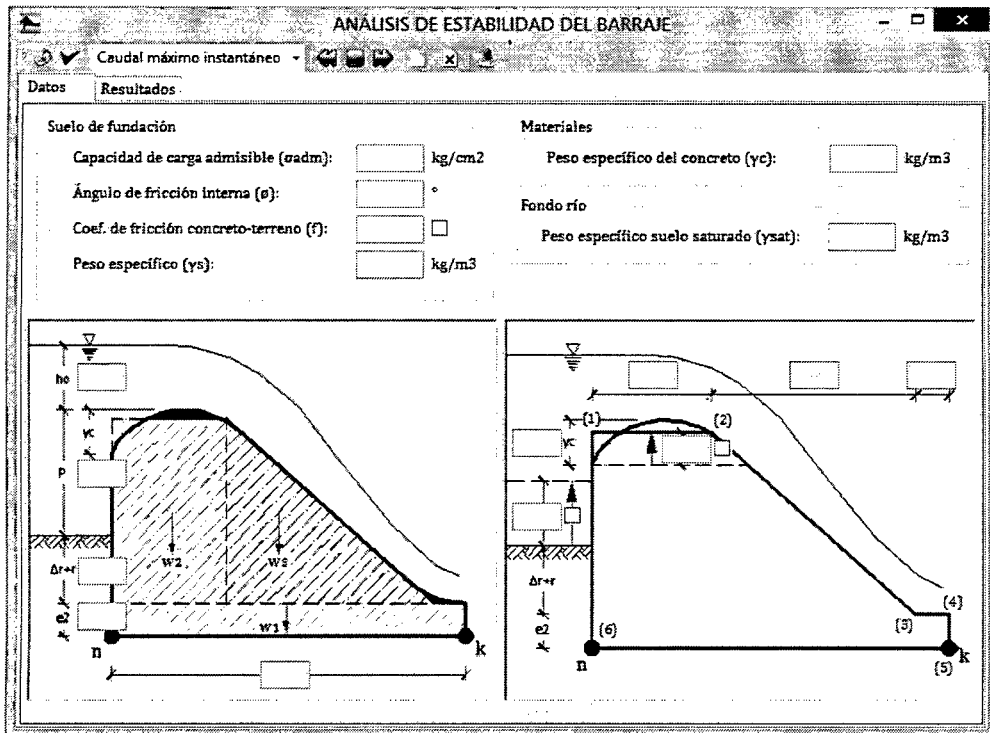
En el diseño de muros laterales se obvia la fuerza de supresión del agua, y puede ser diseñado únicamente como un muro en voladizo.





n) Análisis de estabilidad del barraje

El ultimo modulo corresponde al análisis de estabilidad del barraje, la cual puede ser analizado para dos escenarios distintos, para un caudal máximo instantáneo, o un caudal mínimo anual.



17.2.6) Función de las herramientas dentro de los módulos

En cada uno de los módulos se muestran herramientas similares, la aplicación de cada uno de estos será de acuerdo a la necesidad del usuario, a continuación se describe la función que cumplen cada uno de ellos.

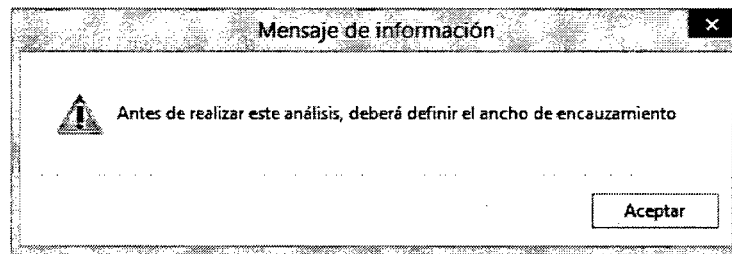


Calcular: Esta opción permite hacer el cálculo dentro del módulo,

esta herramienta solo esta disponible dentro de los modulos. Si alguno de los datos no está adecuadamente llenado, no puede usar esta opcion.

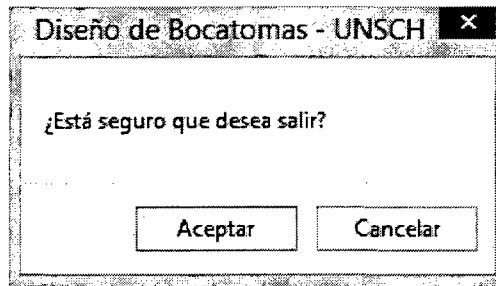
- ✓ **Aceptar:** Al hacer click sobre esta opción, almacenamos datos y resultados dentro de la aplicación, para que pueda ser usada en los modulos donde sea necesario. No puede usar esta opcion sin antes haber realizado el calculo respectivo.

Si en alguno de los modulos sale el siguiente mensaje:



Es porque aun no ha realizado el calculo en el modulo indicado, o en caso contrario no ha dado click en la opcion de aceptar. La opcion de aceptar, es la forma correcta de salir de un modulo e ir al formulario principal almacenado informacion.

- ⏪ **Atras:** Esta opcion permite regresar al modulo anterior, no almacena ninguna informacion, es solo de desplazamiento modulo a modulo.
- 📄 **Stop:** Esta opcion permite ir al formulario principal, igual que la anterior opcion, no realiza ninguna modificacion de datos de almacenamiento.
- ⏩ **Siguiente:** Esta opción permite avanzar al modulo siguiente, lo particular de esta herramienta es que almacena datos, para su posterior uso. Cumple la funcion del boton aceptar, con la diferencia que avanza al modulo siguiente.
- 📄 **Nuevo:** Esta opcion permite limpiar el modulo que se está usando, datos, resultados y demas variables.
- ✖ **Cancelar:** Esta opcion permite salir del modulo, e ir al formulario principal borrando todos los datos y resultados. Cumple la misma funcion que el boton cerrar del modulo. Muestra el siguiente mensaje, ya que perderá todo si da en aceptar.



Reporte: Esta opción permite hacer el reporte del modulo actual. El uso de esta herramienta es importante ya que puede realizar el reporte de los diferentes escenarios de simulación.



Tabla: Algunos módulos tienen la posibilidad de utilizar esta opción. Muestra tabla de valores de algunas variables que son usados en el modulo actual.



Tipo de cuenco: En el modulo de disipación de energía se presenta esta opción, la cual contiene tres opciones, que puede ser usado de acuerdo al criterio del diseñador.



Cuenco tipo IV: Habilita la opción cuenco tipo IV, es una alternativa de disipador de energía, con la finalidad de evitar costos elevados en la construcción del disipador.



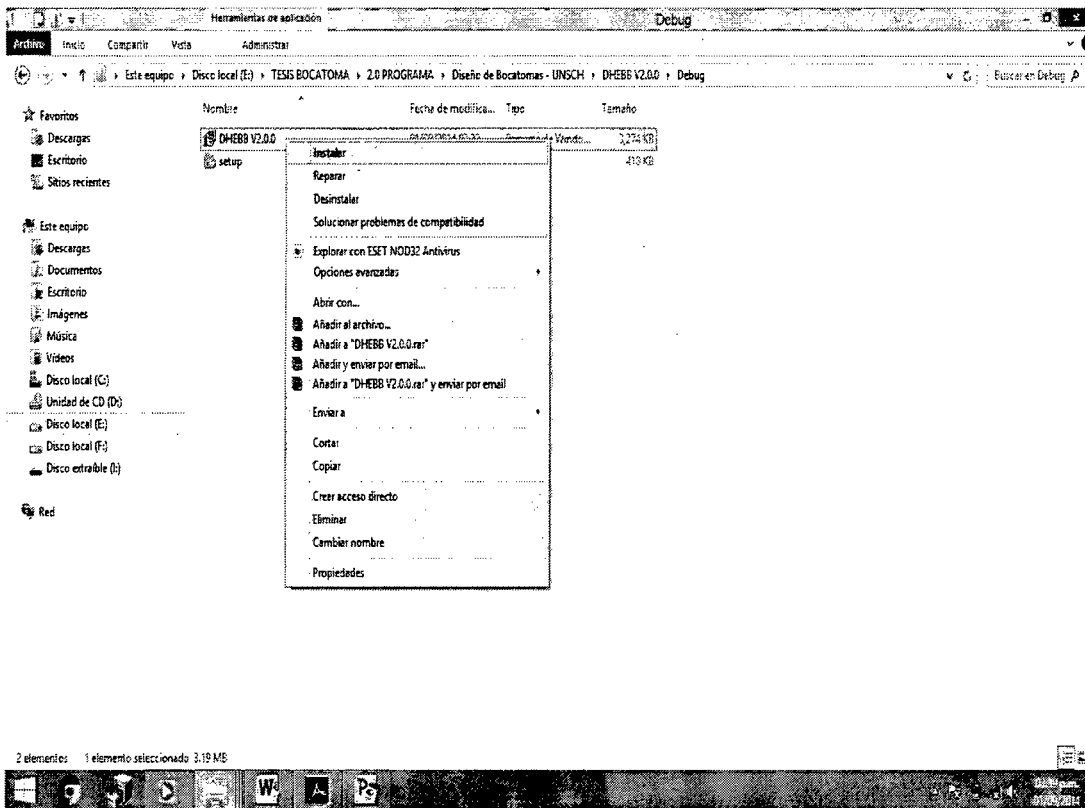
Cuenco tipo III: Habilita la opción cuenco tipo III.



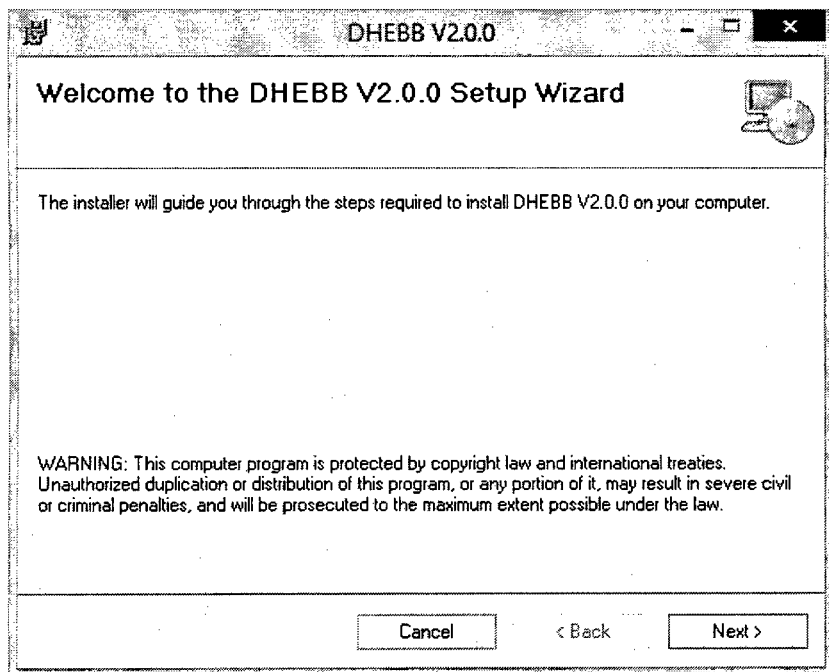
Cuenco tipo II: Habilita la opción cuenco tipo II, al hacer click sobre cualquiera de estas tres opciones, el diseñador está obligado a corregir la forma del barraje vertedor, de lo contrario aparecerá un mensaje de error.

17.3) INSTALACIÓN DEL SOFTWARE

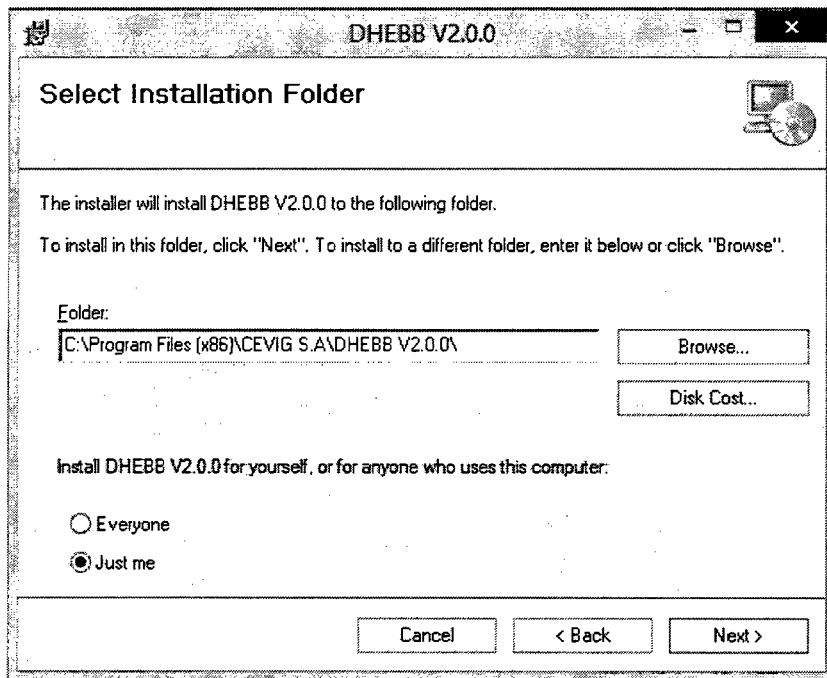
Abrir la carpeta DHEBB V2.0.0, y ejecutar el instalador del software, haciendo doble click sobre el icono indicado en la figura:



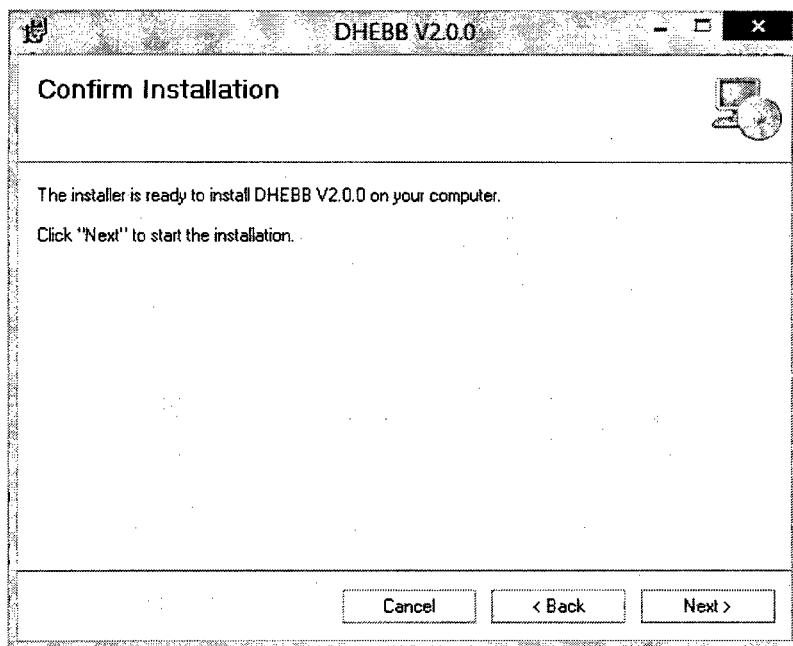
A continuación muestra la ventana siguiente, dar en Next >:



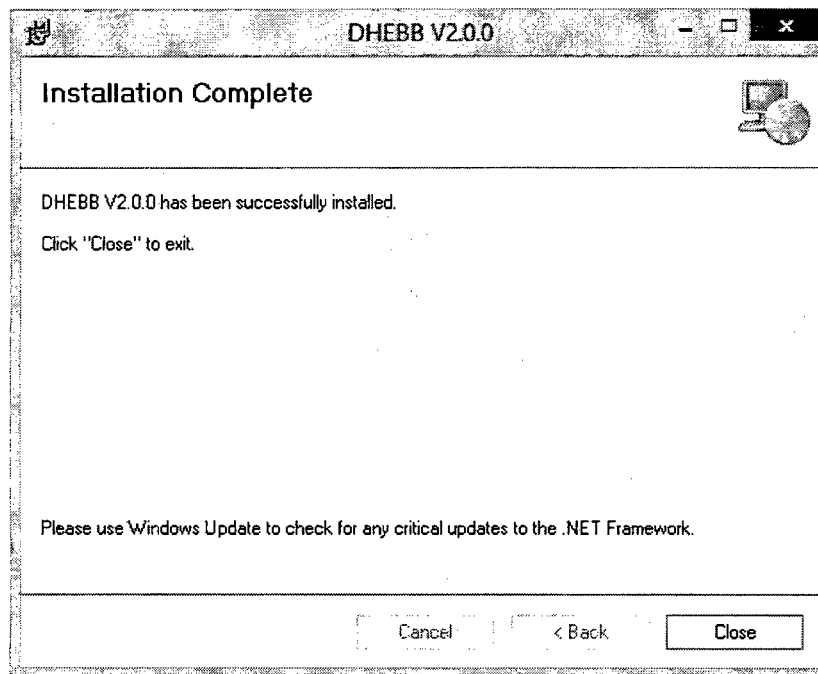
Seguidamente muestra la ventana donde tiene que especificar la ruta donde se instalará el software. Puede dejarlo por defecto tal como se muestra en la siguiente ventana. La instalación se realizará en la siguiente ruta C:\Program Files (x86)\CEVIG S.A\DHEBB V2.0.0\ . Una vez definido la ruta, dar en next >:



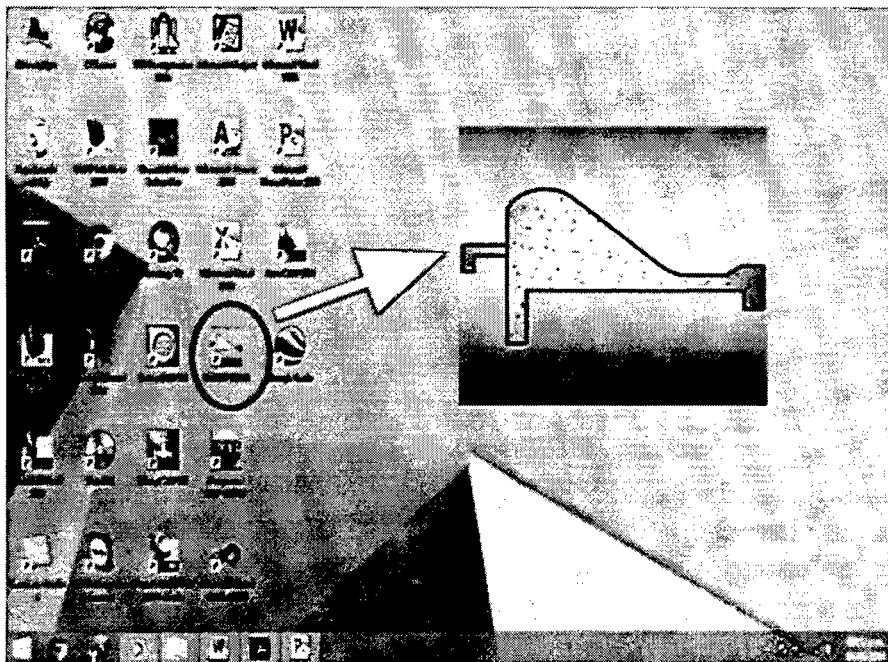
Luego aparece la ventana para confirmar de instalación de software:



Cuando la instalación ha terminado correctamente, se muestra la siguiente ventana, dar click en close.



Ahora puede ir al escritorio y encontrar el icono de la aplicación, desde donde puede ejecutarlo para usar este nuevo aplicativo de ingeniera.



17.4) PRUEBA DEL SOFTWARE

17.4.1) Ejercicio de prueba, Diseño de la bocatoma "Fortaleza"

Datos del proyecto:

| | | |
|---------------|-------------|----------------------|
| Departamento: | Lima | Longitud: 13°6' |
| Provincia: | Cañete | Latitud: 76°12' |
| Distrito: | San Vicente | Altitud: 100 m.s.n.m |

Caudales de diseño:

Caudal máximo instantáneo: 1000 m³/s
Caudal medio anual: 50 m³/s
Caudal mínimo anual: 15 m³/s
Caudal de derivación: 10 m³/s

A continuación mostramos la secuencia de diseño de la bocatoma, haciendo uso del software DHEBB V2.0.0:

Ingreso de datos del proyecto:

DATOS GENERALES DEL PROYECTO

Nombre del proyecto: Bocatoma Fortaleza

Ubicación de la bocatoma

Ubicación política:

Departamento: Lima

Provincia: Cañete

Distrito: San Vicente

Lugar:

Ubicación geográfica:

Latitud: 13°6'

Longitud: 76°12'

Altitud: 100 msnm

Ingreso de los caudales de diseño:

CAUDALES DE DISEÑO

Caudales del río

Caudal mínimo anual

15 m³/s

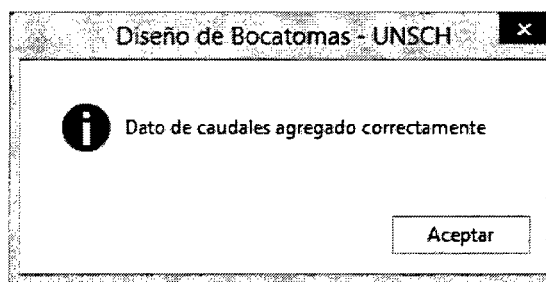
Agregar caudal >>

| Descripción | Caud |
|---------------------------|------|
| Caudal máximo instantáneo | 1000 |
| Caudal medio anual | 50 |

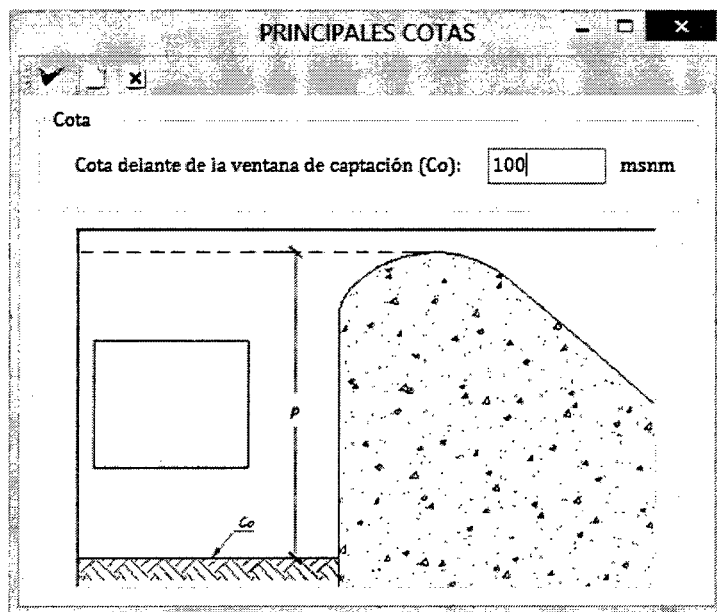
Caudal de captación

Caudal de derivación (Qd): 10 m³/s

Cuando el ingreso de datos se ha realizado correctamente: Muestra la siguiente información:



Ingreso de las cotas principales:



Diseño del canal de derivación:

Datos de ingreso:

Pendiente: 0.002 m/m

Coefficiente de rugosidad: 0.017

Talud del canal: 0

Ancho de la base: 3.7 m

DISEÑO DEL CANAL DE DERIVACIÓN

Datos

Canal de Máxima Eficiencia Hidráulica

Pendiente del fondo del canal (Sd): m/m

Coefficiente de rugosidad (n):

Talud (Z):

Ancho de solera (Bd): m

Borde libre

Función del caudal Función de la solera

Intervalos de tirante para calibración de canal m

Resultados

Tirante normal (Yd): m

Área hidráulica (Ad): m²

Perímetro mojado (Pd): m

Radio hidráulico (Rh): m

Velocidad (Vd): m/s

Espejo de agua (Td): m

Número de Froude (Fd):

Borde libre (BL): m

Sección del canal de derivación

Dimensiones finales del canal

Ancho de solera (Bd): m

Talud (Z):

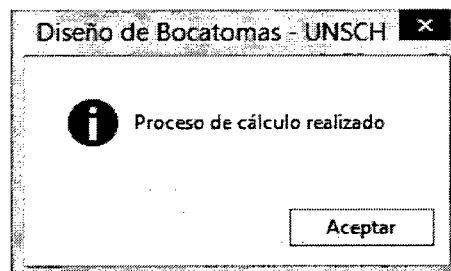
Tirante normal (Yd): m

Borde libre (BL): m

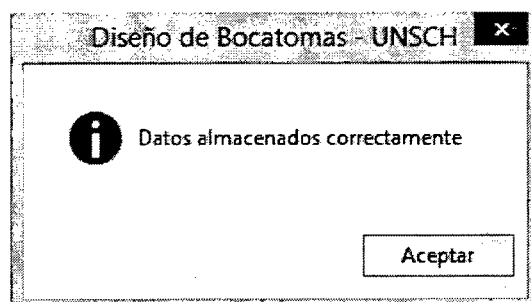
Características hidráulicas del canal de derivación:

| | Tirante (m) | Area (m ²) | Perímetro (m) | |
|---|-------------|------------------------|---------------|-----|
| ▶ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0.1 | 0.37 | 3.9 | 3.7 |
| | 0.2 | 0.74 | 4.1 | 3.7 |
| | 0.3 | 1.11 | 4.3 | 3.7 |

Si el proceso de cálculo se ha realizado de manera correcta, la aplicación muestra la siguiente información:



Si ha dado en la opción (aceptar), la aplicación muestra la siguiente información (solo, si el cálculo está libre de restricciones):



Definición del ancho de encauzamiento:

DEFINICIÓN DEL ANCHO DE ENCAUZAMIENTO

Datos

Pendiente del río (Sn): m/m

Ancho de cause natural (Bn): m

Método de Blench

Factor de fondo (Fb):

Factor de orilla (Fa):

Concentración de sedimento (Ca): ppm

Diam. medio de las partículas (Dm): mm

Método de Altunin

Coefficiente de Altunin (A):

Método de Simons y Henderson

Valores de K1:

Opciones de cálculo (Fb)

Si el río arrastra poco sedimento y el fondo es arenoso

Si existe arrastre de sedimento y el fondo arenoso

Resultados

Método de Blench

Ancho estable (B1): m

Método de Altunin

Ancho estable (B2): m

Método de Pettit

Ancho estable (B3): m

Método de Simons y Henderson

Ancho estable (B4): m

Dimensiones de diseño

Ancho de encauzamiento (Br): m

Condición de fondo

Definido por el usuario

| Condiciones de fondo | Valor |
|--|-------|
| Fondo y orillas de arena | 5.7 |
| Fondo de arena y orillas de material cohesivo | 4.2 |
| Fondo y orillas de material cohesivo | 3.6 |
| Fondo y orillas de grava | 2.9 |
| Fondo de arena y orillas de material no cohesivo | 2.8 |

Como se observa en los resultados obtenidos, el ancho natural del río es de 140 metros, pero calculando el ancho estable con los diferentes métodos, y considerando como resultado final el promedio de estas, se obtiene un ancho de 110 metros, este módulo permite la libre elección del diseñador.

Determinación del coeficiente de rugosidad del río:

Se aplicará la fórmula de Cowan para determinar la rugosidad del río.

The screenshot shows a software window titled "DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DEL RÍO". It features several sections for data entry and calculation:

- Método para definir el coef. de rugosidad:** Three radio buttons are present: "Tabla propuesto por Horton" (unselected), "Formula de Cowan" (selected), and "Métodos empíricos" (unselected).
- Datos: Formula de Cowan:** A list of five parameters with input fields: "Material considerado 'n0': 0.028", "Irregularidad en la sección recta 'n1': 0.000", "Variaciones de la sección transversal del cauce 'n2': 0.005", "Efecto relativo de obstrucciones 'n3': 0.010", and "Vegetación 'n4': 0.007". A sixth parameter, "Cantidad de meandros 'm5':", has a value of 1.000.
- Datos: Métodos empíricos:** Three empty input fields labeled D50, D75, and D90.
- Tabla:** A table with two columns: "Condición" and "Valor". It lists four conditions: "Tierra" (0.030), "Roca cortada" (0.025), "Grava fina" (0.024), and "Grava gruesa" (0.028).
- Rugosidad del río: Resultados método empírico:** Four empty input fields for "Método de Strickler (1923)", "Método de Strickler (1948)", "Método de Posada (1998)", and "Método de Lane y Carlson (1953)".
- Valor final de 'n':** An empty input field.
- Método empírico:** A dropdown menu.
- Coefficiente de rugosidad del río (nr):** A final output field containing the value 0.05.

D50: Diámetro del material del fondo del cauce en mm, correspondiente al 50% de la curva granulométrica del material que pasa, expresado en peso.

En este método no se puede realizar la edición del resultado.

Determinación de las características hidráulicas del río.

Este módulo tiene la ventaja de trabajar con datos y resultados obtenidos en los módulos anteriores.

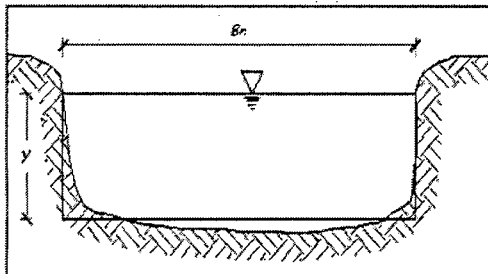
Determina las características hidráulicas del río de dos modos diferentes: La primera, en condición natural del río, y la segunda cuando existe el encauzamiento en ambas márgenes del río por parte de los muros.

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO

Datos Resultados (Sección natural) Resultados (Sección encauzado)

Cause natural del río

Talud (Zn):



Muro de encauzamiento

Coefficiente de rugosidad (nm)

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO

Datos Resultados (Sección natural) Resultados (Sección encauzado)

Resultados (Qmax)

Tirante normal máximo (Ymax): m

Área hidráulica (Amax): m²

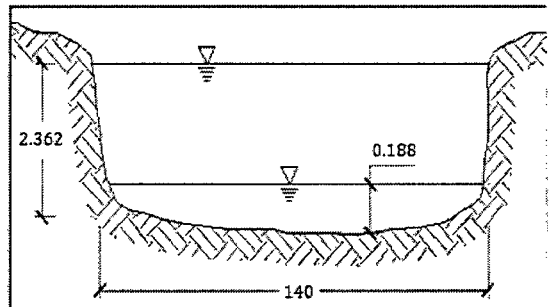
Velocidad del flujo (Vmax): m/s

Resultados (Qmin)

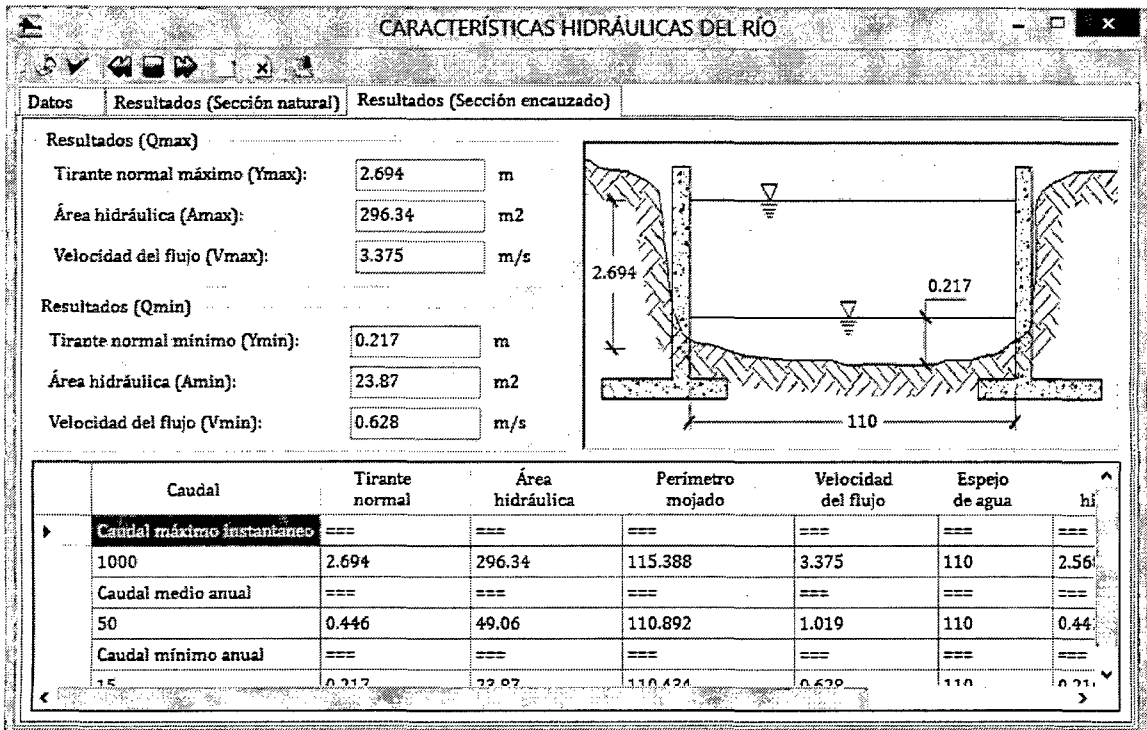
Tirante normal mínimo (Ymin): m

Área hidráulica (Amin): m²

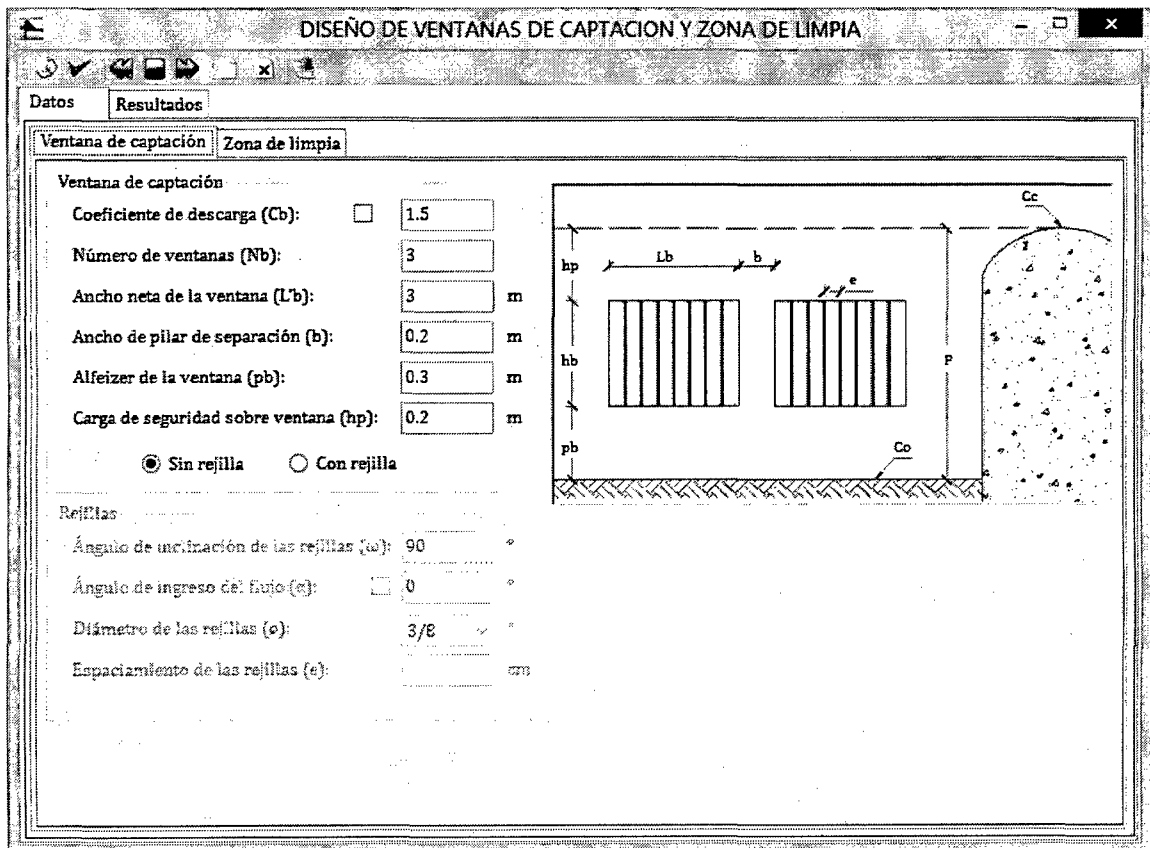
Velocidad del flujo (Vmin): m/s



| | Caudal | Tirante normal | Área hidráulica | Perímetro mojado | Velocidad del flujo | Espejo de agua | hi |
|---|----------------------------------|----------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------|------|
| ▶ | Caudal máximo instantáneo | === | === | === | === | === | === |
| | 1000 | 2.362 | 330.68 | 144.724 | 3.024 | 140 | 2.28 |
| | Caudal medio anual | === | === | === | === | === | === |
| | 50 | 0.387 | 54.18 | 140.774 | 0.923 | 140 | 0.38 |
| | Caudal mínimo anual | === | === | === | === | === | === |
| ◀ | 15 | 0.188 | 26.32 | 140.276 | 0.57 | 140 | 0.18 |



Diseño de la ventana de captación y de la zona de limpia:



DISEÑO DE VENTANAS DE CAPTACION Y ZONA DE LIMPIA

Datos **Resultados**

Ventana de captación **Zona de limpia**

Zona de limpia

Caudal de diseño (QL): 50 m³/s

Número de compuertas (NL): m

Ancho de la compuerta (bL): m

Ancho de pilares de separación (t): m

Profundidad de la poza (tL): m

Coefficiente de rugosidad (nL): m

Coefficiente de material a eliminar (C): m

Diámetro de grano mayor (d): m

Barraje vertedor

Coefficiente de descarga (Cp): 2.10

Tabla: Coeficiente "C" de material a eliminar

| Tipo de material | Coefficiente "C" |
|--------------------------|------------------|
| Arena y grava redondeada | 3.2 |
| Grava rectangular | 3.9 |
| Mezcla de arena y grava | 3.5 - 4.5 |

DISEÑO DE VENTANAS DE CAPTACION Y ZONA DE LIMPIA

Datos **Resultados**

Barraje vertedor

Altura del barraje vertedor (P): m

Longitud del barraje vertedor (Lp): m

Carga de agua sobre barraje (Ho): m

Cota de cresta (Cc): msnm

Ventana de captación

Altura de ventana (hb): m

Número de rejillas (Nr): m

Ancho correg. de la ventana (Lb): m

Zona de limpia

Ancho total (BL): m

Ancho efectivo (Be): m

Altura de la compuerta (hL): m

Coefficiente de descarga (CL): m

Pendiente del canal de limpia (SL): m/m

Tirante en canal de limpia (YL): m

Velocidad en canal de limpia (VL): m/s

Velocidad para inicio de arrastre (VL): m/s

Detalle canal de limpia

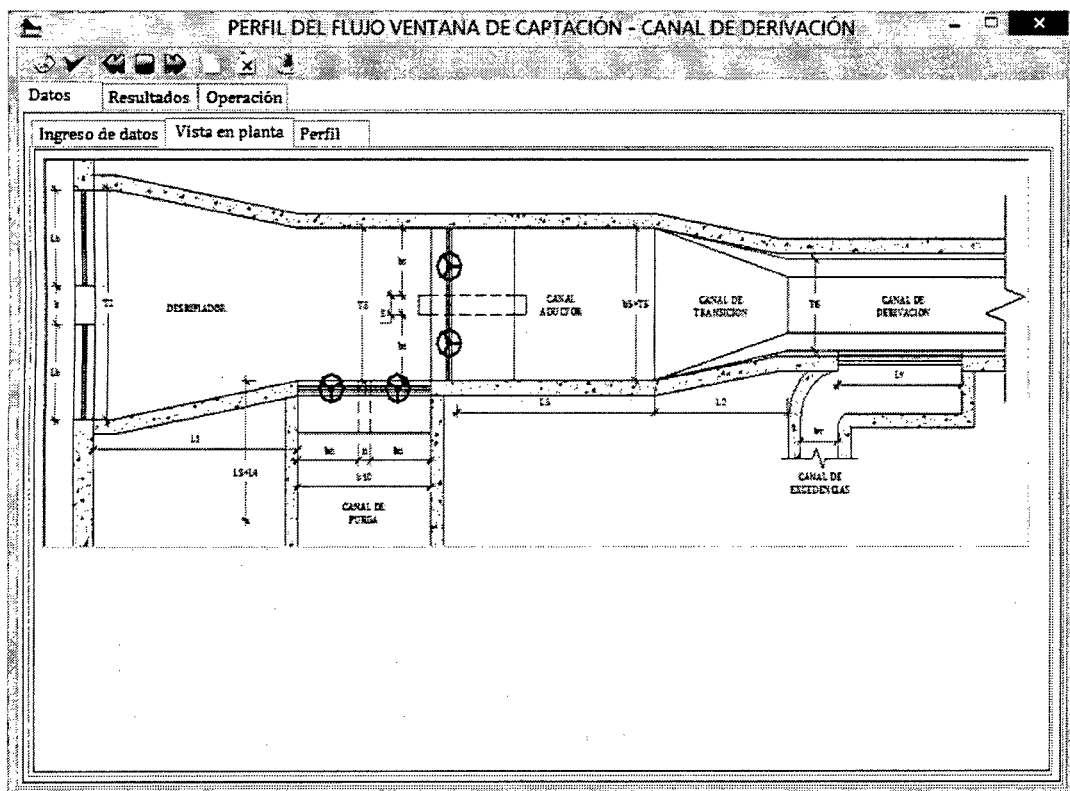
Definición del perfil del flujo ventana de captación – canal de derivación

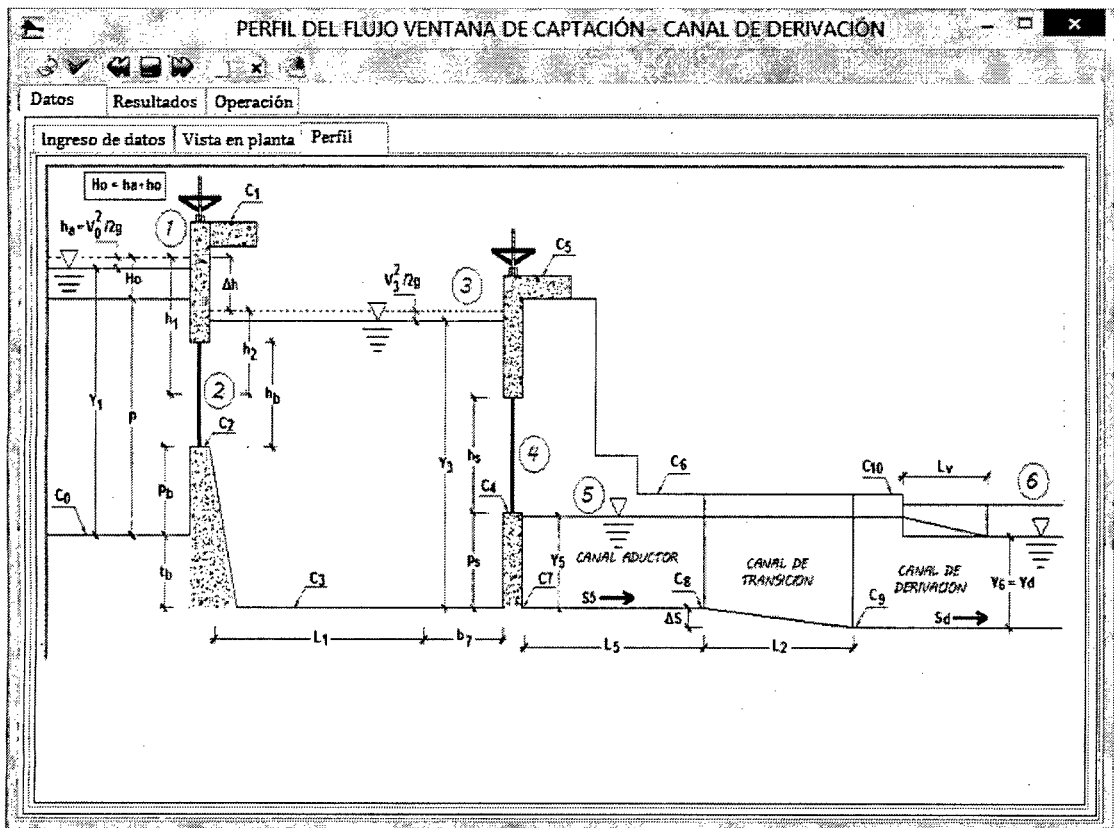
PERFIL DEL FLUJO VENTANA DE CAPTACIÓN - CANAL DE DERIVACIÓN

Datos Resultados Operación

Ingreso de datos Vista en planta Perfil

| | |
|--|---|
| Ventana de captación Coeficiente de descarga (Cb): <input type="checkbox"/> 0.65 Compuerta de admisión Coeficiente de descarga (Cs): <input type="checkbox"/> 0.60 Numero de compuertas (Ns): 3 Ancho de compuerta (bs): 2 m Ancho de pilar de separación (s): 0.2 m Alfeizer de la compuerta (ps): 1.25 m Compuerta de desripiador Coeficiente de descarga (Cn): 0.632 Numero de compuertas (Nn): 1 Ancho de compuerta (bn): 2.5 m Ancho de pilar de separación (n): m | Canal de purga Coeficiente de rugosidad (np): 0.017 Pendiente del canal (Sp): 0.008 m/m Vertedor de excedencias Caudal admisible en canal de derivación (Q12): 10.5 m ³ /s Coeficiente de descarga (Cv): <input type="checkbox"/> 1.50 Canal de excedencias Coeficiente de rugosidad (nv): 0.017 Pendiente del canal (Sv): 0.008 m/m Ancho de solera (bv): 3.0 m Datos adicionales Borde libre en muro de encauzamiento (BLp): 0.3 m Borde libre en muro de desripiador (BLs): 0.3 m Longitud del canal aductor (L5): 6 m |
|--|---|





PERFIL DEL FLUJO VENTANA DE CAPTACIÓN - CANAL DE DERIVACIÓN

Datos Resultados Operación

| Caudal mínimo anual | Caudal máximo instantáneo | Caudal medio anual | Caudal 75% persistencia | Caudal definido por usuario | |
|--|---------------------------|--|-------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Zona del barraje | | Compuerta de admisión | | | |
| Altura de velocidad (h_a): | 0 m | Caudal de descarga (Q_{ds}): | 10 m ³ /s | | |
| Carga de agua sobre barraje (h_o): | 0.083 m | Tirante en la sección 3 (Y_3): | 2.181 m | | |
| Tirante en la sección 1 (Y_1): | 1.433 m | Altura de compuerta de admisión (h_s): | 0.867 m | | |
| Desnivel río - desripiador (t_b): | 0.98 m | Velocidad en la sección 3 (V_3): | 0.716 m/s | | |
| Velocidad en sección 1 (V_1): | 0.095 m/s | Velocidad en la sección 4 (V_4): | 3.205 m/s | | |
| Ventana de captación | | Compuerta de desripiador | | | |
| Pérdida de carga (Δh): | 0.206 m | Altura de la compuerta (h_n): | 1.196 m | | |
| Velocidad en sección 2 (V_2): | 2.01 m/s | Velocidad en sección 8 (V_8): | 5.294 m/s | | |
| Desripiador | Canal de aducción | Canal de transición | Canal de purga | Vertedor y canal de excedencias | Cotas principales |
| Ancho de base en sección 2 (T_2): | 9.4 m | | | | |
| Ancho de base en sección 3 (T_3): | 6.4 m | | | | |
| Longitud (L_1): | Método de Hind | 6.8 m | | | |

PERFIL DEL FLUJO VENTANA DE CAPTACIÓN - CANAL DE DERIVACIÓN

Datos Resultados Operación

| Caudal mínimo anual | Caudal máximo instantáneo | Caudal medio anual | Caudal 75% persistencia | Caudal definido por usuario |
|-----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Zona del barraje | | | | |
| Altura de velocidad (ha): | 0.279 m | Compuerta de admisión | | |
| Carga de agua sobre barraje (ho): | 2.533 m | Caudal máximo de derivación (Qmd): | 21.776 m ³ /s | |
| Tirante en la sección 1 (Y1): | 3.883 m | Tirante en la sección 3 (Y3): | 4.13 m | |
| Velocidad en sección 1 (V1): | 2.341 m/s | Velocidad en la sección 3 (V3): | 0.824 m/s | |
| Ventana de captación | | | | |
| Pérdida de carga (Δh): | 0.977 m | Compuerta de desripiador | | |
| Velocidad en sección 2 (V2): | 4.378 m/s | Velocidad en la sección 8 (V8): | 8.15 m/s | |
| | | Caudal por compuerta (Q8): | 15.401 m ³ /s | |

| Desripiador | Canal de aducción | Canal de transición | Canal de purga | Ventedor y canal de excedencias | Cotas principales |
|---|-------------------|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Ventedor de excedencias | | | | | |
| Tirante en canal de derivación (Ymd): | 2.2229 m | Canal de excedencias | | | |
| Altura del umbral del ventedor (Yd): | 1.249 m | Caudal en canal de excedencias (Qv): | 11.276 m ³ /s | | |
| Tirante en canal de derivación (Y12): | 1.2938 m | Tirante normal (Yv): | 1.003 m | | |
| Long. ventedor (Lv): Método de Weisbacl | 16.83 m | Borde Libre (BLv): | 0.297 m | | |
| | | Velocidad (Vv): | 3.747 m/s | | |

Diseño del barraje ventedor:

DISEÑO DEL BARRAJE VERTEDOR

Datos Resultados

Datos

Considerar pilas intermedias en el barraje? No Si

Coefficiente de descarga

Método de USBR Método de Gehy

Perfil del cimacio

Criterio de diseño según el USBR

Criterio de diseño según la WES

Diferencia de altura (Δr): 0 m

Radio de la curva de descarga (R3)

Formula 01

Formula 02

Ángulo de la curva de descarga (α)

Definido por el programa

Definido por el usuario Zb:

Intervalo para definir el perfil del cimacio: m

Borde libre de muro aguas abajo de barraje: m

Datos: Pilas intermedias en barraje

Coef. de contracción por estribos (ka):

Coef. de contracción por pilas (kp):

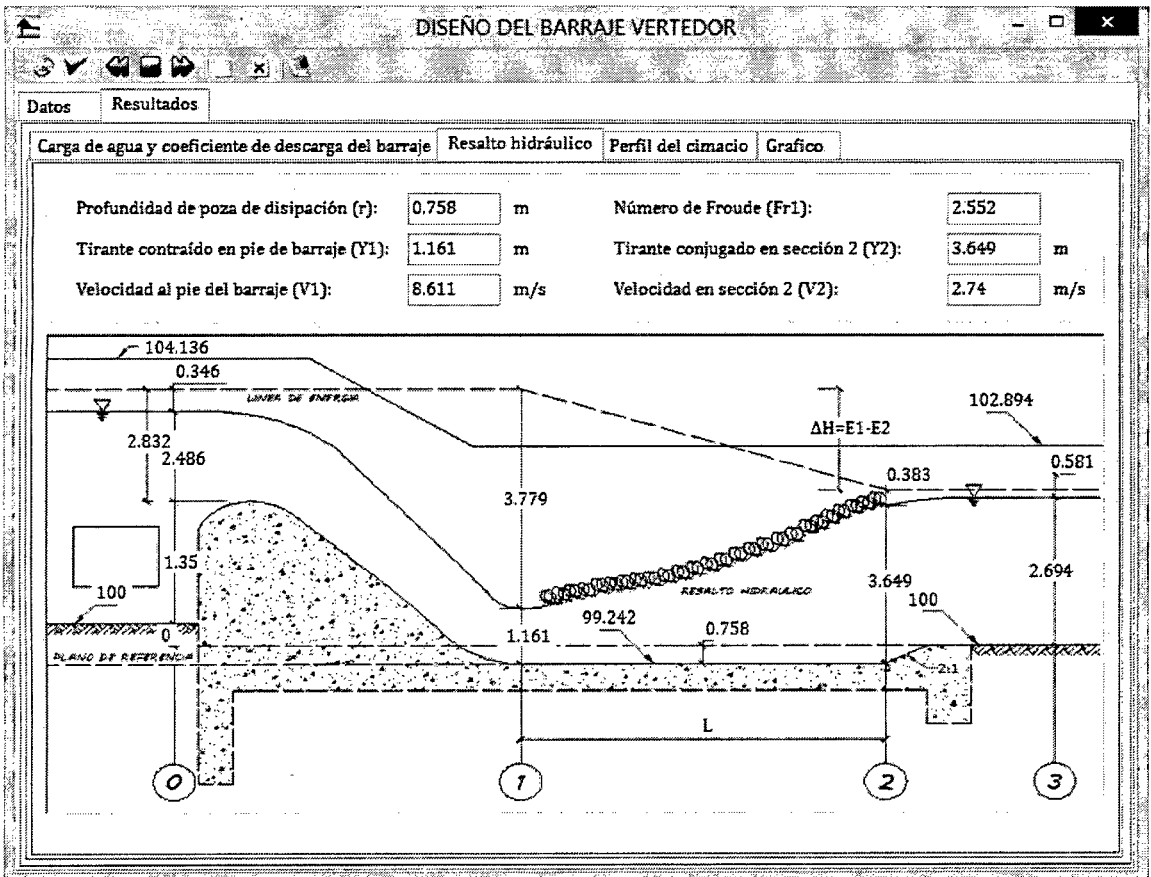
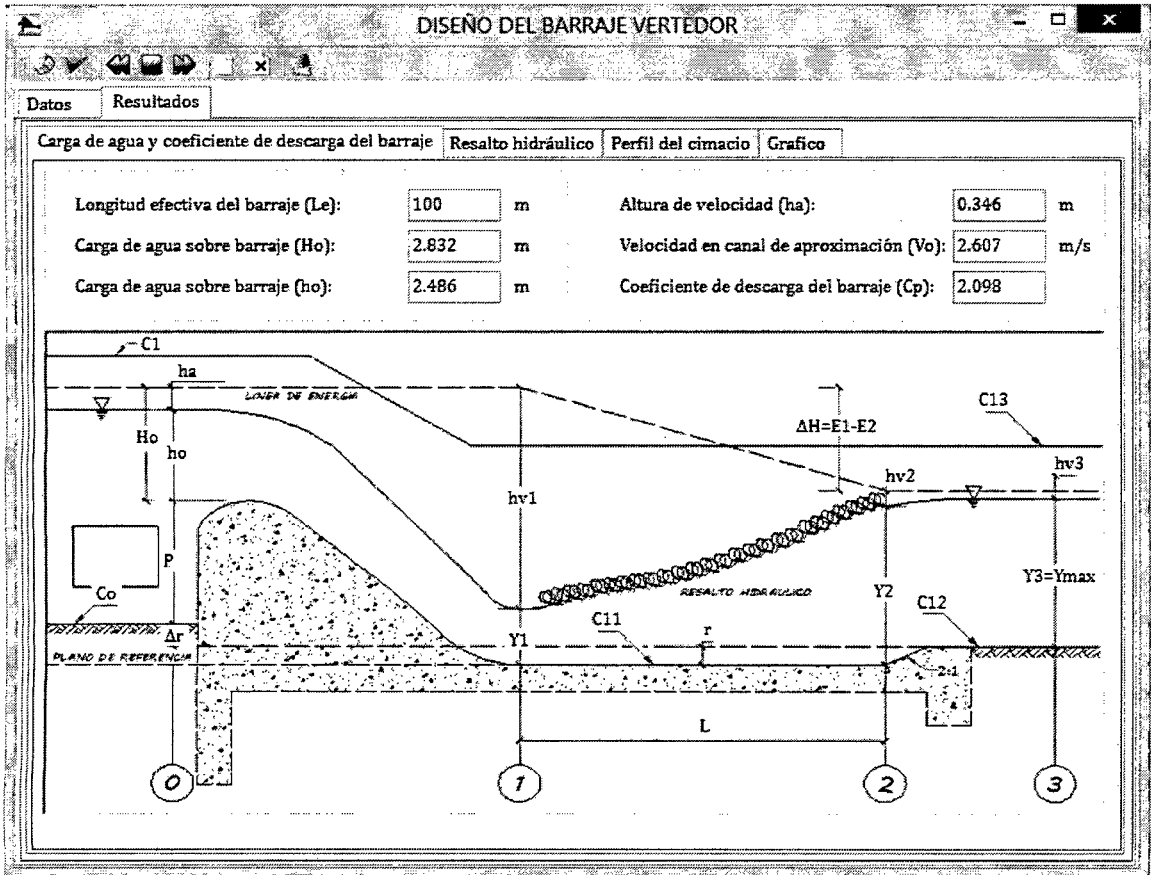
Número de pilas (np):

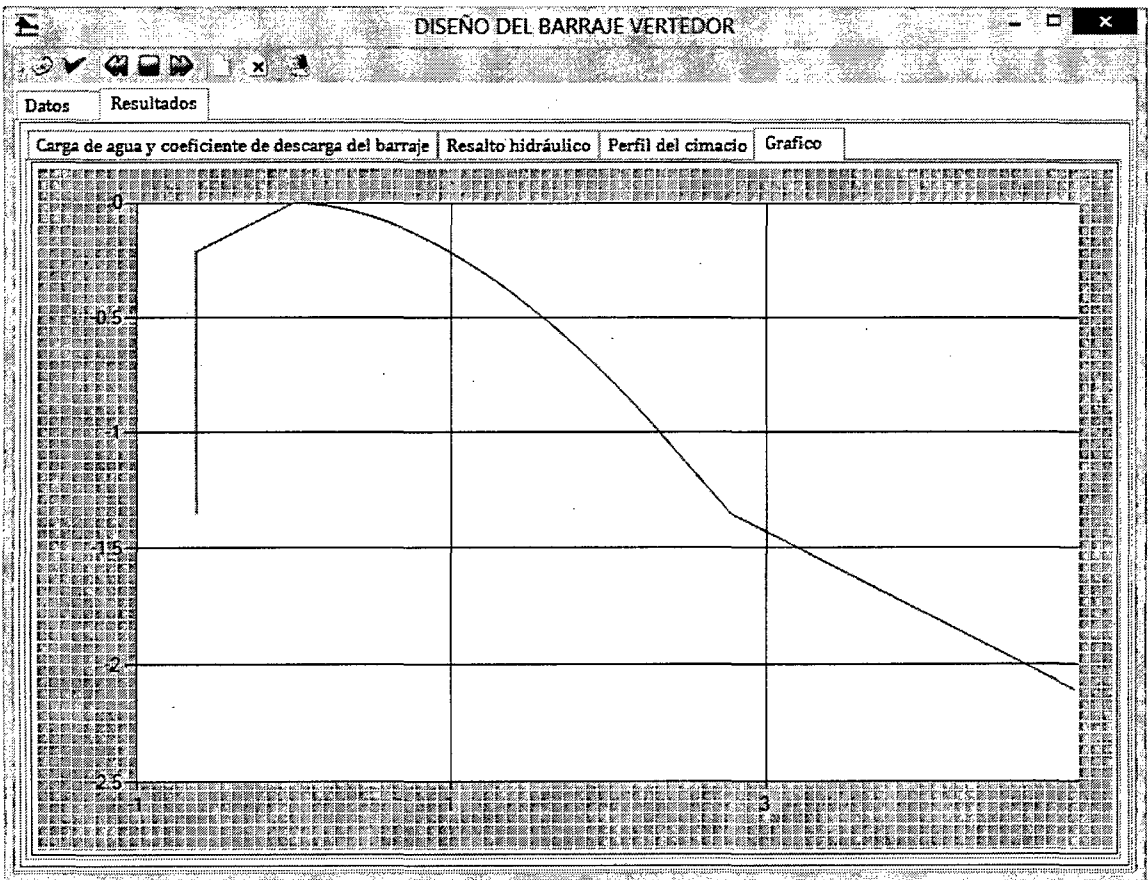
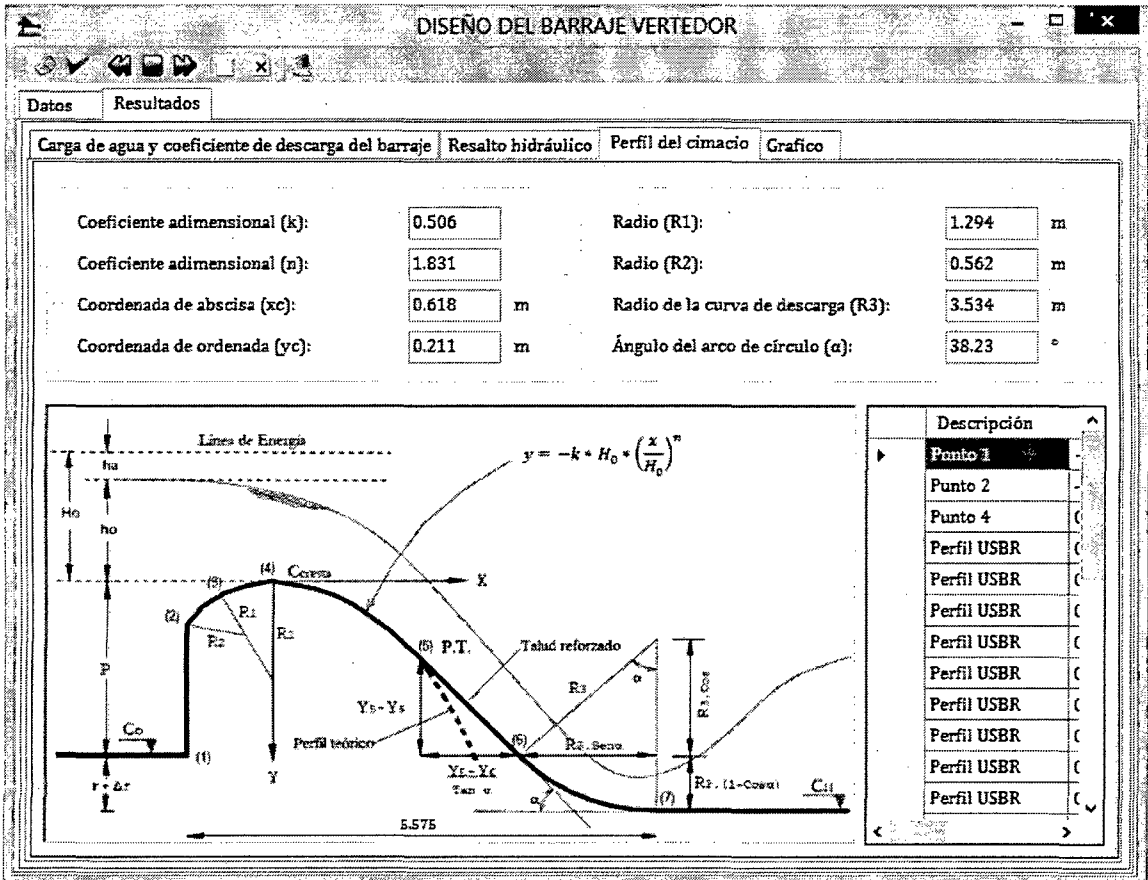
Valores de ka Valores de kp

a) Aristas agudas.
Ka=0.2

b) Aristas redondeadas.
Ka=0.1

c) Aristas redondeadas y muro de acceso inclinado.
Ka=0





Diseño del dissipador de energía:

DISEÑO DEL DISIPADOR DE ENERGÍA

Resalto hidráulico

Tirante contraído en pie de barrage (Y1): 1.161 m

Número de Froude (Fr1): 2.552

Velocidad al pie del barrage (V1): 8.611 m/s

Tirante conjugado en sección 2 (Y2): 3.649 m

Número de Froude (Fr2): 0.458

Velocidad en sección 2 (V2): 2.74 m/s

Características del resalto | XY perfil | Grafico

Tipo de resalto formado: Resalto oscilante

Perdida de energía (ΔH): 0.909 m

Longitud del resalto (L): Figura N° 9.08 (USBR) 18 m

| Formula | Long. Resalto (m) |
|-----------------------|-------------------|
| Figura N° 9.08 (USBR) | 18 |
| USBR-1 | 17.65 |
| USBR-2 | 18.2 |
| Pavloski | 9.87 |
| Safranetz | 17.48 |
| Rabinovich-Manteva | 17.44 |

Corregir Perfil de cimacio | Cuenco Tipo IV | Cuenco Tipo III | Cuenco Tipo II | Grafico

Prof. de poza de disipación (r): m

Base del barrage (Bb): m

Ángulo del arco de círculo (α): °

Corregir >>

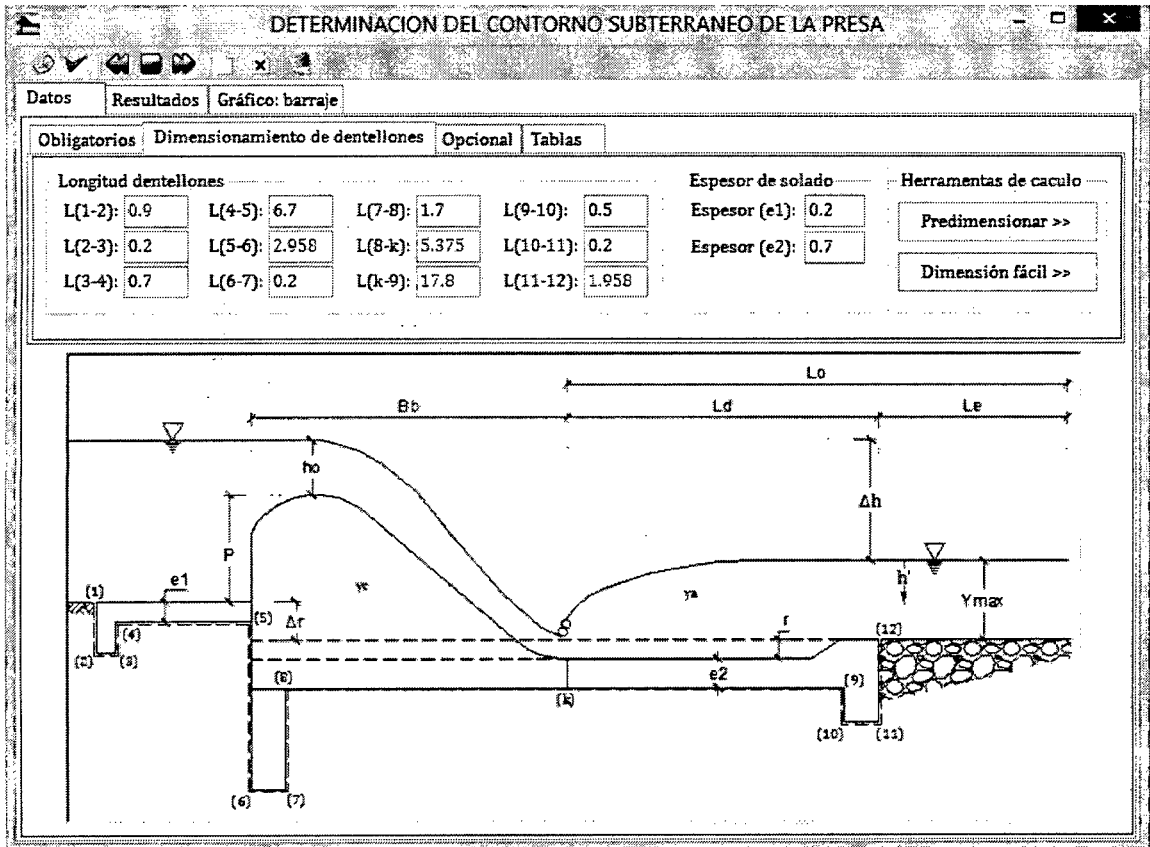
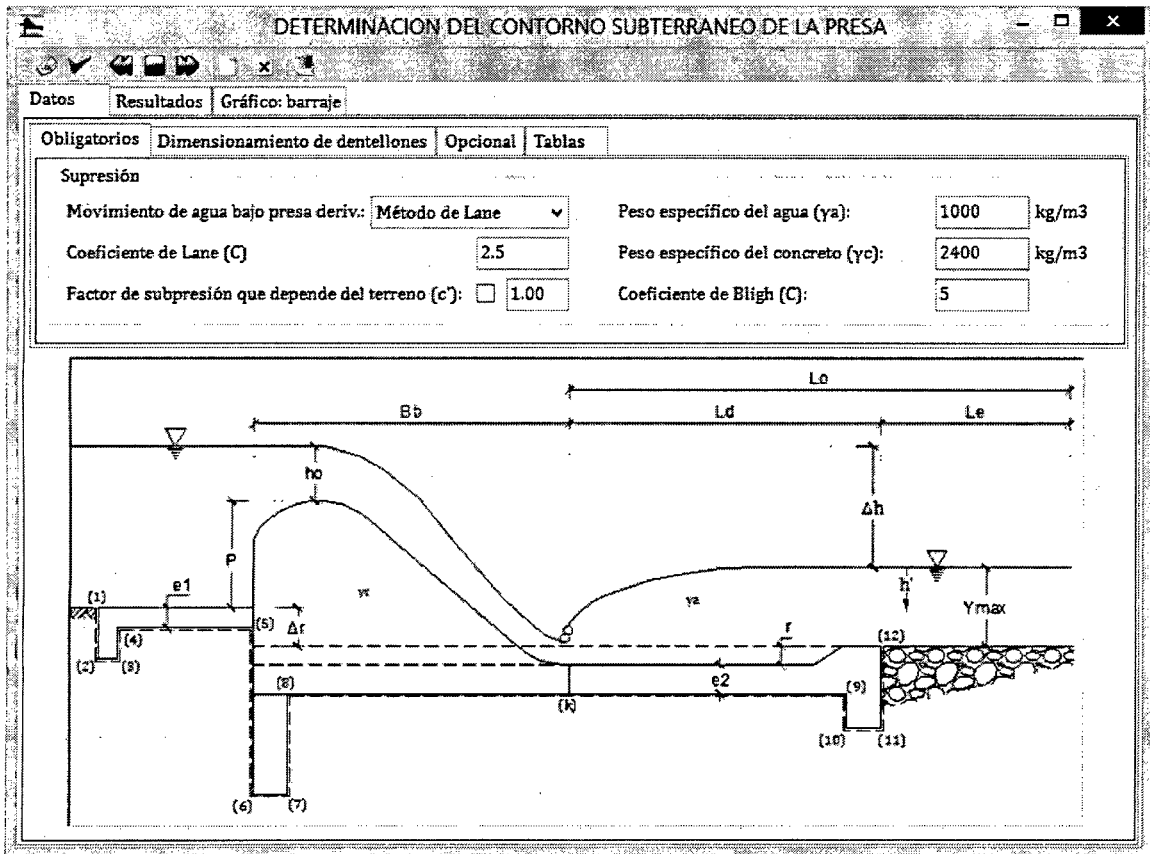
Características del resalto | XY perfil | Grafico

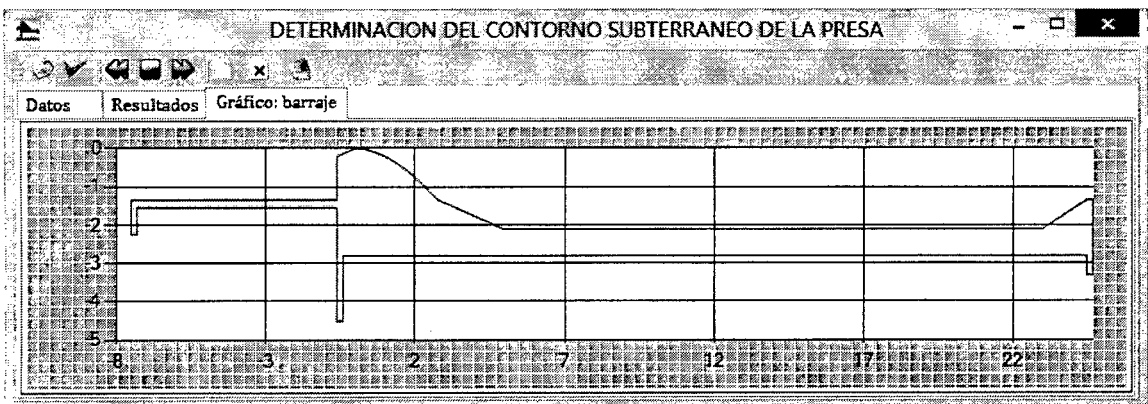
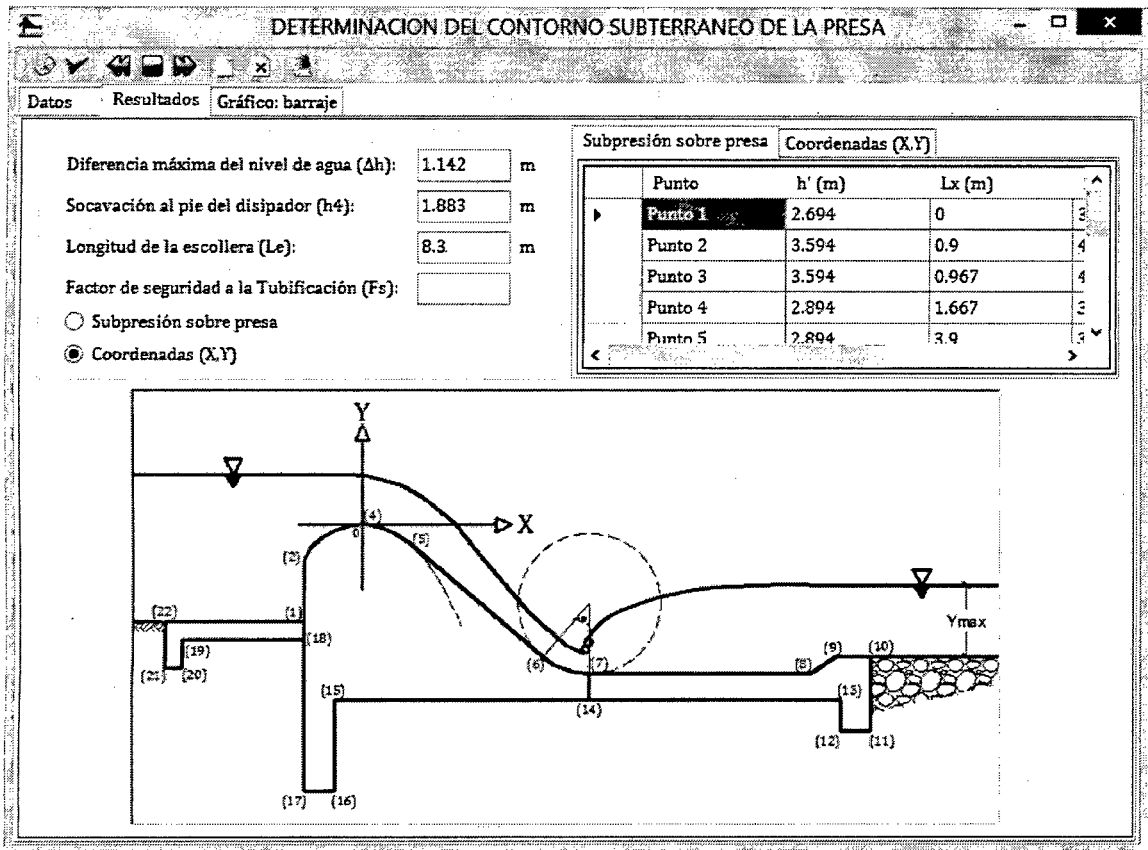
| Descripción | X (m) | Y (m) |
|-------------|--------|--------|
| Punto 1 | -0.618 | -1.35 |
| Punto 2 | -0.618 | -0.211 |
| Punto 4 | 0 | 0 |
| Perfil | 0.1 | -0.003 |
| Perfil | 0.2 | -0.011 |
| Perfil | 0.3 | -0.024 |
| Perfil | 0.4 | -0.04 |
| Perfil | 0.5 | -0.06 |
| Perfil | 0.6 | -0.084 |
| Perfil | 0.7 | -0.111 |
| Perfil | 0.8 | -0.142 |

Características del resalto | XY perfil | Grafico

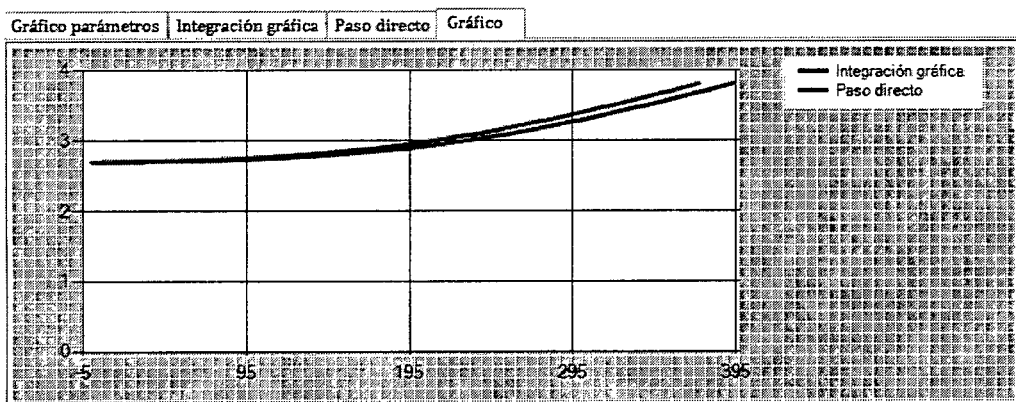
Como se ve en los gráficos anteriores, en el diseño del dissipador de energía no es necesario el llenado de ningún dato, ya que trabaja con datos y resultados obtenidos de módulos anteriores.

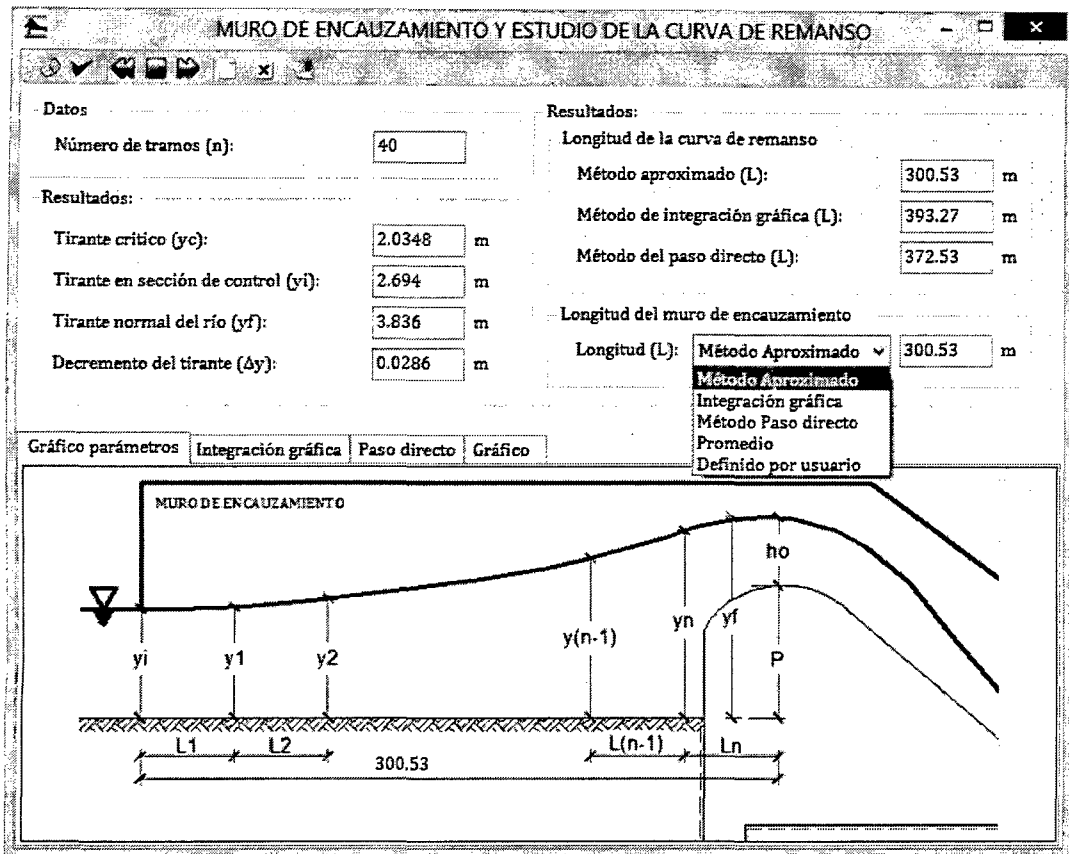
Determinación del contorno subterráneo de la presa:





Muro de encauzamiento y estudio de la curva de remanso:





Determinación de la socavación del cauce:

DETERMINACIÓN DE LA SOCAVACIÓN DEL CAUSE

Datos

Socavación general

Método de Lischtván - Levediev

Método de Straub

Diámetro medio de las partículas del material granular (D_m): mm

Método de Lischtván - Levediev

Periodo de retorno (T_r):

Coefficiente por contracción (μ):

Suelo granular Suelo cohesivo

Peso específico de la muestra agua sedimento (γ_m): Tn/m³

Peso específico del sedimento del lecho (γ_s): Tn/m³

Socavación local

Método de Liu, Chang y Skinner

Método de Artamonov

Método de Liu, Chang y Skinner

Condición del muro: Pared vertical

Método de Artamonov

Coefficiente K_B:

Coefficiente K_Q:

Coefficiente K_m:

Tabla valores de coeficientes:

| V (m/s) | 10 | 13 | 16 |
|---------|------|------|------|
| < 1.0 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 1.0 | 0.96 | 0.97 | 0.95 |
| 1.5 | 0.94 | 0.96 | 0.95 |
| 2.0 | 0.93 | 0.94 | 0.95 |
| 2.5 | 0.90 | 0.93 | 0.95 |

DETERMINACIÓN DE LA SOCAVACIÓN DEL CAUSE

Datos Resultados

Condición de flujo: m

Socavación General

Método de Lischvan - Levediev

Profundidad de socavación (Ds): m

Tirante después de ocurrido la socavación (Hs): m

Método de Straub

Profundidad de socavación (Ds): m

Tirante después de ocurrido la socavación (Hs): m

Socavación local

Método de Liu, Chang y Skinner

Profundidad de socavación (ds): m

Método de Artamonov

Profundidad de socavación (ds): m

Tirante después de ocurrido la socavación (Ht): m

Socavación de diseño

Profundidad de socavación:

- Método de Lischvan - Levediev
- Método de Straub
- Método de Liu, Chang y Skinner
- Método de Artamonov
- Promedio
- Definido por el usuario

Diseño de los muros de encauzamiento:

DISEÑO DE MUROS DE ENCAUZAMIENTO

Muro de gravedad Muro en voladizo

Datos generales:

Materiales

Peso específico del concreto (γ_c): kg/m³

Suelo de fundación

Capacidad de carga admisible (σ_{adm}): kg/cm²

Ángulo de fricción interna (ϕ): °

Coef. de fricción concreto-terreno (f):

Relleno

Peso específico (γ_s): kg/m³

Fondo río

Peso específico suelo saturado (γ_{sat}): kg/m³

Muro en análisis

Muro aguas arriba del barraje

Muro aguas abajo del barraje

Datos muro en voladizo:

Materiales

Resistencia del concreto (f_c): kg/cm²

Esfuerzo de fluencia del acero (f_y): kg/cm²

Acero de refuerzo:

Recubrimiento en pantalla:

Refuerzo vertical en pantalla (σ):

Refuerzo horizontal en pantalla (ρ):

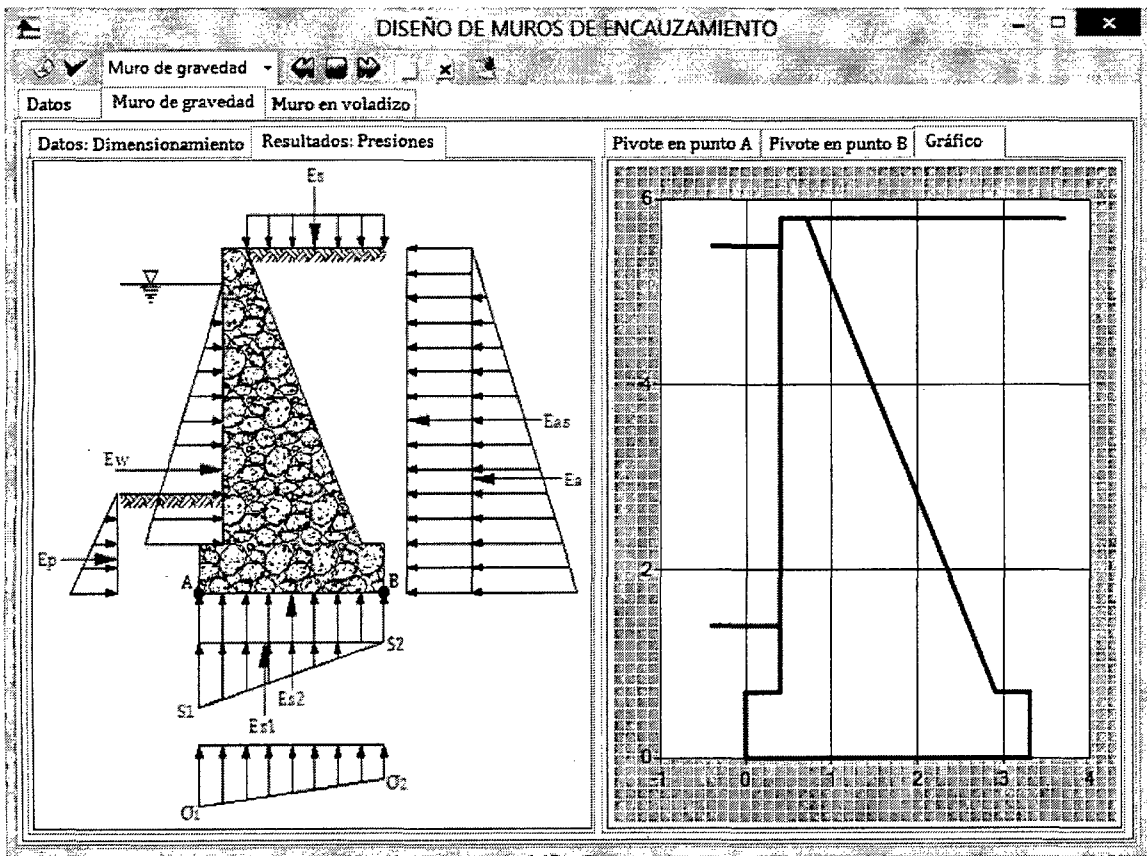
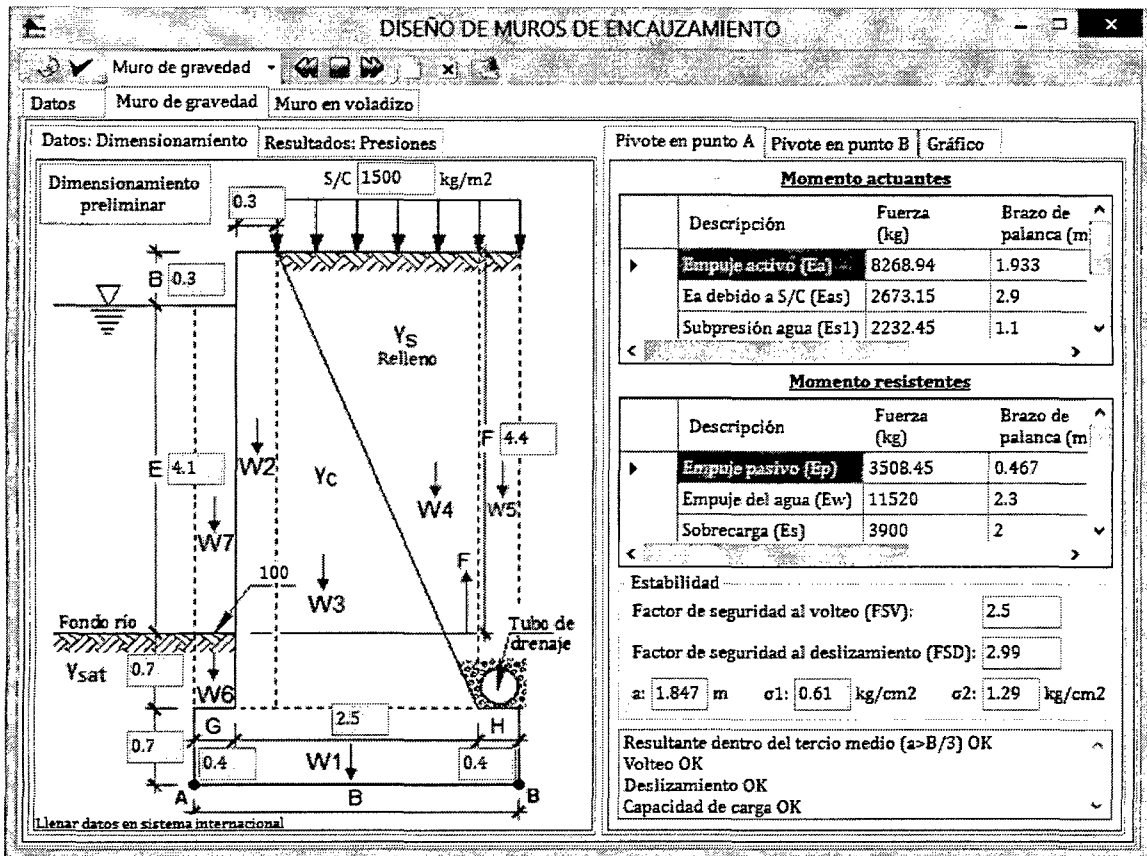
Recubrimiento en zapata:

Refuerzo en talón anterior (σ):

Refuerzo en talón posterior (σ):

Peso específico y ángulo de fricción interna

| TIPO DE TERRENO | γ_s (kg/m ³) | ϕ (°) |
|-------------------|---------------------------------|------------|
| Arcilla suave | 1440 a 1920 | 0° - 15° |
| Arcilla media | 1600 a 1920 | 15° - 30° |
| Limo seco y su... | 1600 a 1920 | 27° - 30° |
| Limo denso | 1760 a 1920 | 30° - 35° |



Diseño de muros laterales:

DISEÑO DE MURO LATERAL

Datos Resultados

Datos generales:

Materiales

Peso específico del concreto (γ_c): kg/m³

Resistencia del concreto ($f'c$): kg/cm²

Esfuerzo de fluencia del acero (f_y): kg/cm²

Suelo de fundación

Capacidad de carga admisible (σ_{adm}): kg/cm²

Ángulo de fricción interna (ϕ): °

Coef. de fricción concreto-terreno (f):

Peso específico del relleno (γ_s): kg/m³

Acero de refuerzo

Recubrimiento en pantalla: cm

Refuerzo vertical en pantalla (ϕ): "

Refuerzo horizontal en pantalla (ϕ): "

Recubrimiento en zapata: cm

Refuerzo en talón anterior (ϕ): "

Refuerzo en talón posterior (ϕ): "

Dimensionamiento preliminar

Llenar datos en sistema internacional

DISEÑO DE MURO LATERAL

Datos Resultados

Presiones Acero en pantalla Acero en zapata

Pivote en punto A Pivote en punto B Aceros Gráfico

| Momento actuantes | | |
|-----------------------|-------------|----------------------|
| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo de palanca (m) |
| Empuje activo (Ea) | 7167.73 | 1.8 |
| Ea debido a S/C (Eas) | 2488.79 | 2.7 |
| ΣFh | 1352.15 | ΣMa |

| Momento resistentes | | |
|----------------------|-------------|----------------------|
| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo de palanca (m) |
| Empuje pasivo (Ep) | 2603.67 | 0.333 |
| Empuje del agua (Ew) | 8405 | 2.367 |
| Sobrecarga (Es) | 2850 | 2.1 |

Estabilidad

Factor de seguridad al volteo (FSV):

Factor de seguridad al deslizamiento (FSD):

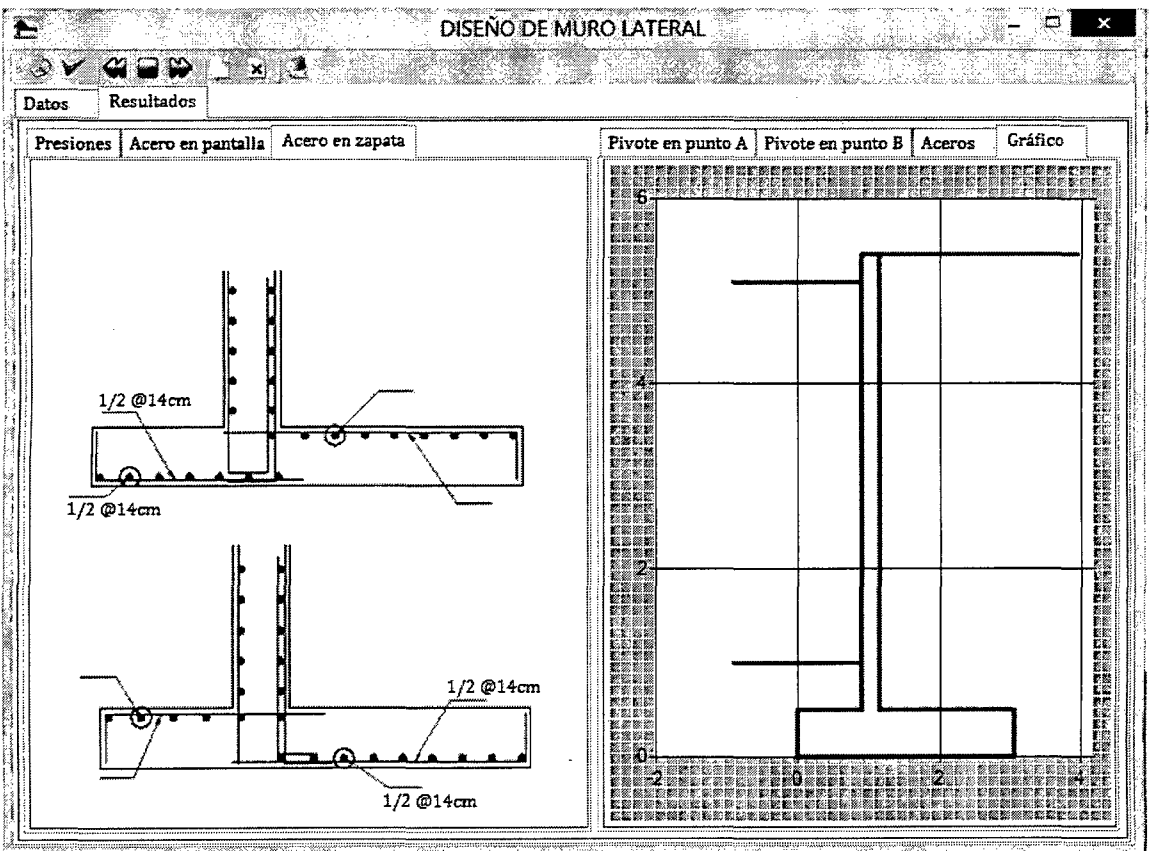
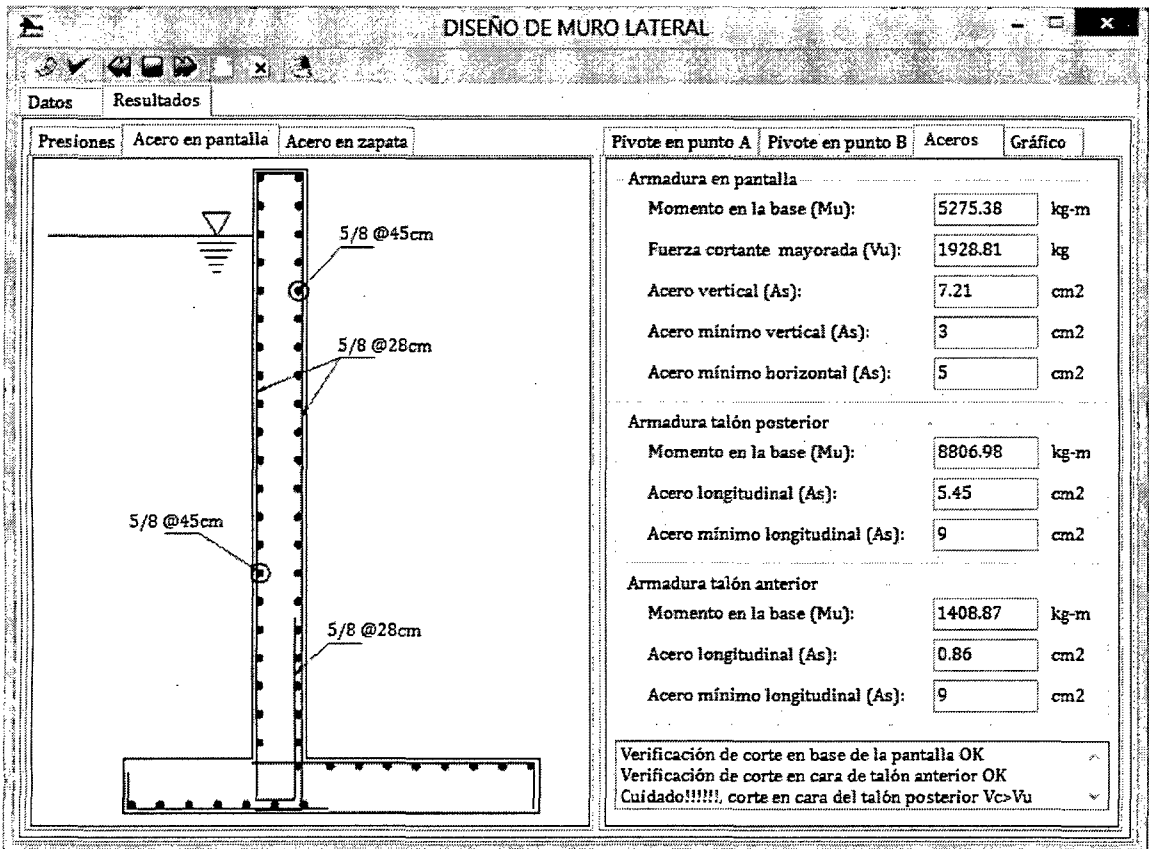
a : m σ_1 : kg/cm² σ_2 : kg/cm²

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK

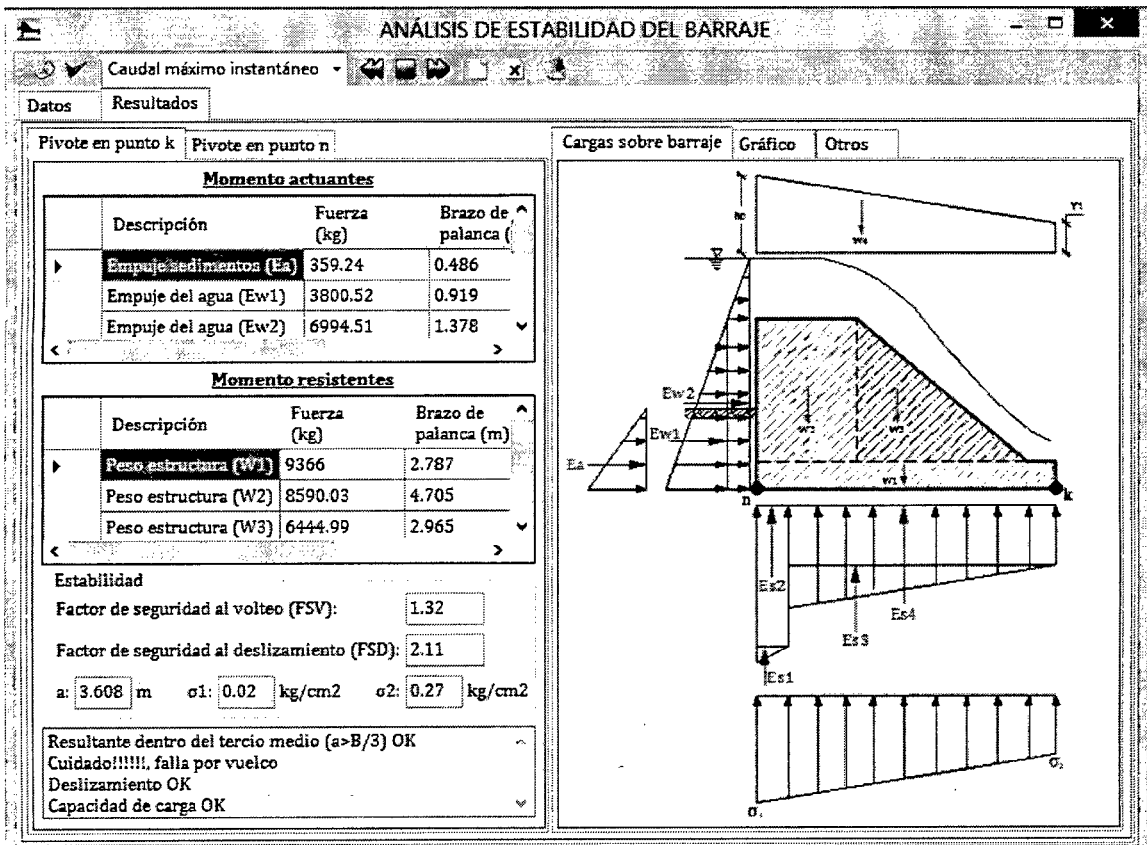
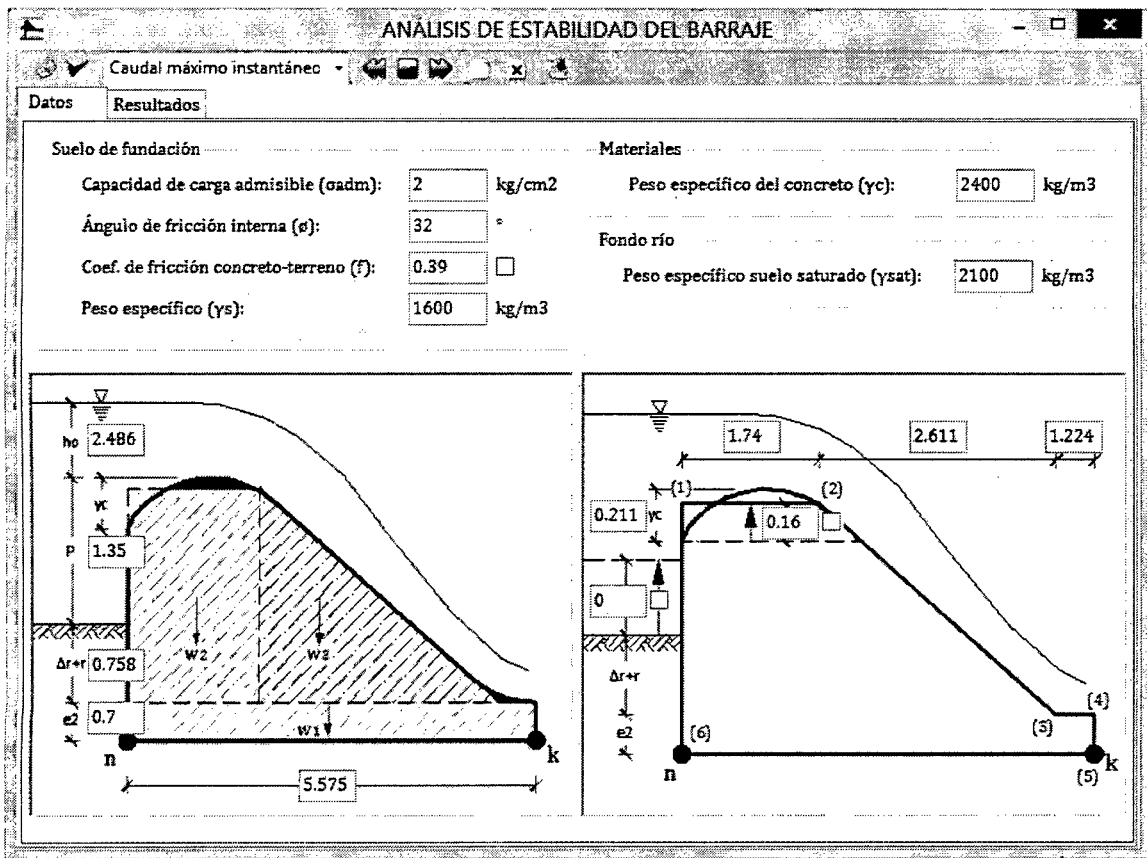
Volteo OK

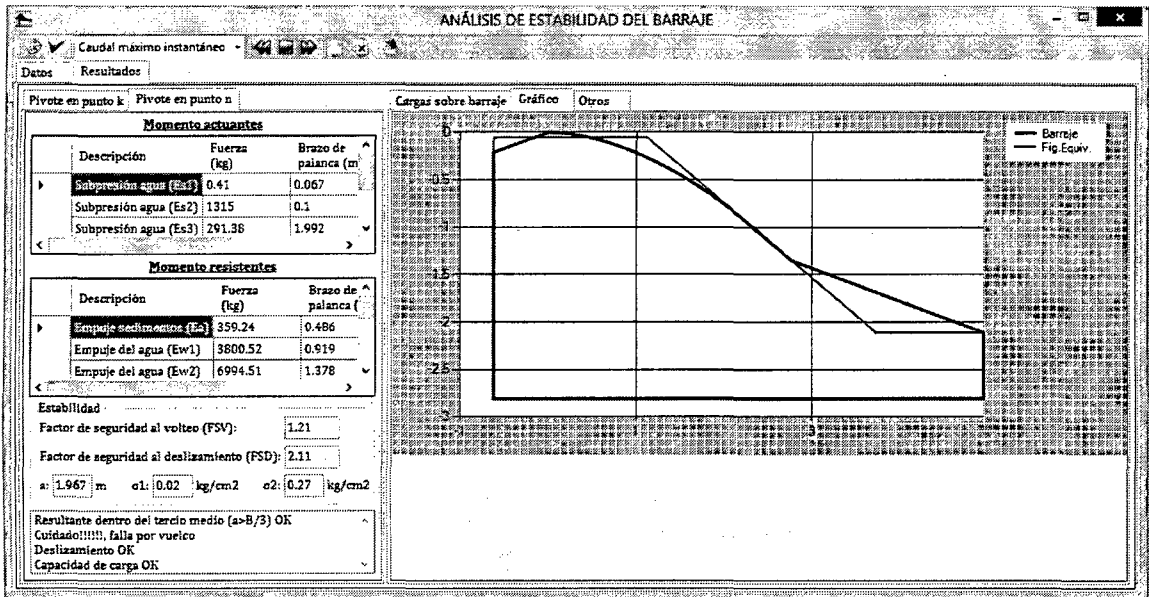
Deslizamiento OK

Capacidad de carga OK



Análisis de estabilidad del barrage





Diseño de mezclas

DISEÑO DE MEZCLAS (METODO DEL COMITE 211 DEL ACI)

Datos

Cemento

Peso específico: 3.15

Agregado fino

Peso específico de masa: 2.64

Absorción: 0.7 %

Contenido de humedad: 6 %

Módulo de finesa: 2.8

Agregado grueso

Tamaño máximo nominal: 1 1/2"

Peso seco compactado: 1600 kg/m³

Peso específico de masa: 2.68

Absorción: 0.5 %

Contenido de humedad: 2 %

Incorporación de aire al concreto

No Si

Datos: Concreto

Resistencia a la compresión del concreto: 210 kg/cm²

Consistencia del concreto: Plástica

¿El contratista cuenta con registros de ensayos de obras anteriores?

No Si

Desviación estándar de los datos: Calcular (σ)

Desea calcular rendimientos?

No Si Peso unitario del concreto: 2400 kg/m³

Dosificación en peso Dosificación en volumen Registros de ensayos

Proporción en peso de los materiales:

1 : 2.39 : 3.64 + 16.4 (lt/saco)

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Resistencia promedio: | 294 kg/cm ² |
| Volumen unitario de agua: | 181 lt/m ³ |
| Contenido de aire: | 1 % |
| Relación agua-cemento: | 0.56 |
| Factor cemento: | 323 kg/m ³ |
| Contenido de agregado grueso: | 1152 kg/m ³ |

==== Volúmenes absolutos ====

| | |
|----------|----------------------|
| Cemento: | 0.103 m ³ |
| Agua: | 0.181 m ³ |

18.0 DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos en la elaboración del software se puede discutir lo siguiente:

Para la validación del software DHEBB V2.0.0, se ha aplicado en el diseño de dos bocatomas, bocatoma “Fortaleza” existente), bocatoma “El Carmen” (proyectada), la primera de ellos con dimensiones grandes, que deriva un caudal de 10m³/s, y la segunda con dimensiones menores, la cual deriva 60Lt/s, esto con la finalidad de observar los posibles errores que puede ocurrir al momento de la ejecución del software. En el diseño de las bocatomas anteriormente mencionadas no se ha tenido ningún tipo de problema.

En el diseño de las ventanas de captación y zona de limpia se presenta ciertos inconvenientes, debido a que este módulo ha sido desarrollado con muchas estructuras de control, y en algunas de ellas anidadas. En caso de que se produzca error, la aplicación se detendrá, ya que no encuentra un resultado adecuado.

El problema anteriormente mencionado puede generarse en cualquier punto del software. Cada que se presenta este tipo de error, el diseñador del software irá corrigiendo estos problemas.

El software desarrollado tiene ciertas limitaciones, que los usuarios deben tener presente al momento de diseñar una estructura de captación, a continuación se menciona alguno de ellos:

- ✓ El encauzamiento debe realizarse en ambas márgenes del río.
- ✓ No se puede considerar barraje móvil en toda la sección del río.
- ✓ No se puede hacer el diseño de una bocatoma de tipo mixto.

En la aplicación del software para el diseño de bocatomas muestra avisos, restricciones, y mensajes. Debe prestar atención a cada uno de estos, de lo contrario está propenso a realizar un diseño deficiente de la estructura.

Los factores de seguridad tanto de los muros de encauzamiento, muros laterales y el barraje, deben estar por encima de los valores recomendados en el reglamento nacional de edificaciones.

Otro inconveniente se genera en el módulo “Perfil del flujo ventana de captación – canal de derivación”, en este caso muestra el mensaje “Velocidad demasiado alto en compuerta de admisión”, el software le sugiere aumentar el número de compuertas, o incrementar el ancho de la compuerta. Si el problema persiste, y el número de compuertas es demasiado, se deberá incrementar el alfeizer de la compuerta de admisión, con lo cual el error desaparecerá.

Al hacer la corrida de todos los datos notará que el factor de seguridad al volteo del barraje es menor que 1.5 por lo que muestra un mensaje de precaución, para incrementar este factor debe hacerlo incrementando el espesor del colchón disipador de energía, en el módulo “Determinación del contorno subterráneo de la presa”, caso contrario incrementar la diferencia de altura Δh en el módulo “Diseño del barraje vertedor”.

Cuando se realice la modificación de datos o resultados en alguno de los módulos, debe hacer la corrida en todos los módulos posteriores a él, con la finalidad de introducir al este nuevo valor en el diseño de la bocatoma.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

19.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

19.1) CONCLUSIONES

1. Es casi nulo a nivel local, regional, y nacional el uso de un software en el diseño de bocatomas, ya que en la actualidad solo se usan hojas de cálculo.
2. El software implementado simplifica el tiempo de cálculo y análisis de alternativas, para hacer el diseño hidráulico y estructural de bocatomas tipo barraje.
3. Como se demuestra en la validación de los resultados del programa, tienen bastante semejanza con los encontrados en las referencias bibliográficas, debido a que el material bibliográfico no realiza el diseño completo de las bocatomas, pero en temas puntuales el diseño coincide perfectamente.
4. Se concluye que el software DHEBB V2.0.0 puede usarse sin ningún tipo de problema para diseñar bocatomas grandes con caudales de derivación mayores de 10 m³/s, y bocatomas pequeñas, con caudal de derivación menores a 60 Lt/s.
5. El manual de usuario, y el ejemplo de aplicación, permiten una mejor comprensión del software DHEBB V2.0.0 y del procedimiento para el diseño de las bocatomas.

19.2) RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los usuarios de DHEBB V2.00 considerar estrictamente todas las advertencias y restricciones que muestra el software, para que el diseño final de la captación sea confiable. De lo contrario está sujeto a errores, que podrían llevar a un mal diseño y posterior construcción con alta probabilidad de falla.
- Se recomienda a trabajos a futuros, aprovechando la interfaz gráfica y el código fuente del programa sería interesante continuar con su desarrollo, con la finalidad de ampliar sus capacidades e integrar mayor información al programa. Por ejemplo; la opción de poder hacer un reporte de todas las partidas y metrados de toda la estructura. Asimismo, sería interesante incorporar una herramienta que permita la exportación de todo el diseño al AutoCad.
- Una recomendación final para tesistas interesados. Aplicar el software DHEBB V2.0.0 para hacer el diseño de bocatoma tipo barraje, verificar la confiabilidad y las bondades que brinda el software. Dar opinión al respecto.

BIBLIOGRAFÍA

Diseño hidráulico y estructural:

- Aguirre Llamas, William. 1999
“**Diseño estructural de una Bocatoma Barraje colchón disipador y transición**” Tesis. Universidad de San Martín De Porres.
Lima - Perú
- Arias Ninan, Moisés. 1992
“**Estructuras de captación (Bocatomas)**” Universidad nacional Agraria la Molina.
Lima – Perú
- Arthur H. Nilson. 2001
“**Diseño de Estructuras de concreto**” Duodécima edición, Mc Graw Hill/ Interamericana S.A.
Santafé de Bogotá – Colombia
- Arturo Rocha Felices. 1990-1991
“**Transporte de sedimentos aplicado al diseño de estructuras hidráulicas**” Capítulo de Ingeniería Civil, Consejo departamental de Lima, Colegio de Ingenieros del Perú.
Lima – Perú.
- Arturo Rocha Felices. 1992
“**Irrigación**” Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería.
Lima – Perú.
- Arturo Rocha Felices. 1998
“**Introducción a la hidráulica Fluvial**” Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería.
Lima – Perú.
- Bureau of Reclamation. 2007
“**Diseño de Pequeñas Presas**” Traducción de la 3ra edición Americana Actualizada y Ampliada.
Madrid – España
- Elmer García Rico. 1997

- “Manual de diseño hidráulico de canales y obras de arte”**
Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú.
- Enrique Rivva López. 2012
“Diseño de Mezclas”
Lima – Perú.
 - Gilberto Sotelo Ávila
“Diseño hidráulico de estructuras” Primera edición, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
 - Héctor Alfonso Rodríguez Días. 2010
“Hidráulica fluvial. Fundamentos y aplicaciones socavación”
Editorial escuela Colombiana de ingeniería.
 - Ing. Hugo Amado Rojas Rubio.
“Diseño de Bocatomas”
Departamento académico de hidráulica, hidrología. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú.
 - Ing. Mansen Valderrama Alfredo. 1988
“Diseño de bocatomas” Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento académico de hidráulica e hidrología.
 - Ing. Roberto Morales Morales. 2006
“Diseño en concreto armado” Fondo editorial ICG.
Lima – Perú.
 - Ing. Ruben Terán A. 1998
“Diseño y construcción de defensas ribereñas” Escuela superior de administración de aguas “Charles Sutton”.
 - Jesús Villaseñor Contreras. 1978
“Proyectos de obras hidráulicas” Departamento de enseñanza investigación y servicio en irrigación. Universidad Autónoma Chapingo – México.
 - Juan P. Martin Vide.
“Ingeniería de Ríos” Ediciones UPC, S.L. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
 - Manuel Fuevara Anzules. 2008
“Muros de contención”
Guayaquil – Ecuador.

- Máximo Villón Béjar. 2007
“Hidráulica de canales” Editorial tecnológica de Costa Rica.
- Sviatoslav Krochin. 2010
“Diseño hidráulico” Tercera edición, Universidad Técnica Particular de Loja.
- Teodoro E. Harmsen. 2002
“Diseño de Estructuras de concreto armado” Tercera edición, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Programación:

- Cristian Sánchez Flores. 2011
“Visual Basic 2010” 1ra edición, Empresa editora Macro E.I.R.L.
- Cristian Sánchez Flores. 2011
“Visual Studio 2010” 1ra edición, Empresa editora Macro E.I.R.L.
- Ing. Maribel Sabana Mendoza. 2009
“Visual Basic 2008” 1ra edición, Megabyte s.a.c Grupo editorial.
- Ing. Maribel Sabana Mendoza. 2008
“Visual Studio 2008” 1ra edición, Megabyte s.a.c Grupo editorial.
- Javier García de Jalón. 1999
“Aprenda Visual Basic 6.0” Escuela superior de ingenieros industriales de San Sebastián. Universidad de Navarra.
- Luis Joyanes Aguilar. 2008
“Fundamentos de programación” cuarta edición, Mc Graw Hill/ Interamericana de España.
- Lic. Manuel A. Torres Remon. 2013
“Fundamentos de programación con Visual Basic 2012” 1ra edición, Empresa editora Macro E.I.R.L.
- Ricardo Marcelo Villalobos. 2008
“Fundamentos de programación Visual Basic” 1ra edición, Empresa editora Macro E.I.R.L.

Tesis:

- Johnny Henry Rodríguez Torres. 2005
“Estudio a nivel definitivo de la bocatoma convencional Muyurina”
Tesis, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

- Aníbal Quispe Cuadros. 2005
“Programa Visual aplicado al diseño de edificaciones económicas de albañilería confinada” Tesis, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- Davila Intriago Alex Xavier. 2011
“Implementación de un software y equipos para su operatividad para el cálculo y diseño de transportadores de tornillo sinfin y cangilones para el laboratorio de dibujo mecánico asistido por computador de la carrera de Ingeniería Mecánica” Tesis, Universidad Técnica de Manabí.
- Lázaro Gallegos Álvarez. 2011
“Programa para el cálculo de tuberías y bombas centrífugas en procesos de refinación” Tesis, Universidad del Istmo.
- César Rodolfo Bocanegra Malca. 2005
“Desarrollo de un software para el diseño de zapatas rectangulares por flexión biaxial” Tesis, Universidad de Piura.

VII. ANEXOS

CODIFICACIÓN DEL SOFTWARE

El presente anexo corresponde al código fuente del módulo "Diseño de muros de encauzamiento", un total de 20 módulos desarrollados para el funcionamiento del Software DHEBB V2.0.0.

```
Dim Ca, Caw, Cp, Ea(13), BrA(13), BrB(13), MoA(13), MoB(13), Ss(1), LL, FVa, FVb, Mu As Single
Dim des(13) As String
Private Sub tsbCalcular_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles tsbCalcular.Click
    If IsNumeric(txtcc.Text) And IsNumeric(txtfi.Text) And IsNumeric(txtys.Text) And
IsNumeric(txtyc.Text) And IsNumeric(txtysat.Text) Then
        Else
            MsgBox("Ingresar adecuadamente los datos", MsgBoxStyle.Critical, "Error!!!!!!")
            Exit Sub
        End If
        If Cota_rio <= 10 Then
            MsgBox("Agregar cotas principales", MsgBoxStyle.Exclamation, "Mensaje de información")
            Exit Sub
        End If
        If chbf.Checked = True Then
            If IsNumeric(txtcf.Text) Then
                Else
                    MsgBox("Ingresar adecuadamente los datos", MsgBoxStyle.Critical, "Error!!!!!!")
                    Exit Sub
                End If
            End If
            If Peso_agua <= 0 Then
                MsgBox("Antes de realizar este análisis, deberá definir el contomo subterráneo de la presa",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Mensaje de información")
                Exit Sub
            End If
            Ca = (1 - Math.Sin(Math.PI * Val(txtfi.Text) / 180)) / (1 + Math.Sin(Math.PI * Val(txtfi.Text) / 180))
            Cp = Ca ^ (-1)
            If chbf.Checked = False Then
                txtcf.Text = Math.Round(Math.Tan(2 / 3 * Val(txtfi.Text) * Math.PI / 180), 2)
            End If
            If tsbCombo.SelectedIndex = 0 Then
                lblC1.Text = Cota_rio
                'Diseño de muro de gravedad
                If IsNumeric(txtB.Text) And IsNumeric(txtE.Text) And IsNumeric(txtC.Text) And
IsNumeric(txtD.Text) And IsNumeric(txtt1.Text) And IsNumeric(txtt2.Text) And IsNumeric(txtG.Text)
And IsNumeric(txtH.Text) And IsNumeric(txtF.Text) And IsNumeric(txtSC.Text) Then
                    If Val(txtF.Text) <= 0 Then
                        MsgBox("Incrementar la altura de relleno, esta debe estar por encima del nivel del fondo
del río", MsgBoxStyle.Exclamation, "Mensaje de información")
                        Exit Sub
                    End If
                    If Val(txtF.Text) > (Val(txtE.Text) + Val(txtB.Text) + 0.00001) Then
                        MsgBox("El relleno se encuentra por encima de la cresta del muro, disminuir valor F",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Mensaje de información")
                        Exit Sub
                    End If
                    If Val(txtt1.Text) >= Val(txtt2.Text) Then
                        MsgBox("Valor de t1>=t2, se recomienda que t1<t2", MsgBoxStyle.Exclamation,
"Mensaje de información")
                        Exit Sub
                    End If
                    dgvActA.Rows.Clear()
                    dgvResA.Rows.Clear()
                    dgvActB.Rows.Clear()
                End If
            End If
        End If
    End Sub
```

```

dgvResB.Rows.Clear()
lboxA.Items.Clear()
lboxB.Items.Clear()
Ea(0) = 1 / 2 * Ca * Val(txtys.Text) * (Val(txtF.Text) + Val(txtD.Text) + Val(txtC.Text)) ^ 2
Ea(1) = Ca * Val(txtSC.Text) * (Val(txtF.Text) + Val(txtD.Text) + Val(txtC.Text))
LL = Val(txtD.Text) + 2 * Val(txtC.Text) + (2 * Val(txtG.Text) + Val(txtH.Text) +
Val(txtt2.Text)) / 3
Ss(0) = Peso_agua * (Val(txtE.Text) + Val(txtD.Text) + Val(txtC.Text) - (Val(txtD.Text) +
Val(txtG.Text) / 3 + Val(txtC.Text)) * Val(txtE.Text) / LL)
Ss(1) = Peso_agua * (Val(txtE.Text) + Val(txtD.Text) + Val(txtC.Text) - (Val(txtD.Text) +
Val(txtC.Text) + (2 * Val(txtG.Text) + Val(txtH.Text) + Val(txtt2.Text)) / 3) * Val(txtE.Text) / LL)
Ea(2) = 1 / 2 * (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) * (Ss(0) - Ss(1))
Ea(3) = (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) * Ss(1)
BrA(0) = (Val(txtF.Text) + Val(txtD.Text) + Val(txtC.Text)) / 3
BrA(1) = 3 * BrA(0) / 2
BrA(2) = (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) / 3
BrA(3) = 3 * BrA(2) / 2
For xx As Integer = 0 To 3
    MoA(xx) = Ea(xx) * BrA(xx)
    dgvActA.Rows.Add(des(xx), Math.Round(Ea(xx), 2), Math.Round(BrA(xx), 3),
Math.Round(MoA(xx), 2))
    If xx = 3 Then
        dgvActA.Rows.Add("=====", "=====", "ΣMa", Math.Round(MoA(0) +
MoA(1) + MoA(2) + MoA(3), 2))
    End If
Next
2
Ea(4) = 1 / 2 * (Val(txtysat.Text) - Peso_agua) * Ca ^ -1 * (Val(txtD.Text) + Val(txtC.Text)) ^
2
Ea(5) = 1 / 2 * Peso_agua * (Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text)) ^ 2
Ea(6) = Val(txtSC.Text) * (Val(txtH.Text) + (Val(txtD.Text) + Val(txtF.Text)) * (Val(txtt2.Text)
- Val(txtt1.Text)) / (Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text) + Val(txtB.Text)))
Ea(7) = (Val(txtG.Text) + Val(txtH.Text) + Val(txtt2.Text)) * Val(txtC.Text) * Val(txtyc.Text)
Ea(8) = (Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text) + Val(txtB.Text)) * Val(txtt1.Text) * Val(txtyc.Text)
Ea(9) = 1 / 2 * (Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text) + Val(txtB.Text)) * (Val(txtt2.Text) -
Val(txtt1.Text)) * Val(txtyc.Text)
Ea(10) = 1 / 2 * ((Val(txtD.Text) + Val(txtF.Text)) * (Val(txtt2.Text) - Val(txtt1.Text)) /
(Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text) + Val(txtB.Text))) * (Val(txtD.Text) + Val(txtF.Text)) * Val(txtys.Text)
Ea(11) = Val(txtH.Text) * (Val(txtD.Text) + Val(txtF.Text)) * Val(txtys.Text)
Ea(12) = Val(txtG.Text) * Val(txtD.Text) * Val(txtysat.Text)
Ea(13) = Val(txtG.Text) * Val(txtE.Text) * Peso_agua
BrA(4) = (Val(txtD.Text) + Val(txtC.Text)) / 3
BrA(5) = Val(txtC.Text) + (Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text)) / 3
BrA(6) = Val(txtG.Text) + Val(txtH.Text) + Val(txtt2.Text) - (Val(txtH.Text) + (Val(txtD.Text)
+ Val(txtF.Text)) * (Val(txtt2.Text) - Val(txtt1.Text)) / (Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text) + Val(txtB.Text)))
/ 2
BrA(7) = (Val(txtG.Text) + Val(txtH.Text) + Val(txtt2.Text)) / 2
BrA(8) = Val(txtG.Text) + Val(txtt1.Text) / 2
BrA(9) = Val(txtG.Text) + Val(txtt1.Text) + (Val(txtt2.Text) - Val(txtt1.Text)) / 3
BrA(10) = Val(txtG.Text) + Val(txtH.Text) + Val(txtt2.Text) - Val(txtH.Text) - (Val(txtD.Text)
+ Val(txtF.Text)) * (Val(txtt2.Text) - Val(txtt1.Text)) / (3 * (Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text) +
Val(txtB.Text)))
BrA(11) = Val(txtG.Text) + Val(txtH.Text) + Val(txtt2.Text) - Val(txtH.Text) / 2
BrA(12) = Val(txtG.Text) / 2
BrA(13) = Val(txtG.Text) / 2
For xx As Integer = 4 To 13
    MoA(xx) = Ea(xx) * BrA(xx)
    dgvResA.Rows.Add(des(xx), Math.Round(Ea(xx), 2), Math.Round(BrA(xx), 3),
Math.Round(MoA(xx), 2))
    If xx = 13 Then
        dgvResA.Rows.Add("=====", "=====", "ΣMr", Math.Round(MoA(4) +
MoA(5) + MoA(6) + MoA(7) + MoA(8) + MoA(9) + MoA(10) + MoA(11) + MoA(12) + MoA(13), 2))
    End If
Next
FVa = (Ea(6) + Ea(7) + Ea(8) + Ea(9) + Ea(10) + Ea(11) + Ea(12) + Ea(13) - Ea(2) - Ea(3))

```

```

txtFSVa.Text = Math.Round((MoA(4) + MoA(5) + MoA(6) + MoA(7) + MoA(8) + MoA(9) +
MoA(10) + MoA(11) + MoA(12) + MoA(13)) / (MoA(0) + MoA(1) + MoA(2) + MoA(3)), 2)
txtFSDa.Text = Math.Round(Math.Abs(Val(txtcf.Text) * FVa / (Ea(5) + Ea(4) - Ea(0) -
Ea(1))), 2)
txtaA.Text = Math.Round(((MoA(4) + MoA(5) + MoA(6) + MoA(7) + MoA(8) + MoA(9) +
MoA(10) + MoA(11) + MoA(12) + MoA(13)) - (MoA(0) + MoA(1) + MoA(2) + MoA(3))) / FVa, 3)
If Val(txtaA.Text) < (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) / 3 Then
    txtq1a.Text = Math.Round(2 * FVa / (30000 * Val(txtaA.Text)), 2)
    txtq2a.Text = "=="
    lbxA.Items.Add("Error!!!!!!, resultante fuera del tercio medio (a<B/3)")
ElseIf Val(txtaA.Text) > 2 * (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) / 3 Then
    txtq2a.Text = Math.Round(2 * FVa / (30000 * (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) +
Val(txtH.Text) - Val(txtaA.Text))), 2)
    txtq1a.Text = "=="
    lbxA.Items.Add("Error!!!!!!, resultante fuera del tercio medio (a<B/3)")
Else
    txtq1a.Text = Math.Round(FVa * (4 * (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) -
6 * Val(txtaA.Text)) / ((Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) ^ 2 * 10000), 2)
    txtq2a.Text = Math.Round(FVa * (6 * Val(txtaA.Text) - 2 * (Val(txtG.Text) +
Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text))) / ((Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) ^ 2 * 10000), 2)
    lbxA.Items.Add("Resultante dentro del tercio medio (a>B/3) OK")
End If
If Val(txtFSVa.Text) < 2 Then
    lbxA.Items.Add("Cuidado!!!!!!, falla por vuelco")
Else
    lbxA.Items.Add("Volteo OK")
End If
If Val(txtFSDa.Text) < 1.5 Then
    lbxA.Items.Add("Cuidado!!!!!!, falla por deslizamiento")
Else
    lbxA.Items.Add("Deslizamiento OK")
End If
If Val(txtq1a.Text) > Val(txtcc.Text) Or Val(txtq2a.Text) > Val(txtcc.Text) Then
    lbxA.Items.Add("Cuidado!!!!!!, falla por capacidad de carga")
Else
    lbxA.Items.Add("Capacidad de carga OK")
End If
'pivote en B
BrB(0) = BrA(0)
BrB(1) = BrA(1)
BrB(2) = 2 * (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) / 3
BrB(3) = 3 * BrB(2) / 4
BrB(4) = BrA(4)
BrB(5) = BrA(5)
BrB(6) = (Val(txtH.Text) + (Val(txtD.Text) + Val(txtF.Text)) * (Val(txtt2.Text) -
Val(txtt1.Text))) / (Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text) + Val(txtB.Text)) / 2
BrB(7) = (Val(txtG.Text) + Val(txtH.Text) + Val(txtt2.Text)) / 2
BrB(8) = Val(txtH.Text) + Val(txtt2.Text) - Val(txtt1.Text) / 2
BrB(9) = Val(txtH.Text) + 2 * (Val(txtt2.Text) - Val(txtt1.Text)) / 3
BrB(10) = Val(txtH.Text) + (Val(txtD.Text) + Val(txtF.Text)) * (Val(txtt2.Text) -
Val(txtt1.Text)) / (3 * (Val(txtD.Text) + Val(txtE.Text) + Val(txtB.Text)))
BrB(11) = Val(txtH.Text) / 2
BrB(12) = Val(txtH.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtG.Text) / 2
BrB(13) = BrB(12)
For xx As Integer = 2 To 5
    MoB(xx) = Ea(xx) * BrB(xx)
    dgvActB.Rows.Add(des(xx), Math.Round(Ea(xx), 2), Math.Round(BrB(xx), 3),
Math.Round(MoB(xx), 2))
    If xx = 5 Then
        dgvActB.Rows.Add("=====", "=====", "ΣMa", Math.Round(MoB(2) +
MoB(3) + MoB(4) + MoB(5), 2))
    End If
Next
MoB(0) = Ea(0) * BrB(0)

```

```

        dgvResB.Rows.Add(des(0), Math.Round(Ea(0), 2), Math.Round(BrB(0), 3),
Math.Round(MoB(0), 2))
        MoB(1) = Ea(1) * BrB(1)
        dgvResB.Rows.Add(des(1), Math.Round(Ea(1), 2), Math.Round(BrB(1), 3),
Math.Round(MoB(1), 2))
        For xx As Integer = 6 To 13
            MoB(xx) = Ea(xx) * BrB(xx)
            dgvResB.Rows.Add(des(xx), Math.Round(Ea(xx), 2), Math.Round(BrB(xx), 3),
Math.Round(MoB(xx), 2))
            If xx = 13 Then
                dgvResB.Rows.Add("=====", "=====", "ΣMr", Math.Round(MoB(0) +
MoB(1) + MoB(6) + MoB(7) + MoB(8) + MoB(9) + MoB(10) + MoB(11) + MoB(12) + MoB(13), 2))
            End If
            Next
            FVb = (Ea(6) + Ea(7) + Ea(8) + Ea(9) + Ea(10) + Ea(11) + Ea(12) + Ea(13) - Ea(2) - Ea(3))
            txtFSVb.Text = Math.Round((MoB(0) + MoB(1) + MoB(6) + MoB(7) + MoB(8) + MoB(9) +
MoB(10) + MoB(11) + MoB(12) + MoB(13)) / (MoB(2) + MoB(3) + MoB(4) + MoB(5)), 2)
            txtFSDb.Text = Math.Round(Math.Abs(Val(txtcf.Text) * FVb / (Ea(5) + Ea(4) - Ea(0) -
Ea(1))), 2)
            txtaB.Text = Math.Round(((MoB(0) + MoB(1) + MoB(6) + MoB(7) + MoB(8) + MoB(9) +
MoB(10) + MoB(11) + MoB(12) + MoB(13)) - (MoB(2) + MoB(3) + MoB(4) + MoB(5))) / FVb, 3)
            If Val(txtaB.Text) < (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) / 3 Then
                txtq2b.Text = Math.Round(2 * FVb / (30000 * Val(txtaB.Text)), 2)
                txtq1b.Text = ""
                lxb.Items.Add("Error!!!!, resultante fuera del tercio medio (a<B/3)")
            ElseIf Val(txtaB.Text) > 2 * (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) / 3 Then
                txtq1b.Text = Math.Round(2 * FVb / (30000 * (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) +
Val(txtH.Text) - Val(txtaB.Text))), 2)
                txtq2b.Text = ""
                lxb.Items.Add("Error!!!!, resultante fuera del tercio medio (a<B/3)")
            Else
                txtq2b.Text = Math.Round(FVb * (4 * (Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) -
6 * Val(txtaB.Text)) / ((Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) ^ 2 * 10000), 2)
                txtq1b.Text = Math.Round(FVb * (6 * Val(txtaB.Text) - 2 * (Val(txtG.Text) +
Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text))) / ((Val(txtG.Text) + Val(txtt2.Text) + Val(txtH.Text)) ^ 2 * 10000), 2)
                lxb.Items.Add("Resultante dentro del tercio medio (a>B/3) OK")
            End If
            If Val(txtFSVb.Text) < 2 Then
                lxb.Items.Add("Cuidado!!!!, falla por vuelco")
            Else
                lxb.Items.Add("Volteo OK")
            End If
            If Val(txtFSDb.Text) < 1.5 Then
                lxb.Items.Add("Cuidado!!!!, falla por deslizamiento")
            Else
                lxb.Items.Add("Deslizamiento OK")
            End If
            If Val(txtq1b.Text) > Val(txtcc.Text) Or Val(txtq2b.Text) > Val(txtcc.Text) Then
                lxb.Items.Add("Cuidado!!!!, falla por capacidad de carga")
            Else
                lxb.Items.Add("Capacidad de carga OK")
            End If
        Else
            MsgBox("Ingresar adecuadamente los datos", MsgBoxStyle.Critical, "Error!!!!")
            Exit Sub
        End If
    End If
    Else
        lblC1v.Text = Cota rio
        'Diseño de muro en voladizo
        If IsNumeric(txtBv.Text) And IsNumeric(txtEv.Text) And IsNumeric(txtCv.Text) And
IsNumeric(txtDv.Text) And IsNumeric(txtt1v.Text) And IsNumeric(txtt2v.Text) And
IsNumeric(txtGv.Text) And IsNumeric(txtHv.Text) And IsNumeric(txtFv.Text) And
IsNumeric(txtSCv.Text) And IsNumeric(txtRe.Text) And IsNumeric(txtRezapa.Text) Then
            If Val(txtFv.Text) <= 0 Then

```

```

MsgBox("Incrementar la altura de relleno, esta debe estar por encima del nivel del fondo
del río", MsgBoxStyle.Exclamation, "Mensaje de información")
Exit Sub
End If
If Val(txtFv.Text) > (Val(txtEv.Text) + Val(txtBv.Text) + 0.00001) Then
MsgBox("El relleno se encuentra por encima de la cresta del muro, disminuir valor F",
MsgBoxStyle.Exclamation, "Mensaje de información")
Exit Sub
End If
If Val(txtt1v.Text) >= Val(txtt2v.Text) Then
MsgBox("Valor de t1>=t2, se recomienda que t1<t2", MsgBoxStyle.Exclamation,
"Mensaje de información")
Exit Sub
End If
'Análisis de estabilidad
dgvActAv.Rows.Clear()
dgvResAv.Rows.Clear()
dgvActBv.Rows.Clear()
dgvResBv.Rows.Clear()
lboxAv.Items.Clear()
lboxBv.Items.Clear()
lboxCorte.Items.Clear()
Dim Base As Single
Base = Val(txtGv.Text) + Val(txtt2v.Text) + Val(txtHv.Text)
Ea(0) = 1 / 2 * Ca * Val(txtys.Text) * (Val(txtFv.Text) + Val(txtDv.Text) + Val(txtCv.Text)) ^ 2
Ea(1) = Ca * Val(txtSCv.Text) * (Val(txtFv.Text) + Val(txtDv.Text) + Val(txtCv.Text))
LL = Val(txtDv.Text) + 2 * Val(txtCv.Text) + (2 * Val(txtGv.Text) + Val(txtHv.Text) +
Val(txtt2v.Text)) / 3
Ss(0) = Peso_agua * (Val(txtEv.Text) + Val(txtDv.Text) + Val(txtCv.Text) - (Val(txtDv.Text)
+ Val(txtGv.Text) / 3 + Val(txtCv.Text)) * Val(txtEv.Text) / LL)
Ss(1) = Peso_agua * (Val(txtEv.Text) + Val(txtDv.Text) + Val(txtCv.Text) - (Val(txtDv.Text)
+ Val(txtCv.Text) + (2 * Val(txtGv.Text) + Val(txtHv.Text) + Val(txtt2v.Text)) / 3) * Val(txtEv.Text) / LL)
Ea(2) = 1 / 2 * (Base) * (Ss(0) - Ss(1))
Ea(3) = (Base) * Ss(1)
BrA(0) = (Val(txtFv.Text) + Val(txtDv.Text) + Val(txtCv.Text)) / 3
BrA(1) = 3 * BrA(0) / 2
BrA(2) = Base / 3
BrA(3) = Base / 2
For xx As Integer = 0 To 3
MoA(xx) = Ea(xx) * BrA(xx)
dgvActAv.Rows.Add(des(xx), Math.Round(Ea(xx), 2), Math.Round(BrA(xx), 3),
Math.Round(MoA(xx), 2))
If xx = 3 Then
dgvActAv.Rows.Add("=====", "=====", "ΣMa", Math.Round(MoA(0) +
MoA(1) + MoA(2) + MoA(3), 2))
End If
Next
Ea(4) = 1 / 2 * (Val(txtysat.Text) - Peso_agua) * Ca ^ -1 * (Val(txtDv.Text) +
Val(txtCv.Text)) ^ 2
Ea(5) = 1 / 2 * Peso_agua * (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text)) ^ 2
Ea(6) = Val(txtSCv.Text) * (Val(txtHv.Text) + (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) *
(Val(txtt2v.Text) - Val(txtt1v.Text)) / (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text) + Val(txtBv.Text)))
Ea(7) = Base * Val(txtCv.Text) * Val(txtyc.Text)
Ea(8) = (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text) + Val(txtBv.Text)) * Val(txtt1v.Text) *
Val(txtyc.Text)
Ea(9) = 1 / 2 * (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text) + Val(txtBv.Text)) * (Val(txtt2v.Text) -
Val(txtt1v.Text)) * Val(txtyc.Text)
Ea(10) = 1 / 2 * ((Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) * (Val(txtt2v.Text) - Val(txtt1v.Text)) /
(Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text) + Val(txtBv.Text))) * (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) *
Val(txtys.Text)
Ea(11) = Val(txtHv.Text) * (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) * Val(txtys.Text)
Ea(12) = Val(txtGv.Text) * Val(txtDv.Text) * Val(txtysat.Text)
Ea(13) = Val(txtGv.Text) * Val(txtEv.Text) * Peso_agua
BrA(4) = (Val(txtDv.Text) + Val(txtCv.Text)) / 3

```

```

BrA(5) = Val(txtCv.Text) + (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text)) / 3
BrA(6) = Base - (Val(txtHv.Text) + (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) * (Val(txtt2v.Text) -
Val(txtt1v.Text)) / (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text) + Val(txtBv.Text))) / 2
BrA(7) = Base / 2
BrA(8) = Val(txtGv.Text) + Val(txtt1v.Text) / 2
BrA(9) = Val(txtGv.Text) + Val(txtt1v.Text) + (Val(txtt2v.Text) - Val(txtt1v.Text)) / 3
BrA(10) = Base - Val(txtHv.Text) - (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) * (Val(txtt2v.Text) -
Val(txtt1v.Text)) / (3 * (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text) + Val(txtBv.Text)))
BrA(11) = Base - Val(txtHv.Text) / 2
BrA(12) = Val(txtGv.Text) / 2
BrA(13) = Val(txtGv.Text) / 2
For xx As Integer = 4 To 13
    MoA(xx) = Ea(xx) * BrA(xx)
    dgvResAv.Rows.Add(des(xx), Math.Round(Ea(xx), 2), Math.Round(BrA(xx), 3),
Math.Round(MoA(xx), 2))
    If xx = 13 Then
        dgvResAv.Rows.Add("=====", "=====", "ΣMr", Math.Round(MoA(4) +
MoA(5) + MoA(6) + MoA(7) + MoA(8) + MoA(9) + MoA(10) + MoA(11) + MoA(12) + MoA(13), 2))
    End If
Next
FVa = (Ea(6) + Ea(7) + Ea(8) + Ea(9) + Ea(10) + Ea(11) + Ea(12) + Ea(13) - Ea(2) - Ea(3))
txtFSVav.Text = Math.Round((MoA(4) + MoA(5) + MoA(6) + MoA(7) + MoA(8) + MoA(9) +
MoA(10) + MoA(11) + MoA(12) + MoA(13)) / (MoA(0) + MoA(1) + MoA(2) + MoA(3)), 2)
txtFSDav.Text = Math.Round(Math.Abs(Val(txtcf.Text) * FVa / (Ea(5) + Ea(4) - Ea(0) -
Ea(1))), 2)
txtaAv.Text = Math.Round(((MoA(4) + MoA(5) + MoA(6) + MoA(7) + MoA(8) + MoA(9) +
MoA(10) + MoA(11) + MoA(12) + MoA(13)) - (MoA(0) + MoA(1) + MoA(2) + MoA(3))) / FVa, 3)
If Val(txtaAv.Text) < Base / 3 Then
    txtq1av.Text = Math.Round(2 * FVa / (30000 * Val(txtaAv.Text)), 2)
    txtq2av.Text = ""
    lbxAv.Items.Add("Error!!!!, resultante fuera del tercio medio (a<B/3)")
Elseif Val(txtaAv.Text) > 2 * Base / 3 Then
    txtq2av.Text = Math.Round(2 * FVa / (30000 * (Base - Val(txtaAv.Text))), 2)
    txtq1av.Text = ""
    lbxAv.Items.Add("Error!!!!, resultante fuera del tercio medio (a>B/3)")
Else
    txtq1av.Text = Math.Round(FVa * (4 * Base - 6 * Val(txtaAv.Text)) / (Base ^ 2 * 10000),
2)
    txtq2av.Text = Math.Round(FVa * (6 * Val(txtaAv.Text) - 2 * Base) / (Base ^ 2 * 10000),
2)
    lbxAv.Items.Add("Resultante dentro del tercio medio (a>B/3) OK")
End If
If Val(txtFSVav.Text) < 2 Then
    lbxAv.Items.Add("Cuidado!!!!, falla por vuelco")
Else
    lbxAv.Items.Add("Volteo OK")
End If
If Val(txtFSDav.Text) < 1.5 Then
    lbxAv.Items.Add("Cuidado!!!!, falla por deslizamiento")
Else
    lbxAv.Items.Add("Deslizamiento OK")
End If
If Val(txtq1av.Text) > Val(txtcc.Text) Or Val(txtq2av.Text) > Val(txtcc.Text) Then
    lbxAv.Items.Add("Cuidado!!!!, falla por capacidad de carga")
Else
    lbxAv.Items.Add("Capacidad de carga OK")
End If
'pivote en B
BrB(0) = BrA(0)
BrB(1) = BrA(1)
BrB(2) = 2 * Base / 3
BrB(3) = Base / 2
BrB(4) = BrA(4)
BrB(5) = BrA(5)

```

```

BrB(6) = (Val(txtHv.Text) + (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) * (Val(txtt2v.Text) -
Val(txtt1v.Text)) / (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text) + Val(txtBv.Text))) / 2
BrB(7) = Base / 2
BrB(8) = Val(txtHv.Text) + Val(txtt2v.Text) - Val(txtt1v.Text) / 2
BrB(9) = Val(txtHv.Text) + 2 * (Val(txtt2v.Text) - Val(txtt1v.Text)) / 3
BrB(10) = Val(txtHv.Text) + (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) * (Val(txtt2v.Text) -
Val(txtt1v.Text)) / (3 * (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text) + Val(txtBv.Text)))
BrB(11) = Val(txtHv.Text) / 2
BrB(12) = Val(txtHv.Text) + Val(txtt2v.Text) + Val(txtGv.Text) / 2
BrB(13) = BrB(12)
For xx As Integer = 2 To 5
    MoB(xx) = Ea(xx) * BrB(xx)
    dgvActBv.Rows.Add(des(xx), Math.Round(Ea(xx), 2), Math.Round(BrB(xx), 3),
Math.Round(MoB(xx), 2))
    If xx = 5 Then
        dgvActBv.Rows.Add("=====", "=====", "ΣMa", Math.Round(MoB(2) +
MoB(3) + MoB(4) + MoB(5), 2))
    End If
Next
MoB(0) = Ea(0) * BrB(0)
dgvResBv.Rows.Add(des(0), Math.Round(Ea(0), 2), Math.Round(BrB(0), 3),
Math.Round(MoB(0), 2))
MoB(1) = Ea(1) * BrB(1)
dgvResBv.Rows.Add(des(1), Math.Round(Ea(1), 2), Math.Round(BrB(1), 3),
Math.Round(MoB(1), 2))
For xx As Integer = 6 To 13
    MoB(xx) = Ea(xx) * BrB(xx)
    dgvResBv.Rows.Add(des(xx), Math.Round(Ea(xx), 2), Math.Round(BrB(xx), 3),
Math.Round(MoB(xx), 2))
    If xx = 13 Then
        dgvResBv.Rows.Add("=====", "=====", "ΣMr", Math.Round(MoB(0) +
MoB(1) + MoB(6) + MoB(7) + MoB(8) + MoB(9) + MoB(10) + MoB(11) + MoB(12) + MoB(13), 2))
    End If
Next
FVb = (Ea(6) + Ea(7) + Ea(8) + Ea(9) + Ea(10) + Ea(11) + Ea(12) + Ea(13) - Ea(2) - Ea(3))
txtFSVbv.Text = Math.Round((MoB(0) + MoB(1) + MoB(6) + MoB(7) + MoB(8) + MoB(9) +
MoB(10) + MoB(11) + MoB(12) + MoB(13)) / (MoB(2) + MoB(3) + MoB(4) + MoB(5)), 2)
txtFSDbv.Text = Math.Round(Math.Abs(Val(txtcf.Text) * FVb / (Ea(5) + Ea(4) - Ea(0) -
Ea(1))), 2)
txtaBv.Text = Math.Round(((MoB(0) + MoB(1) + MoB(6) + MoB(7) + MoB(8) + MoB(9) +
MoB(10) + MoB(11) + MoB(12) + MoB(13)) - (MoB(2) + MoB(3) + MoB(4) + MoB(5))) / FVb, 3)
If Val(txtaBv.Text) < Base / 3 Then
    txtq2Bv.Text = Math.Round(2 * FVb / (30000 * Val(txtaBv.Text)), 2)
    txtq1Bv.Text = ""
    lbxBv.Items.Add("Error!!!!, resultante fuera del tercio medio (a<B/3)")
Elseif Val(txtaBv.Text) > 2 * Base / 3 Then
    txtq1Bv.Text = Math.Round(2 * FVb / (30000 * (Base - Val(txtaBv.Text))), 2)
    txtq2Bv.Text = ""
    lbxBv.Items.Add("Error!!!!, resultante fuera del tercio medio (a<B/3)")
Else
    txtq2Bv.Text = Math.Round(FVb * (4 * Base - 6 * Val(txtaBv.Text)) / (Base ^ 2 * 10000),
2)
    txtq1Bv.Text = Math.Round(FVb * (6 * Val(txtaBv.Text) - 2 * Base) / (Base ^ 2 * 10000),
2)
    lbxBv.Items.Add("Resultante dentro del tercio medio (a>B/3) OK")
End If
If Val(txtFSVbv.Text) < 2 Then
    lbxBv.Items.Add("Cuidado!!!!, falla por vuelco")
Else
    lbxBv.Items.Add("Volteo OK")
End If
If Val(txtFSDbv.Text) < 1.5 Then
    lbxBv.Items.Add("Cuidado!!!!, falla por deslizamiento")
Else

```

```

    lbxBv.Items.Add("Deslizamiento OK")
End If
If Val(txtq1Bv.Text) > Val(txtcc.Text) Or Val(txtq2Bv.Text) > Val(txtcc.Text) Then
    lbxBv.Items.Add("Cuidado!!!!!!", falla por capacidad de carga")
Else
    lbxBv.Items.Add("Capacidad de carga OK")
End If
'Diseño de la pantalla frontal
Dim Vu As Single
txtMu.Text = Math.Round(1.6 * (Ca * Val(txtys.Text) * (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) ^ 3
/ 6 + Ca * Val(txtSCv.Text) * (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) ^ 2 / 2), 2)
Mu = Math.Round(1.6 * ((Val(txtysat.Text) - Peso_agua) * Cp * Val(txtDv.Text) ^ 3 / 6) +
1.2 * (Peso_agua * (Val(txtDv.Text) + Val(txtEv.Text)) ^ 3 / 6), 2)
txtMu.Text = Math.Round(Math.Abs(Val(txtMu.Text) - Mu), 2)
Vu = Math.Abs(1.6 * Ca * (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) * (0.5 * Val(txtys.Text) *
(Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) + Val(txtSCv.Text)) - (0.6 * Peso_agua * (Val(txtDv.Text) +
Val(txtEv.Text)) ^ 2 + 0.8 * Cp * (Val(txtysat.Text) - Peso_agua) * Val(txtDv.Text) ^ 2))
Dim diaV As Single
If cbxAv.SelectedIndex = 0 Then
    diaV = 1.27
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 1 Then
    diaV = 1.588
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 2 Then
    diaV = 1.905
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 3 Then
    diaV = 2.222
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 4 Then
    diaV = 2.54
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 5 Then
    diaV = 2.865
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 6 Then
    diaV = 3.226
End If
Dim dd, fyv, fcv As Single
If cbxfy.SelectedIndex = 0 Then
    fyv = 2800
Elseif cbxfy.SelectedIndex = 1 Then
    fyv = 4200
Elseif cbxfy.SelectedIndex = 2 Then
    fyv = 5300
End If
If cbxfc.SelectedIndex = 0 Then
    fcv = 175
Elseif cbxfc.SelectedIndex = 1 Then
    fcv = 210
Elseif cbxfc.SelectedIndex = 2 Then
    fcv = 280
Elseif cbxfc.SelectedIndex = 3 Then
    fcv = 350
End If
dd = (Val(txtt2v.Text) - Val(txtRe.Text) / 100 - diaV / 200) * 100
Dim cua, cua2 As Single
cua = 0
cua2 = Val(txtMu.Text) / (0.9 * dd ^ 2 * fyv * (1 - 0.59 * cua * fyv / fcv))
Do While Math.Abs(cua2 - cua) > 0.0001
    cua = cua2
    cua2 = Val(txtMu.Text) / (0.9 * dd ^ 2 * fyv * (1 - 0.59 * cua * fyv / fcv))
Loop
txtAsv.Text = Math.Round(cua2 * 100 * dd, 2)
If cbxAv.SelectedIndex < 2 Then
    txtAsminv.Text = Math.Round(0.0012 * 10000 * Val(txtt2v.Text), 2)
Else
    txtAsminv.Text = Math.Round(0.0015 * 10000 * Val(txtt2v.Text), 2)
End If

```

```

Dim Asv As Single
If Val(txtAsv.Text) < Val(txtAsminv.Text) Then
    Asv = Val(txtAsminv.Text)
Else
    Asv = Val(txtAsv.Text)
End If
If cbxAh.SelectedIndex < 2 Then
    txtAsminhab.Text = Math.Round(0.002 * 10000 * Val(txtt2v.Text), 2)
    txtAsminhar.Text = Math.Round(0.002 * 10000 * (Val(txtt1v.Text) + Val(txtt2v.Text)) / 2,
2)
Else
    txtAsminhab.Text = Math.Round(0.0025 * 10000 * Val(txtt2v.Text), 2)
    txtAsminhar.Text = Math.Round(0.0025 * 10000 * (Val(txtt1v.Text) + Val(txtt2v.Text)) / 2,
2)
End If
Dim vertical, horizontal(3) As Single
If cbxAv.SelectedIndex = 0 Then
    vertical = Math.Round(100 * 1.29 / Asv, 0)
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 1 Then
    vertical = Math.Round(100 * 2 / Asv, 0)
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 2 Then
    vertical = Math.Round(100 * 2.84 / Asv, 0)
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 3 Then
    vertical = Math.Round(100 * 3.87 / Asv, 0)
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 4 Then
    vertical = Math.Round(100 * 5.1 / Asv, 0)
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 5 Then
    vertical = Math.Round(100 * 6.45 / Asv, 0)
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 6 Then
    vertical = Math.Round(100 * 8.19 / Asv, 0)
End If
If vertical > 45 Then
    vertical = 45
End If
If cbxAv.SelectedIndex = 0 Then
    lblAsv.Text = (cbxAv.SelectedItem.ToString & "@" & vertical & "cm")
    lblAsv2.Text = lblAsv.Text
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 1 Then
    lblAsv.Text = (cbxAv.SelectedItem.ToString & "@" & vertical & "cm")
    lblAsv2.Text = lblAsv.Text
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 2 Then
    lblAsv.Text = (cbxAv.SelectedItem.ToString & "@" & vertical & "cm")
    lblAsv2.Text = lblAsv.Text
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 3 Then
    lblAsv.Text = (cbxAv.SelectedItem.ToString & "@" & vertical & "cm")
    lblAsv2.Text = lblAsv.Text
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 4 Then
    lblAsv.Text = (cbxAv.SelectedItem.ToString & "@" & vertical & "cm")
    lblAsv2.Text = lblAsv.Text
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 5 Then
    lblAsv.Text = (cbxAv.SelectedItem.ToString & "@" & vertical & "cm")
    lblAsv2.Text = lblAsv.Text
Elseif cbxAv.SelectedIndex = 6 Then
    lblAsv.Text = (cbxAv.SelectedItem.ToString & "@" & vertical & "cm")
    lblAsv2.Text = lblAsv.Text
End If
If cbxAh.SelectedIndex = 0 Then
    horizontal(0) = Math.Round(100 * 1.29 * 3 / Val(txtAsminhar.Text), 0)
    horizontal(1) = Math.Round(100 * 1.29 * 3 / (2 * Val(txtAsminhar.Text)), 0)
    horizontal(2) = Math.Round(100 * 1.29 * 3 / Val(txtAsminhab.Text), 0)
    horizontal(3) = Math.Round(100 * 1.29 * 3 / (2 * Val(txtAsminhab.Text)), 0)
Elseif cbxAh.SelectedIndex = 1 Then
    horizontal(0) = Math.Round(100 * 2 * 3 / Val(txtAsminhar.Text), 0)
    horizontal(1) = Math.Round(100 * 2 * 3 / (2 * Val(txtAsminhar.Text)), 0)

```

```

horizontal(2) = Math.Round(100 * 2 * 3 / Val(txtAsminhab.Text), 0)
horizontal(3) = Math.Round(100 * 2 * 3 / (2 * Val(txtAsminhab.Text)), 0)
Elseif cbxAh.SelectedIndex = 2 Then
horizontal(0) = Math.Round(100 * 2.84 * 3 / Val(txtAsminhar.Text), 0)
horizontal(1) = Math.Round(100 * 2.84 * 3 / (2 * Val(txtAsminhar.Text)), 0)
horizontal(2) = Math.Round(100 * 2.84 * 3 / Val(txtAsminhab.Text), 0)
horizontal(3) = Math.Round(100 * 2.84 * 3 / (2 * Val(txtAsminhab.Text)), 0)
Elseif cbxAh.SelectedIndex = 3 Then
horizontal(0) = Math.Round(100 * 3.87 * 3 / Val(txtAsminhar.Text), 0)
horizontal(1) = Math.Round(100 * 3.87 * 3 / (2 * Val(txtAsminhar.Text)), 0)
horizontal(2) = Math.Round(100 * 3.87 * 3 / Val(txtAsminhab.Text), 0)
horizontal(3) = Math.Round(100 * 3.87 * 3 / (2 * Val(txtAsminhab.Text)), 0)
Elseif cbxAh.SelectedIndex = 4 Then
horizontal(0) = Math.Round(100 * 5.1 * 3 / Val(txtAsminhar.Text), 0)
horizontal(1) = Math.Round(100 * 5.1 * 3 / (2 * Val(txtAsminhar.Text)), 0)
horizontal(2) = Math.Round(100 * 5.1 * 3 / Val(txtAsminhab.Text), 0)
horizontal(3) = Math.Round(100 * 5.1 * 3 / (2 * Val(txtAsminhab.Text)), 0)

Elseif cbxAh.SelectedIndex = 5 Then
horizontal(0) = Math.Round(100 * 6.45 * 3 / Val(txtAsminhar.Text), 0)
horizontal(1) = Math.Round(100 * 6.45 * 3 / (2 * Val(txtAsminhar.Text)), 0)
horizontal(2) = Math.Round(100 * 6.45 * 3 / Val(txtAsminhab.Text), 0)
horizontal(3) = Math.Round(100 * 6.45 * 3 / (2 * Val(txtAsminhab.Text)), 0)
Elseif cbxAh.SelectedIndex = 6 Then
horizontal(0) = Math.Round(100 * 8.19 * 3 / Val(txtAsminhar.Text), 0)
horizontal(1) = Math.Round(100 * 8.19 * 3 / (2 * Val(txtAsminhar.Text)), 0)
horizontal(2) = Math.Round(100 * 8.19 * 3 / Val(txtAsminhab.Text), 0)
horizontal(3) = Math.Round(100 * 8.19 * 3 / (2 * Val(txtAsminhab.Text)), 0)
End If
If horizontal(0) > 45 Then
horizontal(0) = 45
End If
If horizontal(1) > 45 Then
horizontal(1) = 45
End If
If horizontal(2) > 45 Then
horizontal(2) = 45
End If
If horizontal(3) > 45 Then
horizontal(3) = 45
End If
If cbxAh.SelectedIndex = 0 Then
lblAsharex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(0) & "cm")
lblAsharin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(1) & "cm")
lblAshabex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(2) & "cm")
lblAshabin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(3) & "cm")
Elseif cbxAh.SelectedIndex = 1 Then
lblAsharex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(0) & "cm")
lblAsharin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(1) & "cm")
lblAshabex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(2) & "cm")
lblAshabin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(3) & "cm")
Elseif cbxAh.SelectedIndex = 2 Then
lblAsharex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(0) & "cm")
lblAsharin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(1) & "cm")
lblAshabex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(2) & "cm")
lblAshabin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(3) & "cm")
Elseif cbxAh.SelectedIndex = 3 Then
lblAsharex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(0) & "cm")
lblAsharin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(1) & "cm")
lblAshabex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(2) & "cm")
lblAshabin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(3) & "cm")
Elseif cbxAh.SelectedIndex = 4 Then
lblAsharex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(0) & "cm")
lblAsharin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(1) & "cm")

```

```

lblAshabex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(2) & "cm")
lblAshabin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(3) & "cm")
ElseIf cbxAh.SelectedIndex = 5 Then
    lblAsharex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(0) & "cm")
    lblAsharin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(1) & "cm")
    lblAshabex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(2) & "cm")
    lblAshabin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(3) & "cm")
ElseIf cbxAh.SelectedIndex = 6 Then
    lblAsharex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(0) & "cm")
    lblAsharin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(1) & "cm")
    lblAshabex.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(2) & "cm")
    lblAshabin.Text = (cbxAh.SelectedItem.ToString & "@" & horizontal(3) & "cm")
End If
Dim fVc As Single
fVc = 0.75 * 0.53 * (fcv) ^ 0.5 * 100 * dd
If fVc < Vu Then
    lbxCorte.Items.Add("Cuidado!!!!!!", corte en base de la pantalla Vc>Vu")
Else
    lbxCorte.Items.Add("Verificación de corte en base de la pantalla OK")
End If
'Diseño de la armadura de talon posterior
Dim Vuta, Vutp As Single
Dim Mqtp, Mptp, Mqta, Mpta As Single
If Val(txtaAv.Text) > Base / 3 And Val(txtaAv.Text) < Base / 2 Then
    Mqtp = Val(txtHv.Text) * (Val(txtq1av.Text) - Val(txtq2av.Text)) / Base
    Vutp = 1.6 * Val(txtHv.Text) * (0.5 * Mqtp + Val(txtq2av.Text))
    Mqtp = 0.8 * Val(txtHv.Text) ^ 2 * (Mqtp / 3 + Val(txtq2av.Text))
    Mqta = (Val(txtt2v.Text) + Val(txtHv.Text)) * (Val(txtq1av.Text) - Val(txtq2av.Text)) /
Base
    Vuta = 0.8 * Val(txtGv.Text) * (Mqta + Val(txtq1av.Text) + Val(txtq2av.Text))
    Mqta = 1.6 * Val(txtGv.Text) ^ 2 * ((Val(txtq2av.Text) + Mqta) / 2 + (Val(txtq1av.Text) -
Val(txtq2av.Text) - Mqta) / 3)
ElseIf Val(txtaAv.Text) > Base / 2 And Val(txtaAv.Text) < 2 * Base / 3 Then
    Mqtp = (Val(txtGv.Text) + Val(txtt2v.Text)) * (Val(txtq2av.Text) - Val(txtq1av.Text)) /
Base
    Vutp = 0.8 * Val(txtHv.Text) * (Mqtp + Val(txtq1av.Text) + Val(txtq2av.Text))
    Mqtp = 1.6 * Val(txtHv.Text) ^ 2 * ((Mqtp + Val(txtq1av.Text)) / 2 + (Val(txtq2av.Text) -
Val(txtq1av.Text) - Mqtp) / 3)
    Mqta = Val(txtGv.Text) * (Val(txtq2av.Text) - Val(txtq1av.Text)) / Base
    Vuta = 1.6 * Val(txtGv.Text) * (0.5 * Mqta + Val(txtq1av.Text))
    Mqta = 0.8 * Val(txtGv.Text) ^ 2 * (Mqta / 3 + Val(txtq1av.Text))
Else
    Mqtp = 0
    Vuta = 0
    Vutp = 0
End If
Mptp = Val(txtHv.Text) * (Ss(0) - Ss(1)) / Base
Vutp = Vutp + 1.2 * Val(txtHv.Text) * (0.5 * Mptp + Ss(1))
Mptp = 0.6 * Val(txtHv.Text) ^ 2 * (Mptp / 3 + Ss(1))
Mpta = (Val(txtt2v.Text) + Val(txtHv.Text)) * (Ss(0) - Ss(1)) / Base
Vuta = Vuta + 0.6 * Val(txtGv.Text) * (0.5 * Mpta + Ss(0) + Ss(1))
Mpta = 1.2 * Val(txtGv.Text) ^ 2 * ((Ss(1) + Mpta) / 2 + (Ss(0) - Ss(1) - Mpta) / 3)
txtMutp.Text = Math.Round(10000 * Mqtp + Mptp - Val(txtHv.Text) ^ 2 * (0.6 *
(Val(txtys.Text) * (Val(txtDv.Text) + Val(txtFv.Text)) + Val(txtyc.Text) * Val(txtCv.Text)) + 0.8 *
Val(txtSCv.Text)), 2)
Vutp = Math.Abs(Vutp - 1.2 * Val(txtHv.Text) * (Val(txtyc.Text) * Val(txtCv.Text) +
Val(txtys.Text) * (Val(txtFv.Text) + Val(txtDv.Text)))) - 1.6 * Val(txtHv.Text) * Val(txtSCv.Text))
Vuta = Math.Abs(Vuta - 1.2 * Val(txtGv.Text) * (Val(txtyc.Text) * Val(txtCv.Text) +
(Val(txtysat.Text) - Peso_agua) * Val(txtDv.Text) + Peso_agua * Val(txtEv.Text)))
'Diseño de la armadura de talon anterior
txtMuta.Text = Math.Round(10000 * Mqta + Mpta - 0.6 * Val(txtGv.Text) ^ 2 * (Peso_agua *
Val(txtEv.Text) + (Val(txtysat.Text) - Peso_agua) * Val(txtDv.Text) + Val(txtyc.Text) *
Val(txtCv.Text)), 2)
Dim chekTp, chekTa As Boolean

```

```

If Val(txtMutp.Text) < 0 Then
    chekTp = True
Else
    chekTp = False
End If
If Val(txtMuta.Text) < 0 Then
    chekTa = True
Else
    chekTa = False
End If
txtMuta.Text = Math.Abs(Val(txtMuta.Text))
txtMutp.Text = Math.Abs(Val(txtMutp.Text))
If cbxTa.SelectedIndex = 0 Then
    diaV = 1.27
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 1 Then
    diaV = 1.588
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 2 Then
    diaV = 1.905
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 3 Then
    diaV = 2.222
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 4 Then
    diaV = 2.54
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 5 Then
    diaV = 2.865
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 6 Then
    diaV = 3.226
End If
Dim ddtA As Single
ddtA = (Val(txtCv.Text) - Val(txtRezapa.Text) / 100 - diaV / 200) * 100
cua = 0
cua2 = Val(txtMuta.Text) / (0.9 * ddtA ^ 2 * fyv * (1 - 0.59 * cua * fyv / fcv))
Do While Math.Abs(cua2 - cua) > 0.0001
    cua = cua2
    cua2 = Val(txtMuta.Text) / (0.9 * ddtA ^ 2 * fyv * (1 - 0.59 * cua * fyv / fcv))
Loop
txtAsta.Text = Math.Round(cua2 * 100 * ddtA, 2)
txtAsminta.Text = Math.Round(0.0018 * 10000 * Val(txtCv.Text), 2)
If Val(txtAsta.Text) < Val(txtAsminta.Text) Then
    Asv = Val(txtAsminta.Text)
Else
    Asv = Val(txtAsta.Text)
End If
If cbxTa.SelectedIndex = 0 Then
    lblAstapo.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 1.29 / Asv,
0) & "cm")
    lblAstapomin.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 1.29 /
Val(txtAsminta.Text), 0) & "cm")
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 1 Then
    lblAstapo.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 2 / Asv, 0) &
"cm")
    lblAstapomin.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 2 /
Val(txtAsminta.Text), 0) & "cm")
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 2 Then
    lblAstapo.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 2.84 / Asv,
0) & "cm")
    lblAstapomin.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 2.84 /
Val(txtAsminta.Text), 0) & "cm")
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 3 Then
    lblAstapo.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 3.87 / Asv,
0) & "cm")
    lblAstapomin.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 3.87 /
Val(txtAsminta.Text), 0) & "cm")
Elseif cbxTa.SelectedIndex = 4 Then

```

```

        lblAstapo.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 5.1 / Asv, 0)
& "cm")
        lblAstapomin.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 5.1 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")
        Elseif cbxTa.SelectedIndex = 5 Then
            lblAstapo.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 6.45 / Asv,
0) & "cm")
            lblAstapomin.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 6.45 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")
            Elseif cbxTa.SelectedIndex = 6 Then
                lblAstapo.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 8.19 / Asv,
0) & "cm")
                lblAstapomin.Text = (cbxTa.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 8.19 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")
            End If
            If cbxTp.SelectedIndex = 0 Then
                diaV = 1.27
            Elseif cbxTp.SelectedIndex = 1 Then
                diaV = 1.588
            Elseif cbxTp.SelectedIndex = 2 Then
                diaV = 1.905
            Elseif cbxTp.SelectedIndex = 3 Then
                diaV = 2.222
            Elseif cbxTp.SelectedIndex = 4 Then
                diaV = 2.54
            Elseif cbxTp.SelectedIndex = 5 Then
                diaV = 2.865
            Elseif cbxTp.SelectedIndex = 6 Then
                diaV = 3.226
            End If
            ddtA = (Val(txtCv.Text) - Val(txtRezapa.Text) / 100 - diaV / 200) * 100
            cua = 0
            cua2 = Val(txtMutp.Text) / (0.9 * ddtA ^ 2 * fyv * (1 - 0.59 * cua * fyv / fcv))
            Do While Math.Abs(cua2 - cua) > 0.0001
                cua = cua2
                cua2 = Val(txtMutp.Text) / (0.9 * ddtA ^ 2 * fyv * (1 - 0.59 * cua * fyv / fcv))
            Loop
            txtAstp.Text = Math.Round(cua2 * 100 * ddtA, 2)
            txtAsmintp.Text = Math.Round(0.0018 * 10000 * Val(txtCv.Text), 2)
            If Val(txtAstp.Text) < Val(txtAsmintp.Text) Then
                Asv = Val(txtAsmintp.Text)
            Else
                Asv = Val(txtAstp.Text)
            End If
            If cbxTp.SelectedIndex = 0 Then
                lblAstpne.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 1.29 / Asv,
0) & "cm")
                lblAstpnemin.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 1.29 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")
                Elseif cbxTp.SelectedIndex = 1 Then
                    lblAstpne.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 2 / Asv, 0) &
"cm")
                    lblAstpnemin.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 2 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")
                Elseif cbxTp.SelectedIndex = 2 Then
                    lblAstpne.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 2.84 / Asv,
0) & "cm")
                    lblAstpnemin.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 2.84 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")
                Elseif cbxTp.SelectedIndex = 3 Then
                    lblAstpne.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 3.87 / Asv,
0) & "cm")
                    lblAstpnemin.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 3.87 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")

```

```

        ElseIf cbxTp.SelectedIndex = 4 Then
            lblAstpne.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 5.1 / Asv, 0)
& "cm")
            lblAstpnemin.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 5.1 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")
            ElseIf cbxTp.SelectedIndex = 5 Then
                lblAstpne.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 6.45 / Asv,
0) & "cm")
                lblAstpnemin.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 6.45 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")
                ElseIf cbxTp.SelectedIndex = 6 Then
                    lblAstpne.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 8.19 / Asv,
0) & "cm")
                    lblAstpnemin.Text = (cbxTp.SelectedItem.ToString & " @" & Math.Round(100 * 8.19 /
Val(txtAsmintp.Text), 0) & "cm")
                End If
                If chekTa = True And chekTp = False Then
                    Panel1.Visible = True
                    Panel2.Visible = False
                ElseIf chekTa = False And chekTp = True Then
                    Panel1.Visible = False
                    Panel2.Visible = True
                Else
                    Panel1.Visible = True
                    Panel2.Visible = True
                End If
                If chekTp = True Then
                    lblAstppo.Text = ""
                    lblAstppomin.Text = ""
                Else
                    lblAstppo.Text = lblAstpne.Text
                    lblAstppomin.Text = lblAstpnemin.Text
                    lblAstpne.Text = ""
                    lblAstpnemin.Text = ""
                End If
                If chekTa = True Then
                    lblAstane.Text = lblAstapo.Text
                    lblAstanemin.Text = lblAstapomin.Text
                    lblAstapo.Text = ""
                    lblAstapomin.Text = ""
                Else
                    lblAstane.Text = ""
                    lblAstanemin.Text = ""
                End If
                fivc = 0.75 * 0.53 * (fcv) ^ 0.5 * 100 * ddta
                If fivc < Vuta Then
                    lblCorte.Items.Add("Cuidado!!!!!!!, corte en cara del talón anterior Vc>Vu")
                Else
                    lblCorte.Items.Add("Verificación de corte en cara de talón anterior OK")
                End If
                If fivc < Vutp Then
                    lblCorte.Items.Add("Cuidado!!!!!!!, corte en cara del talón posterior Vc>Vu")
                Else
                    lblCorte.Items.Add("Verificación de corte en cara de talón posterior OK")
                End If
            Else
                MsgBox("Ingresar adecuadamente los datos", MsgBoxStyle.Critical, "Error!!!!!!")
            Exit Sub
        End If
        MsgBox("Proceso de cálculo realizado", MsgBoxStyle.Information)
    End Sub

```

ANEXOS
(Reporte del Diseño de la Bocatoma “El Carmen”)

DISEÑO DE BOCATOMA TIPO BARRAJE (CALCULOS PRELIMINARES)

===== DATOS GENERALES DEL PROYECTO =====

Nombre del proyecto: "MEJORAMIENTO Y AMPLIACION DE LA FRONTERA AGRICOLA MEDIANTE EL RIEGO TECNIFICADO EN LA MICROCUENCA ARMAHUAYCCO, DISTRITO DE EL CARMEN - PROVINCIA DE CHURCAMPА - DEPARTAMENTO DE HUANCVELICA"

Ubicación política:

Departam.: Huancavelica
Provincia: Churcampa
Distrito: El Carmen
Localidad: Vilcabamba

Ubicación geográfica:

Latitud:
Longitud:
Altitud: 2400 m.s.n.m.

===== CAUDALES DE DISEÑO =====

Caudal máximo instantáneo = 1.802 m³/s
Caudal medio anual = 0.125 m³/s
Caudal al 75% de persistencia = 0.110 m³/s
Caudal mínimo anual = 0.065 m³/s
Caudal de derivación (Qd) = 0.06 m³/s

===== COTAS PRINCIPALES =====

Cota delante de la ventana de captación (Co) = 3927 m.s.n.m.

===== DISEÑO DEL CANAL DE DERIVACION =====

==== Datos =====

Pendiente del fondo del canal (Sd) = 0.0068 m/m
Coeficiente de rugosidad (n) = 0.014
Talud (Z) = 0
Ancho de solera (Bd) = 0.3 m

==== Resultados =====

Tirante normal (Yd) = 0.1801 m
Área hidráulica (Ad) = 0.054 m²
Perímetro mojado (Pd) = 0.6602 m
Radio hidráulico (Rh) = 0.0818 m
Velocidad (Vd) = 1.1111 m/s
Espejo de agua (Td) = 0.3 m
Número de Froude (Fd) = 0.8361
Borde libre (BL) = 0.1 m

==== Dimensiones finales del canal ====

Ancho de solera (Bd) = 0.3 m
Talud (Z) = 0
Tirante normal (Yd) = 0.18 m
Borde libre (BL) = 0.12 m

===== DEFINICIÓN DEL ANCHO DE ENCAUZAMIENTO =====

==== Datos ====

Pendiente del río (Sn) = 0.06 m/m
Ancho de cauce natural (Bn) = 9 m

==== Datos (Método de Blench) ====

Factor de fondo (Fb) = 1.2
Factor de orilla (Fa) = 0.1

==== Datos (Método de Altunin) ====

Coefficiente de Altunin (A) = 0.90

==== Datos (Método de Simons y Henderson) ====

Valores de K1 = 2.9

==== Resultados (Método de Blench) ====

Ancho estable (B1) = 8.42 m

==== Resultados (Método de Altunin) ====

Ancho estable (B2) = 2.12 m

==== Resultados (Método de Pettit) ====

Ancho estable (B3) = 3.29 m

==== Resultados (Método de Simons y Henderson) ====

Ancho estable (B4) = 3.89 m

==== Dimensión final para diseño ====

Definido por el usuario
Ancho de encauzamiento (Br) = 6 m

===== DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DEL RIO =====

==== Datos ====

Material considerado = 0.028
Irregularidad en la sección recta = 0
Variaciones de la sección transversal del cauce = 0.002
Efecto relativo de obstrucciones = 0.005
Vegetación = 0.005
Cantidad de meandros = 1

==== Resultado final ====

Coefficiente de rugosidad del río (nr) = 0.04

===== CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL RÍO =====

==== Datos ====

Talud del cauce natural del río (Zn) = 0.5
Coefficiente de rugosidad del muro (nm) = 0.014

==== Resultados (Sección natural) ====

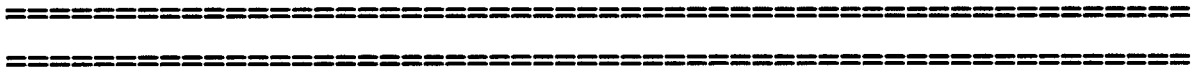
Tirante normal máximo (Ymax) = 0.129 m
Área hidráulica (Amax) = 1.169 m²
Velocidad del flujo (Vmax) = 1.541 m/s

Tirante normal mínimo (Ymin) = 0.018 m
Área hidráulica (Amin) = 0.162 m²
Velocidad del flujo (Vmin) = 0.401 m/s

==== Resultados (Sección encauzado) ====

Tirante normal máximo (Ymax) = 0.164 m
Área hidráulica (Amax) = 0.984 m²
Velocidad del flujo (Vmax) = 1.831 m/s

Tirante normal mínimo (Ymin) = 0.022 m
Área hidráulica (Amin) = 0.132 m²
Velocidad del flujo (Vmin) = 0.492 m/s



= DISEÑO DE BOCATOMA TIPO BARRAJE (DISEÑO HIDRAULICO) =

===== DATOS GENERALES DEL PROYECTO =====

Nombre del proyecto: "MEJORAMIENTO Y AMPLIACION DE LA FRONTERA AGRICOLA MEDIANTE EL RIEGO TECNIFICADO EN LA MICROCUENCA ARMAHUAYCCO, DISTRITO DE EL CARMEN - PROVINCIA DE CHURCAMPА - DEPARTAMENTO DE HUANCVELICA"

Ubicación política:

Departam.: Huancavelica
Provincia: Churcampa
Distrito: El Carmen
Localidad: Vilcabamba

Ubicación geográfica:

Latitud:
Longitud:
Altitud: 2400 m.s.n.m.

===== DISEÑO DE VENTANAS DE CAPTACION Y ZONA DE LIMPIA =====

==== Datos (Ventana de captación) ====

Coefficiente de descarga (Cb) = 1.5
Número de ventanas (Nb) = 2
Ancho neta de la ventana (L'b) = 0.4 m
Ancho de pilar de separación (b) = 0.2 m
Alfeizer de la ventana (pb) = 0.25 m
Carga de seguridad sobre ventana (hp) = 0.2 m

==== Datos (Rejillas) ====

Ángulo de inclinación de las rejillas (ω) = 90°
Ángulo de ingreso del flujo (α) = 0°
Diámetro de las rejillas (ϕ) = 3/8 pulg
Espaciamiento de las rejillas (e) = 5 cm

==== Datos (Zona de limpia) ====

Caudal de diseño (QL) = 0.125 m³/s
Número de compuertas (NL) = 1
Ancho de la compuerta (bL) = 0.3 m
Profundidad de la poza (tL) = 0.2 m
Coefficiente de rugosidad (nL) = 0.014
Coefficiente de material a eliminar (C) = 0.5
Diámetro de grano mayor (d) = 0.01 m

==== Datos (Barraje vertedor) ====

Coefficiente de descarga (Cp) = 2.10

==== Resultados (Barraje vertedor) ====

Altura del barraje vertedor (P) = 0.6 m
Longitud del barraje vertedor (Lp) = 5.45 m
Carga de agua sobre barraje (Ho) = 0.278 m
Cota de cresta (Cc) = 3927.6 m.s.n.m.

==== Resultados (Zona de limpia) ====

Ancho total (BL) = 0.55 m
Ancho efectivo (Be) = 0.3 m
Altura de la compuerta (hL) = 0.21 m
Coeficiente de descarga (CL) = 0.607
Pendiente del canal de limpia (SL) = 0.003 m/m
Tirante en canal de limpia (YL) = 0.456 m
Velocidad en canal de limpia (VL) = 0.148 m/s
Velocidad para inicio de arrastre (V'L) = 0.075 m/s

==== Resultados (Ventana de captación) ====

Altura de ventana (hb) = 0.15 m
Número de rejillas (Nr) = 7
Ancho correg. de la ventana (Lb) = 0.47 m

===== PERFIL DEL FLUJO VENTANA DE CAPTACIÓN - CANAL DE DERIVACIÓN =====

==== Datos (Ventana de captación) ====

Coeficiente de descarga (Cb) = 0.65

==== Datos (Compuerta de admisión) ====

Coeficiente de descarga (Cs) = 0.60
Numero de compuertas (Ns) = 1
Ancho de compuerta (bs) = 0.3 m
Alfeizer de la compuerta (ps) = 0.2 m

==== Datos (Compuerta de desripiador) ====

Coeficiente de descarga (Cn) = 0.603
Numero de compuertas (Nn) = 1
Ancho de compuerta (bn) = 0.3 m

==== Datos (Canal de purga) ====

Coeficiente de rugosidad (np) = 0.014
Pendiente del canal (Sp) = 0.1 m/m

==== **Datos (Vertedor de excedencias)** ====

Caudal admisible en canal de derivación (Q12) = 0.065 m³/s
Coeficiente de descarga (Cv) = 1.50

==== **Datos (Canal de excedencias)** ====

Coeficiente de rugosidad (nv) = 0.014
Pendiente del canal (Sv) = 0.1 m/m
Ancho de solera (bv) = 0.3 m

==== **Datos adicionales** ====

Borde libre en muro de encauzamiento (BLp) = 0.2 m
Borde libre en muro de desripiador (BLs) = 0.2 m
Longitud del canal aductor (L5) = 1.0 m

==== **Resultados (Caudal mínimo anual)** ====

==== **Zona del barrage** ====

Altura de velocidad (ha) = 0 m
Carga de agua sobre barrage (ho) = 0.006 m
Tirante en la sección 1 (Y1) = 0.606 m
Desnivel río - desripiador (tb) = 0.01 m
Velocidad en sección 1 (V1) = 0.018 m/s

==== **Ventana de captación** ====

Pérdida de carga (Δh) = 0.03 m
Velocidad en sección 2 (V2) = 0.767 m/s

==== **Compuerta de admisión** ====

Caudal de descarga (Qds) = 0.06 m³/s
Tirante en la sección 3 (Y3) = 0.58 m
Altura de compuerta de admisión (hs) = 0.133 m
Velocidad en la sección 3 (V3) = 0.345 m/s
Velocidad en la sección 4 (V4) = 2.504 m/s

==== **Compuerta de desripiador** ====

Altura de compuerta de admisión (hn) = 0.104 m
Velocidad en sección 8 (V8) = 3.199 m

==== **Resultados (Caudal máximo instantáneo)** ====

==== Zona del barrage ====

Altura de velocidad (h_a) = 0.006 m
Carga de agua sobre barrage (h_o) = 0.279 m
Tirante en la sección 1 (Y_1) = 0.879 m
Velocidad en sección 1 (V_1) = 0.342 m/s

==== Ventana de captación ====

Pérdida de carga (Δh) = 0.054 m
Velocidad en sección 2 (V_2) = 1.029 m/s

==== Compuerta de admisión ====

Caudal máximo de derivación (Q_{md}) = 0.08 m³/s
Tirante en la sección 3 (Y_3) = 0.836 m
Velocidad en la sección 3 (V_3) = 0.319 m/s
Velocidad en la sección 4 (V_4) = 3.358 m/s

==== Compuerta de desripiador ====

Velocidad en sección 8 (V_8) = 3.904 m
Caudal por compuerta (Q_8) = 0.073 m

==== Resultados (Caudal medio anual) ====

==== Zona del barrage ====

Altura de velocidad (h_a) = 0 m
Carga de agua sobre barrage (h_o) = 0.032 m
Tirante en la sección 1 (Y_1) = 0.632 m
Velocidad en sección 1 (V_1) = 0.033 m/s

==== Ventana de captación ====

Pérdida de carga (Δh) = 0.032 m
Velocidad en sección 2 (V_2) = 0.792 m/s

==== Compuerta de admisión ====

Caudal de derivación (Q_d) = 0.062 m³/s
Tirante en la sección 3 (Y_3) = 0.604 m
Velocidad en la sección 3 (V_3) = 0.342 m/s
Velocidad en la sección 4 (V_4) = 2.596 m/s

==== Compuerta de desripiador ====

Velocidad en sección 8 (V8) = 3.272 m
Caudal por compuerta (Q8) = 0.062 m

==== Características (Ventana - Canal de derivación) ====

==== Desripiador ====

Ancho de base en sección 2 (T2) = 1.14 m
Ancho de base en sección 3 (T3) = 0.3 m
Longitud (L1) (Método de Hind) = 1.9 m

==== Canal de aducción ====

Pendiente del canal (S5) = 0.0121 m/m
Ancho de solera (b5) = 0.3 m
Tirante (Y5) = 0.18 m
Borde libre (BL5) = 0.12 m
Velocidad (V5) = 1.481 m/s

==== Canal de transición ====

Ancho de base en sección 5 (T5) = 0.3 m
Ancho de base en sección 6 (T6) = 0.3 m
Longitud (L2) (Método de Hind) = 0 m
Desnivel (ΔS) = 0.05 m

==== Canal de purga ====

Longitud (L3+L4) = 2.07 m
Ancho de solera (b10) = 0.3 m
Tirante (Y10) = 0.078 m
Borde libre (BL10) = 0.122 m
Velocidad (V10) = 3.12 m/s

==== Vertedor y canal de excedencias ====

Tirante en canal de derivación (Ymd) = 0.2254 m
Altura del umbral del vertedor (Yd) = 0.18 m
Tirante en canal de derivación (Y12) = 0.1916 m
Long. vertedor (Lv) (Método de Weisbach) = 2.22 m

Caudal (Qv) = 0.015 m³/s (Canal de excedencias)
Tirante normal (Yv) = 0.027 m (Canal de excedencias)
Borde Libre (BLv) = 0.073 m (Canal de excedencias)
Velocidad (Vv) = 1.852 m/s (Canal de excedencias)

==== Cotas principales ====

Cota 1 = 3928.079 m.s.n.m.
Cota 2 = 3927.25 m.s.n.m.
Cota 3 = 3926.99 m.s.n.m.
Cota 4 = 3927.19 m.s.n.m.
Cota 5 = 3928.026 m.s.n.m.
Cota 6 = 3927.29 m.s.n.m.
Cota 7 = 3926.99 m.s.n.m.
Cota 8 = 3926.966 m.s.n.m.
Cota 9 = 3926.916 m.s.n.m.
Cota 10 = 3927.29 m.s.n.m.

===== DISEÑO DEL BARRAJE VERTEDOR =====

==== Coeficiente de descarga ====

Método de USBR

==== Perfil del cimacio ====

Criterio de diseño según el USBR

==== Radio de la curva de descarga (R3) ====

Formula 01

==== Ángulo de la curva de descarga (α) ====

Definido por el programa

Diferencia de altura (Δr) = 0.05 m
Intervalo para definir el perfil del cimacio = 0.01 m
Borde libre de muro aguas abajo de barraje = 0.2 m

==== Carga de agua y coeficiente de descarga del barraje ====

Longitud efectiva del barraje (L_e) = 5.45 m
Carga de agua sobre barraje (H_o) = 0.284 m
Carga de agua sobre barraje (h_o) = 0.277 m
Altura de velocidad (h_a) = 0.007 m
Velocidad en canal de aproximación (V_o) = 0.377 m
Coeficiente de descarga del barraje (C_p) = 2.182 m

==== Resalto hidráulico ====

Profundidad de poza de disipación (r) = 0.206 m
Tirante contraído en pie de barraje (Y_1) = 0.072 m

Velocidad al pie del barraje (V1) = 4.576 m/s
 Número de Froude (Fr1) = 5.445
 Tirante conjugado en sección 2 (Y2) = 0.52 m
 Velocidad en sección 2 (V2) = 0.635 m/s

==== Perfil del cimacio ====

Coeficiente adimensional (k) = 0.505
 Coeficiente adimensional (n) = 1.86
 Coordenada de abscisa (xc) = 0.077 m
 Coordenada de ordenada (yc) = 0.033 m
 Radio (R1) = 0.147 m
 Radio (R2) = 0.062 m
 Radio de la curva de descarga (R3) = 1.079 m
 Ángulo del arco de círculo (α) = 35.99 °
 Base del barraje (Bb) = 1.703 m

==== Coordenadas del perfil del cimacio ====

| Descripción | X (m) | Y (m) |
|-------------|--------|--------|
| Punto 1 | -0.077 | -0.6 |
| Punto 2 | -0.077 | -0.033 |
| Punto 4 | 0 | 0 |
| Perfil USBR | 0.01 | 0 |
| Perfil USBR | 0.02 | -0.001 |
| Perfil USBR | 0.03 | -0.002 |
| Perfil USBR | 0.04 | -0.004 |
| Perfil USBR | 0.05 | -0.006 |
| Perfil USBR | 0.06 | -0.008 |
| Perfil USBR | 0.07 | -0.011 |
| Perfil USBR | 0.08 | -0.014 |
| Perfil USBR | 0.09 | -0.017 |
| Perfil USBR | 0.1 | -0.021 |
| Perfil USBR | 0.11 | -0.025 |
| Perfil USBR | 0.12 | -0.029 |
| Perfil USBR | 0.13 | -0.034 |
| Perfil USBR | 0.14 | -0.038 |
| Perfil USBR | 0.15 | -0.044 |
| Perfil USBR | 0.16 | -0.049 |
| Perfil USBR | 0.17 | -0.055 |
| Perfil USBR | 0.18 | -0.061 |
| Perfil USBR | 0.19 | -0.068 |
| Perfil USBR | 0.2 | -0.075 |
| Perfil USBR | 0.21 | -0.082 |
| Perfil USBR | 0.22 | -0.089 |
| Punto 5 | 0.211 | -0.083 |
| Punto 6 | 0.992 | -0.65 |

Punto 7 1.626 -0.856

===== DISEÑO DEL DISIPADOR DE ENERGIA =====

==== Características del resalto ====

Tipo de resalto formado = Resalto estable
Perdida de energía (ΔH) = 0.6 m
Longitud del resalto (Figura N° 9.08 (USBR)) = 3.16

==== Coordenadas del perfil del cimacio ====

| Descripción | X (m) | Y (m) |
|-------------|--------|--------|
| Punto 1 | -0.077 | -0.6 |
| Punto 2 | -0.077 | -0.033 |
| Punto 4 | 0 | 0 |
| Perfil | 0.01 | 0 |
| Perfil | 0.02 | -0.001 |
| Perfil | 0.03 | -0.002 |
| Perfil | 0.04 | -0.004 |
| Perfil | 0.05 | -0.006 |
| Perfil | 0.06 | -0.008 |
| Perfil | 0.07 | -0.011 |
| Perfil | 0.08 | -0.014 |
| Perfil | 0.09 | -0.017 |
| Perfil | 0.1 | -0.021 |
| Perfil | 0.11 | -0.025 |
| Perfil | 0.12 | -0.029 |
| Perfil | 0.13 | -0.034 |
| Perfil | 0.14 | -0.038 |
| Perfil | 0.15 | -0.044 |
| Perfil | 0.16 | -0.049 |
| Perfil | 0.17 | -0.055 |
| Perfil | 0.18 | -0.061 |
| Perfil | 0.19 | -0.068 |
| Perfil | 0.2 | -0.075 |
| Perfil | 0.21 | -0.082 |
| Perfil | 0.22 | -0.089 |
| Punto 5 | 0.211 | -0.083 |
| Punto 6 | 0.992 | -0.65 |
| Punto 7 | 1.626 | -0.856 |
| Punto 8 | 4.786 | -0.856 |
| Punto 9 | 5.198 | -0.65 |

==== Cotas principales ====

Cota 11 = 3926.744 m.s.n.m.

Cota 12 = 3926.95 m.s.n.m.
Cota 13 = 3927.314 m.s.n.m.

===== DETERMINACION DEL CONTORNO SUBTERRANEO DE LA PRESA =====

==== Datos ====

| | |
|---|------------------------|
| Movimiento de agua bajo presa deriv. = | Método de Lane |
| Coefficiente C (Método de Lane) = | 2.5 |
| Factor de subpresión que depende del terreno (c') = | 1.00 |
| Peso específico del agua (γ_a) = | 1000 kg/m ³ |
| Peso específico del concreto (γ_c) = | 2400 kg/m ³ |
| Coefficiente de Bligh (C) = | 8 |

==== Dimensión de dentellones ====

| | |
|----------------|---------|
| L (1-2) = | 0.6 m |
| L (2-3) = | 0.2 m |
| L (3-4) = | 0.4 m |
| L (4-5) = | 2.4 m |
| L (5-6) = | 1.456 m |
| L (6-7) = | 0.2 m |
| L (7-8) = | 1 m |
| L (8-k) = | 1.503 m |
| L (k-9) = | 2.96 m |
| L (9-10) = | 0.5 m |
| L (10-11) = | 0.2 m |
| L (11-12) = | 1.106 m |
| Espesor (e1) = | 0.2 m |
| Espesor (e2) = | 0.4 m |

==== Fenómeno de tubificación ====

| | |
|---|------|
| Gravedad específica del material (G_s) = | 2.65 |
| Relación de vacíos del mismo (e) = | 0.56 |
| Factor de seguridad a la Tubificación (F_s) = | 10.5 |

==== Resultados ====

| | |
|--|---------|
| Diferencia máxima del nivel de agua (Δh) = | 0.763 m |
| Socavación al pie del dissipador (h_4) = | 0.588 m |
| Longitud de la escollera (L_e) = | 2 m |

==== Subpresión sobre presa ====

| Punto | h' (m) | L_x (m) | S_p (kg/m ²) | Espesor (e) |
|---------|----------|-----------|----------------------------|-------------|
| Punto 1 | 0.114 | 0 | 877 | 0 |

| | | | | |
|----------|-------|-------|----------|-------|
| Punto 2 | 0.714 | 0.6 | 1416.372 | -0.06 |
| Punto 3 | 0.714 | 0.667 | 1409.602 | -0.06 |
| Punto 4 | 0.314 | 1.067 | 969.184 | -0.1 |
| Punto 5 | 0.314 | 1.867 | 888.347 | -0.18 |
| Punto 6 | 1.77 | 3.323 | 2197.223 | -0.32 |
| Punto 7 | 1.77 | 3.39 | 2190.453 | -0.33 |
| Punto 8 | 0.77 | 4.39 | 1089.407 | -0.42 |
| Punto k | 0.77 | 4.891 | 1038.783 | 0.26 |
| Punto 9 | 0.77 | 5.878 | 939.05 | 0.16 |
| Punto 10 | 1.27 | 6.378 | 1388.527 | 0.11 |
| Punto 11 | 1.27 | 6.445 | 1381.757 | 0.11 |
| Punto 12 | 0.164 | 7.551 | 164 | 0 |

==== **Coordenadas (X, Y)** ====

| Descripción | X (m) | Y (m) |
|--------------------|--------------|--------------|
| Punto 1 | -0.077 | -0.6 |
| Punto 2 | -0.077 | -0.033 |
| Punto 4 | 0 | 0 |
| Perfil | 0.01 | 0 |
| Perfil | 0.02 | -0.001 |
| Perfil | 0.03 | -0.002 |
| Perfil | 0.04 | -0.004 |
| Perfil | 0.05 | -0.006 |
| Perfil | 0.06 | -0.008 |
| Perfil | 0.07 | -0.011 |
| Perfil | 0.08 | -0.014 |
| Perfil | 0.09 | -0.017 |
| Perfil | 0.1 | -0.021 |
| Perfil | 0.11 | -0.025 |
| Perfil | 0.12 | -0.029 |
| Perfil | 0.13 | -0.034 |
| Perfil | 0.14 | -0.038 |
| Perfil | 0.15 | -0.044 |
| Perfil | 0.16 | -0.049 |
| Perfil | 0.17 | -0.055 |
| Perfil | 0.18 | -0.061 |
| Perfil | 0.19 | -0.068 |
| Perfil | 0.2 | -0.075 |
| Perfil | 0.21 | -0.082 |
| Perfil | 0.22 | -0.089 |
| Punto 5 | 0.211 | -0.083 |
| Punto 6 | 0.992 | -0.65 |
| Punto 7 | 1.626 | -0.856 |
| Punto 8 | 4.786 | -0.856 |
| Punto 9 | 5.198 | -0.65 |
| Punto 10 | 5.398 | -0.65 |

| | | |
|----------|--------|--------|
| Punto 11 | 5.398 | -1.756 |
| Punto 12 | 5.198 | -1.756 |
| Punto 13 | 5.198 | -1.256 |
| Punto 14 | 1.626 | -1.256 |
| Punto 15 | 0.123 | -1.256 |
| Punto 16 | 0.123 | -2.256 |
| Punto 17 | -0.077 | -2.256 |
| Punto 18 | -0.077 | -0.8 |
| Punto 19 | -2.477 | -0.8 |
| Punto 20 | -2.477 | -1.2 |
| Punto 21 | -2.677 | -1.2 |
| Punto 22 | -2.677 | -0.6 |
| Punto 23 | -0.077 | -0.6 |

===== MURO DE ENCAUZAMIENTO Y ESTUDIO DE LA CURVA DE REMANSO =====

==== Datos ====

Número de tramos (n) = 10

==== Resultados ====

Tirante critico (yc) = 0.2095 m
 Tirante en sección de control (yi) = 0.164 m
 Tirante normal del río (yf) = 0.877 m
 Decremento del tirante (Δy) = 0.0713 m

==== Longitud de la curva de remanso ====

Método aproximado (L) = 23.77 m
 Método de integración gráfica (L) = 47.42 m
 Método del paso directo (L) = 8 m

==== Longitud del muro de encauzamiento ====

Longitud (Método Aproximado) = 23.77 m

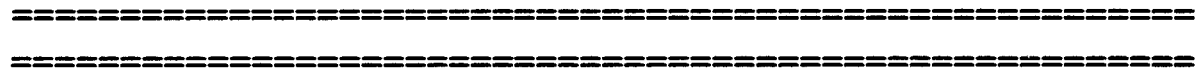
==== Método de Integración gráfica ====

| Y (m) | f(y) | $\Delta x=A$ (m) | x (m) |
|--------|-----------|------------------|-------|
| 0.164 | 1082.3994 | 0 | 0 |
| 0.2353 | 7.1524 | 38.84 | 38.84 |
| 0.3066 | 13.1051 | 0.72 | 39.56 |
| 0.3779 | 14.8462 | 1 | 40.56 |
| 0.4492 | 15.5947 | 1.09 | 41.65 |
| 0.5205 | 15.9786 | 1.13 | 42.77 |
| 0.5918 | 16.1979 | 1.15 | 43.92 |

| | | | |
|--------|---------|------|-------|
| 0.6631 | 16.3328 | 1.16 | 45.08 |
| 0.7344 | 16.4205 | 1.17 | 46.25 |
| 0.8057 | 16.48 | 1.17 | 47.42 |

==== Método del paso directo ====

| Y (m) | ΔE (m) | ΔL (m) | ΣL (m) |
|--------|----------------|----------------|----------------|
| 0.164 | 0 | 0 | 0 |
| 0.2353 | -0.0166 | -0.65 | -0.65 |
| 0.3066 | 0.0372 | 0.78 | 0.13 |
| 0.3779 | 0.0546 | 1.01 | 1.14 |
| 0.4492 | 0.0619 | 1.09 | 2.23 |
| 0.5205 | 0.0655 | 1.13 | 3.36 |
| 0.5918 | 0.0675 | 1.15 | 4.5 |
| 0.6631 | 0.0686 | 1.16 | 5.66 |
| 0.7344 | 0.0694 | 1.17 | 6.83 |
| 0.8057 | 0.0699 | 1.17 | 8 |



Programa para el diseño hidráulico y estructural de Bocatomas tipo
barraje (Versión 2.0.0)

Por: Cesar V. Gutiérrez N.

Fecha: 13/11/2014

Hora: 12:53:33 p.m.

DISEÑO DE BOCATOMA TIPO BARRAJE (DISEÑO ESTRUCTURAL)

===== ===== DATOS GENERALES DEL PROYECTO =====

Nombre del proyecto: "MEJORAMIENTO Y AMPLIACION DE LA FRONTERA AGRICOLA MEDIANTE EL RIEGO TECNIFICADO EN LA MICROCUENCA ARMAHUAYCCO, DISTRITO DE EL CARMEN - PROVINCIA DE CHURCAMPa - DEPARTAMENTO DE HUANCavelICA"

Ubicación política:

Departam.: Huancavelica
Provincia: Churcampa
Distrito: El Carmen
Localidad: Vilcabamba

Ubicación geográfica:

Latitud:
Longitud:
Altitud: 2400 m.s.n.m.

===== ===== DETERMINACIÓN DE LA SOCAVACIÓN DEL CAUSE =====

==== Datos (Socavación general) =====

Diámetro medio de las partículas (Dm) = 30 mm

==== Método de Lischtvan - Levediev =====

Periodo de retorno (Tr) = 25
Coeficiente por contracción (μ) = 0.98

Tipo de suelo = Granular
Peso específico muestra agua sedimento (γ_m) = 2.1 Ton/m³

==== Datos (Socavación local) =====

==== Método de Liu, Chang y Skinner =====

Condición del muro = Pared vertical

==== Método de Artamonov =====

Coeficiente K θ = 1.00
Coeficiente KQ = 2.00
Coeficiente Km = 1

==== Resultados =====

Condición de flujo = Lecho movil

==== Método de Lischtvan - Levediev =====

Profundidad de socavación (Ds) = 0.032 m
Tirante después de ocurrido la socavación (Hs) = 0.132 m

==== Método de Straub ====

Profundidad de socavación (Ds) = 0.049 m
Tirante después de ocurrido la socavación (Hs) = 0.213 m

==== Método de Liu, Chang y Skinner ====

Profundidad de socavación (ds) = == m

==== Método de Artamonov ====

Profundidad de socavación (ds) = 0.164 m
Tirante después de ocurrido la socavación (Ht) = 0.328 m

==== Socavación de diseño ====

Profundidad de socavación (Definido por el usuario) = 0.8 m

==== DISEÑO DE MUROS DE ENCAUZAMIENTO (Muro aguas arriba del barraje) ====

==== Datos generales (Diseño de Muro de gravedad) ====

==== Materiales ====

Peso específico del concreto (γ_c) = 2400 kg/m³

==== Suelo de fundación ====

Capacidad de carga admisible (σ_{adm}) = 1.5 kg/cm²
Ángulo de fricción interna (ϕ) = 34 °
Coef. de fricción concreto-terreno (f) = 0.42

==== Relleno ====

Peso específico (γ_s) = 1800 kg/m³

==== Fondo río ====

Peso específico suelo saturado (γ_{sat}) = 2100 kg/m³

==== Muro en análisis ====

Muro aguas arriba del barraje

==== Resultados (Diseño de Muro de gravedad) ====

==== Dimensiones del muro ====

| | |
|------------------------------|-------|
| Pie (G) = | 0.6 m |
| Talón (H) = | 0.8 m |
| Peralte (t1) = | 0.3 m |
| Peralte (t2) = | 1.3 m |
| Peralte (C) = | 0.3 m |
| Altura de pantalla (D+E+B) = | 2.1 m |

==== Cargas sobre el muro ====

| | |
|---|---------------------|
| Altura del relleno en espalda de muro (F) = | 1.3 m |
| Altura del agua (E) = | 1.1 m |
| Altura de relleno en fondo de río (D) = | 0.8 m |
| Altura de Borde libre (B) = | 0.2 m |
| Sobre carga en relleno (S/C) = | 0 kg/m ² |

==== Análisis de estabilidad (Pivote en punto A) ====

==== Momentos actuantes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|-----------------------|-------------|-----------|----------------|
| Empuje activo (Ea) | 1465.59 | 0.8 | 1172.48 |
| Ea debido a S/C (Eas) | 0 | 1.2 | 0 |
| Subpresión agua (Es1) | 534.6 | 0.9 | 481.14 |
| Subpresión agua (Es2) | 3326.4 | 1.35 | 4490.64 |
| ===== | | ΣMa | 6144.26 |

==== Momentos resistentes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|------------------------|-------------|-----------|----------------|
| Empuje pasivo (Ep) | 2353.96 | 0.367 | 863.12 |
| Empuje del agua (Ew) | 1805 | 0.933 | 1684.67 |
| Sobrecarga (Es) | 0 | 1.8 | 0 |
| Peso estructura (W1) | 1944 | 1.35 | 2624.4 |
| Peso estructura (W2) | 1512 | 0.75 | 1134 |
| Peso estructura (W3) | 2520 | 1.233 | 3108 |
| Peso relleno (W4) | 1890 | 1.567 | 2961 |
| Peso relleno (W5) | 3024 | 2.3 | 6955.2 |
| Peso relleno sat. (W6) | 1008 | 0.3 | 302.4 |
| Peso de agua (W7) | 660 | 0.3 | 198 |
| ===== | | ΣMr | 19830.79 |

==== Condiciones de estabilidad ====

Factor de seguridad al volteo (FSV) = 3.23
 Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = 1.36
 Punto de paso de la resultante (a) = 1.574 m
 Presión (σ_1) = 0.16 kg/cm²
 Presión (σ_2) = 0.48 kg/cm²

==== Verificaciones ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
 Volteo OK
 Deslizamiento OK
 Capacidad de carga OK

==== Análisis de estabilidad (Pivote en punto B) ====

==== Momentos actuantes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|-----------------------|-------------|-------------|----------------|
| Subpresión agua (Es1) | 534.6 | 1.8 | 962.28 |
| Subpresión agua (Es2) | 3326.4 | 1.35 | 4490.64 |
| Empuje pasivo (Ep) | 2353.96 | 0.367 | 863.12 |
| Empuje del agua (Ew) | 1805 | 0.933 | 1684.67 |
| ===== | ===== | ΣMa | 8000.71 |

==== Momentos resistentes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|------------------------|-------------|-------------|----------------|
| Empuje activo (Ea) | 1465.59 | 0.8 | 1172.48 |
| Ea debido a S/C (Eas) | 0 | 1.2 | 0 |
| Sobrecarga (Es) | 0 | 0.9 | 0 |
| Peso estructura (W1) | 1944 | 1.35 | 2624.4 |
| Peso estructura (W2) | 1512 | 1.95 | 2948.4 |
| Peso estructura (W3) | 2520 | 1.467 | 3696 |
| Peso relleno (W4) | 1890 | 1.133 | 2142 |
| Peso relleno (W5) | 3024 | 0.4 | 1209.6 |
| Peso relleno sat. (W6) | 1008 | 2.4 | 2419.2 |
| Peso de agua (W7) | 660 | 2.4 | 1584 |
| ===== | ===== | ΣMr | 17796.08 |

==== Condiciones de estabilidad ====

Factor de seguridad al volteo (FSV) = 2.22
 Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = 1.36
 Punto de paso de la resultante (a) = 1.126 m
 Presión (σ_1) = 0.16 kg/cm²
 Presión (σ_2) = 0.48 kg/cm²

==== Verificaciones ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
Volteo OK
Deslizamiento OK
Capacidad de carga OK

=== DISEÑO DE MUROS DE ENCAUZAMIENTO (Muro aguas abajo del barrage) ===

==== Datos generales (Diseño de Muro de gravedad) ====

==== Materiales ====

Peso específico del concreto (γ_c) = 2400 kg/m³

==== Suelo de fundación ====

Capacidad de carga admisible (σ_{adm}) = 1.5 kg/cm²
Ángulo de fricción interna (ϕ) = 34 °
Coef. de fricción concreto-terreno (f) = 0.42

==== Relleno ====

Peso específico (γ_s) = 1800 kg/m³

==== Fondo río ====

Peso específico suelo saturado (γ_{sat}) = 2100 kg/m³

==== Muro en análisis ====

Muro aguas abajo del barrage

==== Resultados (Diseño de Muro de gravedad) ====

==== Dimensiones del muro ====

Pie (G) = 0.6 m
Talón (H) = 0.8 m
Peralte (t1) = 0.3 m
Peralte (t2) = 1.3 m
Peralte (C) = 0.3 m
Altura de pantalla (D+E+B) = 1.2 m

==== Cargas sobre el muro ====

Altura del relleno en espalda de muro (F) = 0.6 m
Altura del agua (E) = 0.4 m
Altura de relleno en fondo de río (D) = 0.6 m
Altura de Borde libre (B) = 0.2 m
Sobre carga en relleno (S/C) = 0 kg/m²

==== **Análisis de estabilidad (Pivote en punto A)** ====

==== **Momentos actuantes** ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|-----------------------|-------------|-----------|----------------|
| Empuje activo (Ea) | 572.5 | 0.5 | 286.25 |
| Ea debido a S/C (Eas) | 0 | 0.75 | 0 |
| Subpresión agua (Es1) | 211.3 | 0.9 | 190.17 |
| Subpresión agua (Es2) | 2570.87 | 1.35 | 3470.67 |
| ===== | ===== | ΣMa | 3947.1 |

==== **Momentos resistentes** ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|------------------------|-------------|-----------|----------------|
| Empuje pasivo (Ep) | 1575.79 | 0.3 | 472.74 |
| Empuje del agua (Ew) | 500 | 0.633 | 316.67 |
| Sobrecarga (Es) | 0 | 1.8 | 0 |
| Peso estructura (W1) | 1944 | 1.35 | 2624.4 |
| Peso estructura (W2) | 864 | 0.75 | 648 |
| Peso estructura (W3) | 1440 | 1.233 | 1776 |
| Peso relleno (W4) | 1080 | 1.567 | 1692 |
| Peso relleno (W5) | 1728 | 2.3 | 3974.4 |
| Peso relleno sat. (W6) | 756 | 0.3 | 226.8 |
| Peso de agua (W7) | 240 | 0.3 | 72 |
| ===== | ===== | ΣMr | 11803 |

==== **Condiciones de estabilidad** ====

| | |
|--|-------------------------|
| Factor de seguridad al volteo (FSV) = | 2.99 |
| Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = | 1.47 |
| Punto de paso de la resultante (a) = | 1.491 m |
| Presión (σ1) = | 0.13 kg/cm ² |
| Presión (σ2) = | 0.26 kg/cm ² |

==== **Verificaciones** ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
Volteo OK
Deslizamiento OK
Capacidad de carga OK

==== **Análisis de estabilidad (Pivote en punto B)** ====

==== **Momentos actuantes** ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|-----------------------|-------------|-----------|----------------|
| Subpresión agua (Es1) | 211.3 | 1.8 | 380.35 |
| Subpresión agua (Es2) | 2570.87 | 1.35 | 3470.67 |
| Empuje pasivo (Ep) | 1575.79 | 0.3 | 472.74 |
| Empuje del agua (Ew) | 500 | 0.633 | 316.67 |
| ===== | ===== | ΣMa | 4640.43 |

==== **Momentos resistentes** ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|------------------------|-------------|-----------|----------------|
| Empuje activo (Ea) | 572.5 | 0.5 | 286.25 |
| Ea debido a S/C (Eas) | 0 | 0.75 | 0 |
| Sobrecarga (Es) | 0 | 0.9 | 0 |
| Peso estructura (W1) | 1944 | 1.35 | 2624.4 |
| Peso estructura (W2) | 864 | 1.95 | 1684.8 |
| Peso estructura (W3) | 1440 | 1.467 | 2112 |
| Peso relleno (W4) | 1080 | 1.133 | 1224 |
| Peso relleno (W5) | 1728 | 0.4 | 691.2 |
| Peso relleno sat. (W6) | 756 | 2.4 | 1814.4 |
| Peso de agua (W7) | 240 | 2.4 | 576 |
| ===== | ===== | EMr | 11013.05 |

==== Condiciones de estabilidad ====

| | |
|--|-------------------------|
| Factor de seguridad al volteo (FSV) = | 2.37 |
| Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = | 1.47 |
| Punto de paso de la resultante (a) = | 1.209 m |
| Presión (σ_1) = | 0.13 kg/cm ² |
| Presión (σ_2) = | 0.26 kg/cm ² |

==== Verificaciones ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
 Volteo OK
 Deslizamiento OK
 Capacidad de carga OK

===== DISEÑO DE MURO LATERAL =====

==== Datos (Materiales) ====

| | |
|---|-------------------------|
| Peso específico del concreto (γ_c) = | 2400 kg/m ³ |
| Resistencia del concreto (f'_c) = | 175 kg/cm ² |
| Esfuerzo de fluencia del acero (f_y) = | 4200 kg/cm ² |

==== Datos (Suelo de fundación) ====

| | |
|---|------------------------|
| Capacidad de carga admisible (σ_{adm}) = | 1.5 kg/cm ² |
| Ángulo de fricción interna (ϕ) = | 34° |
| Coef. de fricción concreto-terreno (f) = | 0.42 |
| Peso específico del relleno (γ_s) = | 1800 kg/m ³ |

==== Datos (Acero de refuerzo) ====

| | |
|--|-----------|
| Recubrimiento en pantalla = | 5 cm |
| Refuerzo vertical en pantalla (ϕ) = | 1/2 pulg. |
| Refuerzo horizontal en pantalla (ϕ) = | 1/2 pulg. |
| Recubrimiento en zapata = | 5 cm |
| Refuerzo en talón anterior (ϕ) = | 1/2 pulg. |
| Refuerzo en talón posterior (ϕ) = | 1/2 pulg. |

==== Resultados ====

==== Dimensiones del muro ====

Pie (G) = 0.5 m
Talón (H) = 0.8 m
Peralte (t) = 0.25 m
Peralte (C) = 0.25 m
Altura de pantalla (D+E+B) = 1.5 m

==== Cargas sobre el muro ====

Altura del relleno en espalda de muro (F) = 0.8 m
Altura del agua (E) = 0.8 m
Altura de relleno en fondo (D) = 0.5 m
Altura de Borde libre (B) = 0.2 m
Sobre carga en relleno (S/C) = 0 kg/m²

==== Análisis de estabilidad (Pivote en punto A) ====

==== Momentos actuantes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|-----------------------|-------------|-----------|----------------|
| Empuje activo (Ea) | 611.3 | 0.517 | 315.84 |
| Ea debido a S/C (Eas) | 0 | 0.775 | 0 |
| ΣFh | 1499.37 | ΣMa | 315.84 |

==== Momentos resistentes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|----------------------|-------------|-----------|----------------|
| Empuje pasivo (Ep) | 1790.67 | 0.25 | 447.67 |
| Empuje del agua (Ew) | 320 | 1.017 | 325.33 |
| Sobrecarga (Es) | 0 | 1.15 | 0 |
| Peso estructura (W1) | 930 | 0.775 | 720.75 |
| Peso estructura (W2) | 900 | 0.625 | 562.5 |
| Peso relleno (W3) | 1872 | 1.15 | 2152.8 |
| Peso relleno (W4) | 450 | 0.25 | 112.5 |
| Peso de agua (W5) | 400 | 0.25 | 100 |
| ΣFv | 4552 | ΣMr | 4421.55 |

==== Condiciones de estabilidad ====

Factor de seguridad al volteo (FSV) = 14
Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = 1.28
Punto de paso de la resultante (a) = 0.902 m
Presión (σl) = 0.15 kg/cm²

Presión (σ_2) = 0.44 kg/cm²

==== Verificaciones ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
Volteo OK
Deslizamiento OK
Capacidad de carga OK

==== Análisis de estabilidad (Pivote en punto B) ====

==== Momentos actuantes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|----------------------|-------------|--------------|----------------|
| Empuje pasivo (Ep) | 1790.67 | 0.25 | 447.67 |
| Empuje del agua (Ew) | 320 | 1.017 | 325.33 |
| ΣF_h | 1499.37 | ΣM_a | 773 |

==== Momentos resistentes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|-----------------------|-------------|--------------|----------------|
| Empuje activo (Ea) | 611.3 | 0.517 | 315.84 |
| Ea debido a S/C (Eas) | 0 | 0.775 | 0 |
| Sobrecarga (Es) | 0 | 0.4 | 0 |
| Peso estructura (W1) | 930 | 0.775 | 720.75 |
| Peso estructura (W2) | 900 | 0.925 | 832.5 |
| Peso relleno (W3) | 1872 | 0.4 | 748.8 |
| Peso relleno (W4) | 450 | 1.3 | 585 |
| Peso de agua (W5) | 400 | 1.3 | 520 |
| ΣF_v | 4552 | ΣM_r | 3722.89 |

==== Condiciones de estabilidad ====

Factor de seguridad al volteo (FSV) = 4.82
Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = 1.28
Punto de paso de la resultante (a) = 0.648 m
Presión (σ_1) = 0.15 kg/cm²
Presión (σ_2) = 0.44 kg/cm²

==== Verificaciones ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
Volteo OK
Deslizamiento OK
Capacidad de carga OK

==== Aceros de refuerzo ====

==== Armadura en pantalla ====

Momento en la base (Mu) = 208.49 kg-m
Fuerza cortante mayorada (Vu) = 969.35 kg
Acero vertical (As) = 0.29 cm²
Acero mínimo vertical (As) = 3 cm²
Acero mínimo horizontal (As) = 5 cm²

==== Armadura talón posterior ====

Momento en la base (Mu) = 868.39 kg-m
Acero longitudinal (As) = 1.2 cm²
Acero mínimo longitudinal (As) = 4.5 cm²

==== Armadura talón anterior ====

Momento en la base (Mu) = 17.37 kg-m
Acero longitudinal (As) = 0.02 cm²
Acero mínimo longitudinal (As) = 4.5 cm²

==== Verificaciones ====

Verificación de corte en base de la pantalla OK
Verificación de corte en cara de talón anterior OK
Verificación de corte en cara de talón posterior OK

==== Aceros recomendados en muro ====

==== Acero en pantalla ====

Acero vertical = 1/2 @43cm
Acero horizontal exterior = 1/2 @39cm
Acero horizontal interior = 1/2 @45cm

==== Acero en zapata ====

Acero longitudinal (Talón anterior) = 1/2 @29cm (Acero negativo)
Acero transversal (Talón anterior) = 1/2 @29cm (Acero negativo)

Acero longitudinal (Talón posterior) = 1/2 @29cm (Acero negativo)
Acero transversal (Talón posterior) = 1/2 @29cm (Acero negativo)

===== ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL BARRAJE (Qmax) =====

==== Condición de diseño ====

Análisis para Caudal máximo instantáneo

==== **Datos (Suelo de fundación)** ====

Capacidad de carga admisible (σ_{adm}) = 1.5 kg/cm²
Ángulo de fricción interna (ϕ) = 34 °
Coef. de fricción concreto-terreno (f) = 0.42
Peso específico (γ_s) = 1800 kg/m³

==== **Datos (Materiales)** ====

Peso específico del concreto (γ_c) = 2400 kg/m³

==== **Datos (Fondo río)** ====

Peso específico suelo saturado (γ_{sat}) = 2100 kg/m³

==== **Análisis de estabilidad (Pivote en punto k)** ====

==== **Momentos actuantes** ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|------------------------|-------------|-------------|----------------|
| Empuje sedimentos (Ea) | 66.91 | 0.219 | 14.63 |
| Empuje del agua (Ew1) | 772.52 | 0.414 | 320.08 |
| Empuje del agua (Ew2) | 360.47 | 0.622 | 224.03 |
| Subpresión agua (Es1) | 0.68 | 1.636 | 1.11 |
| Subpresión agua (Es2) | 438.09 | 1.603 | 702.26 |
| Subpresión agua (Es3) | 38.04 | 1.002 | 38.12 |
| Subpresión agua (Es4) | 1561.29 | 0.752 | 1173.31 |
| ===== | ===== | ΣMa | 2473.54 |

==== **Momentos resistentes** ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|----------------------|-------------|-------------|----------------|
| Peso estructura (W1) | 1634.88 | 0.851 | 1392.1 |
| Peso estructura (W2) | 388.45 | 1.607 | 624.25 |
| Peso estructura (W3) | 1174.47 | 1.124 | 1320.1 |
| Peso del agua (W4) | 297.17 | 1.018 | 302.59 |
| ===== | ===== | ΣMr | 3639.04 |

==== **Condiciones de estabilidad** ====

Factor de seguridad al volteo (FSV) = 1.50
Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = 6.38
Punto de paso de la resultante (a) = 0.8 m
Presión (σ_1) = 0.1 kg/cm²
Presión (σ_2) = 0.07 kg/cm²

==== Verificaciones ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
Volteo OK
Deslizamiento OK
Capacidad de carga OK

==== Análisis de estabilidad (Pivote en punto n) ====

==== Momentos actuantes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|-----------------------|-------------|-------------|----------------|
| Subpresión agua (Es1) | 0.68 | 0.067 | 0.05 |
| Subpresión agua (Es2) | 438.09 | 0.1 | 43.81 |
| Subpresión agua (Es3) | 38.04 | 0.701 | 26.67 |
| Subpresión agua (Es4) | 1561.29 | 0.951 | 1485.57 |
| ===== | ===== | ΣMa | 1556.09 |

==== Momentos resistentes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|------------------------|-------------|-------------|----------------|
| Empuje sedimentos (Ea) | 66.91 | 0.219 | 14.63 |
| Empuje del agua (Ew1) | 772.52 | 0.414 | 320.08 |
| Empuje del agua (Ew2) | 360.47 | 0.622 | 224.03 |
| Peso estructura (W1) | 1634.88 | 0.851 | 1392.1 |
| Peso estructura (W2) | 388.45 | 0.096 | 37.29 |
| Peso estructura (W3) | 1174.47 | 0.579 | 680.02 |
| Peso del agua (W4) | 297.17 | 0.685 | 203.5 |
| ===== | ===== | ΣMr | 2871.65 |

==== Condiciones de estabilidad ====

Factor de seguridad al volteo (FSV) = 1.85
Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = 6.38
Punto de paso de la resultante (a) = 0.903 m
Presión (σ_1) = 0.1 kg/cm²
Presión (σ_2) = 0.07 kg/cm²

==== Verificaciones ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
Volteo OK
Deslizamiento OK
Capacidad de carga OK

==== Coordenadas Barraje ====

| Descripción | X (m) | Y (m) |
|--------------------|--------------|--------------|
| Punto 1 | -0.077 | -0.6 |
| Punto 2 | -0.077 | -0.033 |
| Punto 4 | 0 | 0 |
| Perfil | 0.01 | 0 |
| Perfil | 0.02 | -0.001 |
| Perfil | 0.03 | -0.002 |
| Perfil | 0.04 | -0.004 |
| Perfil | 0.05 | -0.006 |
| Perfil | 0.06 | -0.008 |
| Perfil | 0.07 | -0.011 |
| Perfil | 0.08 | -0.014 |
| Perfil | 0.09 | -0.017 |
| Perfil | 0.1 | -0.021 |
| Perfil | 0.11 | -0.025 |
| Perfil | 0.12 | -0.029 |
| Perfil | 0.13 | -0.034 |
| Perfil | 0.14 | -0.038 |
| Perfil | 0.15 | -0.044 |
| Perfil | 0.16 | -0.049 |
| Perfil | 0.17 | -0.055 |
| Perfil | 0.18 | -0.061 |
| Perfil | 0.19 | -0.068 |
| Perfil | 0.2 | -0.075 |
| Perfil | 0.21 | -0.082 |
| Perfil | 0.22 | -0.089 |
| Punto 5 | 0.211 | -0.083 |
| Punto 6 | 0.992 | -0.65 |
| Punto 7 | 1.626 | -0.856 |
| Punto 14 | 1.626 | -1.256 |
| Punto 15 | 0.123 | -1.256 |
| Punto 15 | -0.077 | -1.256 |
| Punto 23 | -0.077 | -0.6 |

==== **Coordenadas figura equivalente** ====

| Descripción | X (m) | Y (m) |
|--------------------|--------------|--------------|
| Punto 1 | -0.077 | -0.013 |
| Punto 2 | 0.115 | -0.013 |
| Punto 3 | 1.276 | -0.856 |
| Punto 4 | 1.626 | -0.856 |
| Punto 5 | 1.626 | -1.256 |
| Punto 6 | -0.077 | -1.256 |
| Punto 7 | -0.077 | -0.013 |

==== **Empuje pasivo producido por dentellón** ====

Presión pasiva superior (t1) = 3858.3 kg/m²
 Presión pasiva inferior (t2) = 10225.14 kg/m²
 Empuje pasivo (Ep) = 7041.72 kg

===== ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL BARRAJE (Qmin) =====

==== Condición de diseño ====

Análisis para Caudal mínimo anual

==== Datos (Suelo de fundación) ====

Capacidad de carga admisible (oadm) = 1.5 kg/cm²
 Ángulo de fricción interna (ø) = 34 °
 Coef. de fricción concreto-terreno (f) = 0.42
 Peso específico (γs) = 1800 kg/m³

==== Datos (Materiales) ====

Peso específico del concreto (γc) = 2400 kg/m³

==== Datos (Fondo río) ====

Peso específico suelo saturado (γsat) = 2100 kg/m³

==== Análisis de estabilidad (Pivote en punto k) ====

==== Momentos actuantes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|------------------------|-------------|-----------|----------------|
| Empuje sedimentos (Ea) | 66.91 | 0.219 | 14.63 |
| Empuje del agua (Ew1) | 772.52 | 0.414 | 320.08 |
| Empuje del agua (Ew2) | 23.62 | 0.622 | 14.68 |
| Subpresión agua (Es1) | 0.56 | 1.636 | 0.92 |
| Subpresión agua (Es2) | 395.47 | 1.603 | 633.94 |
| Subpresión agua (Es3) | 31.61 | 1.002 | 31.68 |
| Subpresión agua (Es4) | 1279.56 | 0.752 | 961.59 |
| ===== | ===== | ΣMa | 1977.52 |

==== Momentos resistentes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|----------------------|-------------|-----------|----------------|
| Peso estructura (W1) | 1634.88 | 0.851 | 1392.1 |
| Peso estructura (W2) | 388.45 | 1.607 | 624.25 |
| Peso estructura (W3) | 1174.47 | 1.124 | 1320.1 |
| Peso del agua (W4) | 0 | 0 | 0 |
| ===== | ===== | ΣMr | 3336.45 |

==== Condiciones de estabilidad ====

Factor de seguridad al volteo (FSV) = 1.69
 Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = 8.88
 Punto de paso de la resultante (a) = 0.912 m
 Presión (σ1) = 0.07 kg/cm²

Presión (σ_2) =

0.11 kg/cm²

==== Verificaciones ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
Volteo OK
Deslizamiento OK
Capacidad de carga OK

==== Análisis de estabilidad (Pivote en punto n) ====

==== Momentos actuantes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|-----------------------|-------------|-------------|----------------|
| Subpresión agua (Es1) | 0.56 | 0.067 | 0.04 |
| Subpresión agua (Es2) | 395.47 | 0.1 | 39.55 |
| Subpresión agua (Es3) | 31.61 | 0.701 | 22.16 |
| Subpresión agua (Es4) | 1279.56 | 0.951 | 1217.51 |
| ===== | ===== | ΣMa | 1279.25 |

==== Momentos resistentes ====

| Descripción | Fuerza (kg) | Brazo (m) | Momento (kg-m) |
|------------------------|-------------|-------------|----------------|
| Empuje sedimentos (Ea) | 66.91 | 0.219 | 14.63 |
| Empuje del agua (Ew1) | 772.52 | 0.414 | 320.08 |
| Empuje del agua (Ew2) | 23.62 | 0.622 | 14.68 |
| Peso estructura (W1) | 1634.88 | 0.851 | 1392.1 |
| Peso estructura (W2) | 388.45 | 0.096 | 37.29 |
| Peso estructura (W3) | 1174.47 | 0.579 | 680.02 |
| Peso del agua (W4) | 0 | 0 | 0 |
| ===== | ===== | ΣMr | 2458.8 |

==== Condiciones de estabilidad ====

Factor de seguridad al volteo (FSV) = 1.92
Factor de seguridad al deslizamiento (FSD) = 8.88
Punto de paso de la resultante (a) = 0.791 m
Presión (σ_1) = 0.07 kg/cm²
Presión (σ_2) = 0.11 kg/cm²

==== Verificaciones ====

Resultante dentro del tercio medio ($a > B/3$) OK
Volteo OK
Deslizamiento OK
Capacidad de carga OK

==== Empuje pasivo producido por dentellón ====

Presión pasiva superior (t1) = 3858.3 kg/m²
Presión pasiva inferior (t2) = 10225.14 kg/m²
Empuje pasivo (Ep) = 7041.72 kg

=====