



UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN

PRESENTADO POR

BACHILLER MIRIAM ELIZABETH MAMANI CONDORI

ASESOR:

ING. RENÉ HERADIO FLORES PAURO

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERA CIVIL

MOQUEGUA – PERÚ

2018

CONTENIDO

	Pág.
PORTADA	
Página de jurado.....	i
Contenido.....	ii
Índice de tablas.....	iv
Índice de figuras.....	v
Índice de apéndices.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos específicos.....	2

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TEMA

3.1 Marco teórico.....	3
3.1.1 Disipación de energía.....	3
3.1.2 Resalto hidráulico.....	3

3.1.3 Tipos de disipadores.....	5
3.1.4 Tipos de pozas amortiguadoras.....	15
3.2 Caso práctico.....	25
3.2.1 Factores topográficos.....	25
3.2.2 Factores geológicos.....	26
3.2.3 Factores hidráulicos.....	27
3.2.4 Determinación del caudal.....	29
3.2.5 Diseño geométrico.....	32
3.2.6 Comentarios del diseño.....	45
3.3 Representación de resultados.....	46

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones.....	48
4.2 Recomendaciones.....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
APÉNDICES.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido de tablas	Pág.
Tabla 1. Teorema de Bernoulli para tramos finitos para $S1 = 0,71$	37
Tabla 2. Elevaciones – tirantes en el canal de la rápida.....	40
Tabla 3. Tirante – fuerza específica	40
Tabla 4. Elevación – Tirantes conjugados menores.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido de figuras	Pág.
Figura 1. Resalto hidráulico	4
Figura 2. Caída vertical	5
Figura 3. Elementos de una caída vertical	6
Figura 4. Dimensiones de la caída vertical	7
Figura 5. Caída inclinada	9
Figura 6. Elementos de una caída inclinada.....	10
Figura 7. Rápida con pantallas transversales	11
Figura 8. Elementos de una rápida.....	12
Figura 9. Estanque amortiguador tipo II	16
Figura 10. Dimensión de dientes.....	17
Figura 11. Dimensión del umbral.....	17
Figura 12. Estanque amortiguador de tipo III	18
Figura 13. Dimensión de dientes.....	19
Figura 14. Dimensión de dados.....	20
Figura 15. Dimensión de umbral.....	21
Figura 16. Estanque amortiguador tipo IV.....	22
Figura 17. Dimensión de dientes.....	23
Figura 18. Dimensión de umbral.....	24
Figura 19. Ensayo de límite líquido	25
Figura 20. Terreno natural.....	26
Figura 21. Canal de PERPG.....	27

Figura 22. Medición de la base del canal	28
Figura 23. Medición del tirante del canal.....	28
Figura 24. Medición del espesor de las paredes del canal	29
Figura 25. Método del flotador con cuerpo flotante	30
Figura 26. Tiempo de la prueba	30
Figura 27. Medidas del canal	33
Figura 28. Vista en planta de zona de transición de canal	34
Figura 29. Gradiente de energía	36
Figura 30. Perfil del terreno	37
Figura 31. Energía vs tirante	38
Figura 32. Fuerza específica vs tirante.....	41
Figura 33. Elevación vs tirante.....	42
Figura 34. Medidas de colchón amortiguador.....	45
Figura 35. Diseño de canal.....	46
Figura 36. Canal según planos del PERPG	46
Figura 37. Diseño del colchón amortiguador	47

ÍNDICE DE APÉNDICES

Contenido de apéndices	Pág.
Tabla A1. Clasificación de suelos según SUCS del terreno comprendido	51
Figura B1. Detalle del canal y zona de entrada de la estructura de disipacion del PERPG Fuente.....	52
Figura B2. Detalle de pantallas transversales de la rápida del PERPG	52
Fotografía C1. Estructura de disipación tipo rápida del PERPG	52
Fotografía C2. Vista lateral de la estructura de disipación del PERPG	52
Fotografía C3. Elaboración del ensayo de límite líquido.....	52
Fotografía C4. Elaboración del ensayo de límite plástico.....	52
Fotografía C5. Elaboración del ensayo de granulometría	52

RESUMEN

Las estructuras de disipación de energía son elementos fundamentales para realizar el diseño y la construcción de diversas estructuras hidráulicas, que tiene por objeto disipar la energía cinética que el agua adquiere en su caída desde la zona de entrada hasta el fondo del cauce, para no generar fenómenos de erosión o socavación. Asimismo, dependiendo al tipo de estructura hidráulica y otros factores, se debe tener en claro el tipo de estructura de disipación a aplicar, por lo que los tipos de disipadores y tipos de pozas amortiguadoras se encuentran completamente desarrollados en el presente trabajo de Suficiencia Profesional, cada uno con su respectivo diseño y comentario adicional. Además de ello se desarrolló también un ejemplo aplicativo, que será de mucha utilidad al diseñador, dicho caso está acompañado de la comparación de resultados del diseño aplicado en el ejemplo con los planos que fueron brindados por el PERPG.

Palabras clave: Diseño, disipación, hidráulica

ABSTRACT

The structures of energy dissipation are fundamental elements for the design and construction of various hydraulic structures, which aims to dissipate the kinetic energy that water acquires in its fall from the entrance area to the bottom of the channel, not to generate Erosion or scour phenomena. Also, depending on the type of hydraulic structure and other factors, it should be clear the type of dissipation structure to be applied, so the types of dissipaters and types of buffer pools are fully developed in the present work of Professional Proficiency, each one with its respective design and additional comment. In addition to this, an application example was also developed, which will be very useful to the designer, this case is accompanied by the comparison of the results of the design applied in the example with the plans that were provided by the PERPG.

Key words: Design, dissipation, hydraulics

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El diseño correcto de estructuras hidráulicas es de mucha importancia en nuestro país, ya que como sabemos contamos con una naturaleza impredecible, que en algunos casos puede no ser favorable para el diseño óptimo de las estructuras hidráulicas. En caso de errar en algún cálculo o por falta de criterio, se puede tener pérdidas invaluable como gastos de rediseño, demolición, mantenimiento, u otros; o hasta en el peor de los casos pérdidas humanas.

El presente trabajo proporciona al diseñador una fuente de información teórica y práctica, de mucha utilidad para realizar el diseño eficiente de estructuras de disipación; asimismo se presenta un caso aplicativo del diseño de una rápida correspondiente al Sifón de Tumilaca del Proyecto Especial Regional Pasto Grande, Moquegua, para el cual se realizó el diseño topográfico, geológico, hidráulico y geométrico.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Proporcionar parámetros de diseños de estructuras de disipación más comunes y analizarlas.

2.2 Objetivos específicos

Comparar y comentar resultados de obras de disipación ejecutadas en la Región Moquegua.

Describir los criterios que se deben tener en cuenta para el diseño.

Brindar conceptos teóricos básicos del tema.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TEMA

3.1 Marco teórico

3.1.1 Disipación de energía

Los disipadores de energía son dispositivos diseñados para proteger las zonas aguas abajo de la erosión reduciendo la velocidad del flujo a límites aceptables.

3.1.1.1 Función de disipadores de energía

Prevenir el impacto en los cauces en ríos y minimizar la erosión, para poder prevenir problemas en las estructuras hidráulicas.

3.1.2 Resalto hidráulico

El resalto o salto hidráulico es un fenómeno local, que se presenta en el flujo rápidamente variado, el cual presenta un aumento súbito del tirante y una pérdida de energía bastante considerable, en un tramo relativamente corto. Ocurre en el paso brusco de régimen supercrítico (rápido) a régimen subcrítico (lento), es decir que el tirante cambia de un valor inferior a otro superior.

Se produce generalmente luego del paso por una compuerta, aguas debajo de un vertedero o cuando la pendiente alta se vuelve casi horizontal. Esto sucede al pie de estructuras hidráulicas tales como vertederos de demasías, rápidas, caídas, etc. Como lo representa la figura 1.

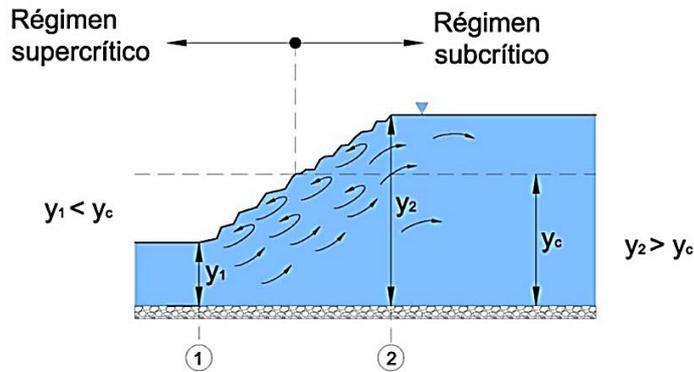


Figura 1. Resalto hidráulico

Fuente: Gálvez, 2006

(Chow, 2004) afirma que el resalto se utiliza para:

- Disipar la energía del agua que fluye sobre presas, vertederos y otras estructuras.
- Prevención o confinamiento de la socavación aguas debajo de las estructuras hidráulicas donde es necesario disipar energía.
- Mezclado eficiente de fluidos o de sustancias químicas usadas en la purificación de aguas, debido a la naturaleza fuertemente turbulenta del fenómeno.
- Incremento del caudal descargado por una compuerta deslizante al rechazar el retroceso del agua contra la compuerta. Esto aumenta la carga efectiva y con ella el caudal.

3.1.3 Tipos de disipadores

3.1.3.1 Caídas

Las caídas son estructuras de obra de arte ubicadas en canales que presenten un desnivel de hasta 4,5 m de altura. Estas estructuras pueden ser verticales o inclinadas; cuya descripción y diseño se presenta continuamente.

a. Caídas verticales

“Las caídas verticales, figura 2, se diseñan para canales en los que el desnivel no exceda de 1,0 m y además presente caudales pequeños” (Autoridad Nacional del agua, 2010, pág. 121)

En caso que el terreno presente mayor desnivel que 1,0 m, se puede hacer una excepción y diseñar como caída vertical, pero solo si sus características lo permiten.



Figura 2. Caída vertical

– *Elementos de una caída vertical*

Los elementos, se pueden visualizar en la figura 3.

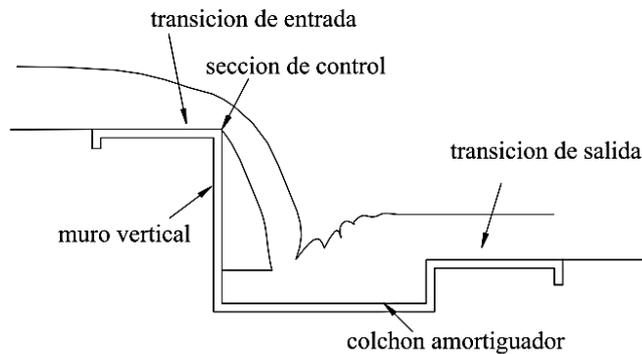


Figura 3. Elementos de una caída vertical

Fuente: Torres Herrera, 2010

– *Transición de entrada*

Que une por medio de un estrechamiento progresivo la sección del canal superior con la sección de control.

– *Sección de control*

Es la sección correspondiente al punto donde se inicia la caída, cercano a este punto se presentan las condiciones críticas.

– *Caída*

La cual es de sección rectangular y puede ser vertical o inclinada.

– *Poza disipadora o colchón amortiguador*

Es de sección rectangular, siendo su función la de absorber la energía cinética del agua al pie de la caída.

Si las características hidráulicas de la caída vertical lo requieren, el colchón se puede diseñar del tipo SAF o USBR.

– **Transición de Salida**

Une la poza de disipación con el canal aguas abajo.

– **Diseño de una caída vertical (Según Rand)**

– **PASO 1.** El caudal vertiente en el borde superior de la caída se calcula con la fórmula para caudal unitario “q”.

$$q = 1,48. H^{3/2} \quad \text{Ecuación.....(1)}$$

Siendo el caudal total:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot B \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H^{3/2} \quad \text{Ecuación.....(2)}$$

Donde:

$$\mu = 0,50$$

B = ancho de la caída

– **PASO 2.** La geometría del flujo de agua se muestra en la gráfica 4.

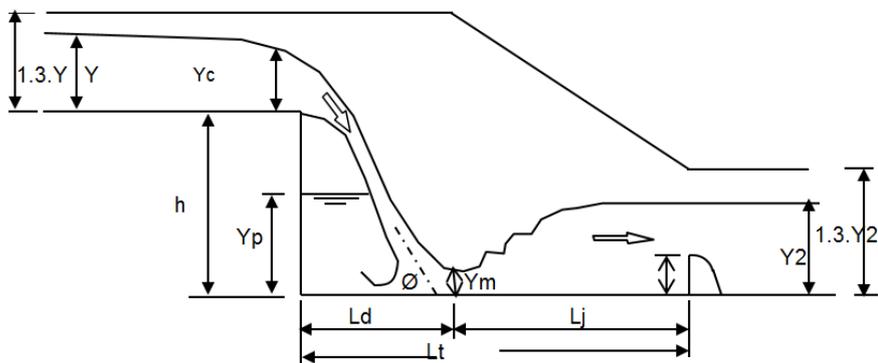


Figura 4. Dimensiones de la caída vertical

Y se determinará aplicando las siguientes formulas:

$$Ld = 4,30 * D^{0,27} * h \quad \text{Ecuación.....(3)}$$

$$Yp = D^{0,22} * h \quad \text{Ecuación.....(4)}$$

$$Y_1 = 0,54 * D^{1,425} * h \quad \text{Ecuación.....(5)}$$

$$Y_2 = 1,66 * D^{0,27} * h \quad \text{Ecuación.....(6)}$$

$$Lj = 6,9 * (Y_2 - Y_1) \quad \text{Ecuación.....(7)}$$

$$Lt = Ld + Lj \quad \text{Ecuación.....(8)}$$

$$D = \frac{q^2}{g * h^3} \quad \text{Ecuación.....(9)}$$

$$\emptyset = \arccos * \frac{1,06}{\sqrt{\frac{h}{Y_c} + \frac{3}{2}}} \quad \text{Ecuación.....(10)}$$

– Recomendaciones

No es necesario diseñar la poza de disipación en los casos en que el desnivel sea \leq 0,30 m y el caudal \leq 300 L/s por metro de ancho del canal.

Estas estructuras son las más usadas debido a la simplicidad de su diseño, en caso de que el terreno tenga desniveles muy altos, se puede usar caídas escalonadas.

b. Caídas inclinadas

“Las caídas inclinadas se diseñan para canales en los que el desnivel esté dentro del rango de 1,0 m a 4,5 m; si excede esta medida se le denomina rápida.” (Torres Herrera, 2010, pág. 275)

Se debe tener mucha consideración en el revestimiento ya que estas estructuras pueden producir erosión, como en el caso del canal de la figura 5.



Figura 5. Caída inclinada

– Elementos de una caída inclinada

Los elementos se pueden visualizar en la figura 6.

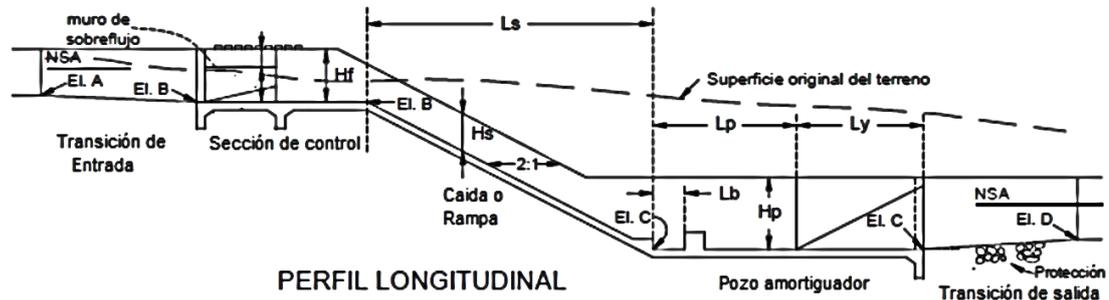


Figura 6. Elementos de una caída inclinada

Fuente: BUREAU OF RECLAMATION, 1984

– Transición de entrada

Produce un cambio gradualmente de la velocidad del agua en el canal hacia la entrada, cambiando también la sección del canal de trapecoidal a rectangular si esto fuera necesario.

– Sección de control

La sección de control tiene por finalidad mantener el flujo aguas arriba en régimen tranquilo y corresponde al punto donde comienza el tramo inclinado, manteniéndose en este punto el régimen crítico.

– Tramo inclinado o caída

El tramo inclinado es de sección rectangular tiene el mismo ancho que la entrada y poza de disipación.

– Poza de disipación

Es de sección rectangular y su función es de disipar la energía cinética generada en el flujo del agua en el tramo inclinado, mediante un resalto hidráulico y contener este resalto dentro de la poza.

– *Transición de salida*

Une la poza de disipación con el canal aguas abajo.

c. Rápidas

“Las rápidas son similares a las caídas, excepto que ellas transportan el agua sobre distancias más largas, con pendientes más suaves” (Autoridad Nacional del agua, 2010, pág. 97)

En la figura 7 se presenta una rápida con pantallas transversales, esto debido a lo alto del desnivel del terreno, logrando una mejor disipación de la energía.



Figura 7. Rápida con pantallas transversales

– *Elementos de una rápida*

Los elementos se pueden visualizar en la figura 8.

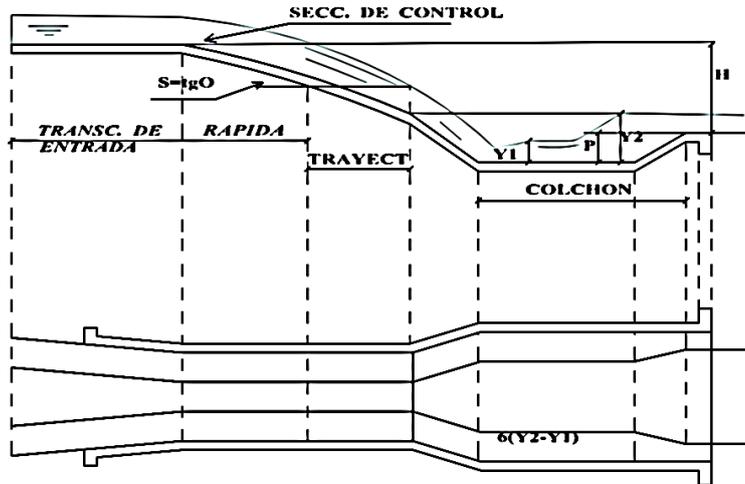


Figura 8. Elementos de una rápida

Fuente: Villamarin, 2013

– *Transición de entrada*

– *Sección de control*

Es la sección correspondiente al punto donde comienza la pendiente fuerte de la rápida.

– *Canal de la rápida*

Es la sección comprendida entre la sección de control y el principio de la trayectoria, puede tener de acuerdo a la configuración del terreno una o varias pendientes, pudiendo ser de sección trapezoidal o rectangular.

– *Trayectoria*

– *Tanque o colchón amortiguador*

– *Transición de salida*

– *Diseño de una rápida, según ANA, 2010, pág. 98*

– *PASO 1. Diseño del canal aguas arriba*

Aplicamos la fórmula de MANNING

$$Q = \frac{A * R^{2/3} * S^{1/2}}{n} \quad \text{Ecuación.....(11)}$$

Calculo de borde libre

$$BL = 0,3 * Yn \quad \text{Ecuación.....(12)}$$

– *PASO 2. Diseño de la transición entre canal y rápida*

Determinación del gasto unitario

$$q = 1,71 * H^{3/2} \quad \text{Ecuación.....(13)}$$

Ancho de la caída (B)

$$B = \frac{Q}{q} \quad \text{Ecuación.....(14)}$$

Transición de entrada

$$X_1 = \frac{B1 - B2}{2} \quad \text{Ecuación.....(15)}$$

$$LT_e = \frac{X_2}{\tan 25} \quad \text{Ecuación.....(16)}$$

– *PASO 3. Diseño hidráulico de la rápida*

Cálculo de los tirantes de escurrimiento en la rápida

La longitud total se divide en varios tramos de igual longitud

$$L = \sqrt{(\Delta h1^2 + \Delta L^2)} \quad \text{Ecuación.....(17)}$$

Se aplica el teorema de Bernoulli, mediante el método de incrementos finitos

$$\Delta h_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2 * g} = Y_2 + \frac{V_2^2}{2 * g} + \left(\frac{V_n}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2 * \Delta L \quad \text{Ecuación.....(18)}$$

El valor de la energía es:

$$E = Y + \frac{V^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación.....(19)}$$

Por lo tanto el Bernoulli debe cumplirse para la igualdad

$$\Delta h_1 + E_1 = E_2 + hf(1 - 2) \quad \text{Ecuación.....(20)}$$

Se elabora una tabla con respecto a los tirantes

Posteriormente se realiza una gráfica Energía vs Tirante. En la cual se ubicará el tirante critico en el eje de las abscisas, se intercepta la curva E y se agrega Δh_1 , y así sucesivamente. Se obtienen n tirantes aplicando la fórmula 18.

– Paso 4. Cálculo del colchón amortiguador

Se calcula la curva I y II, su cálculo de detallará en el caso práctico

A continuación se aplica ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{Q * V}{g} + A\dot{Y} = M \quad \text{Ecuación.....(21)}$$

$$\dot{Y} = \left(\frac{Y}{3} \right) * \left(\frac{2 * b + T}{b + T} \right) \quad \text{Ecuación.....(22)}$$

– Paso 5. Comprobación del funcionamiento del colchón

Se aplica la ecuación de la cantidad de movimiento, debiéndose cumplirse que:

$$\frac{Q^2}{g * A_1} + A_1 * \hat{Y}_1 = \frac{Q}{g * A} + A_2 * \hat{Y}_2 \quad \text{Ecuación.....(23)}$$

Se debe cumplir también la siguiente relación:

$$Y_2 + \frac{V_2^2}{2 * g} \leq \text{Altura del colchón} + Y_n + \frac{V_n^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación.....(24)}$$

– **Recomendaciones**

Diseñar este tipo de estructuras es más complejo que diseñar caídas, pero debido a la topografía de la región, es necesario tener conocimientos y criterios para lograr un diseño óptimo.

3.1.4 Tipos de pozas amortiguadoras

3.1.4.1 Cuenco disipador Tipo 2 o USBR II

“Este tipo de disipadores son utilizados cuando el número de Froude está por encima de 4,5 o velocidades mayores a 15 m/s” (Chow, 2004, pág. 414)

No se utilizan bloques de impacto debido a que las velocidades relativamente altas que entran al resalto pueden causar cavitación en dichos bloques.

En la figura 9 se muestran los detalles constructivos y los datos necesarios para el cálculo.

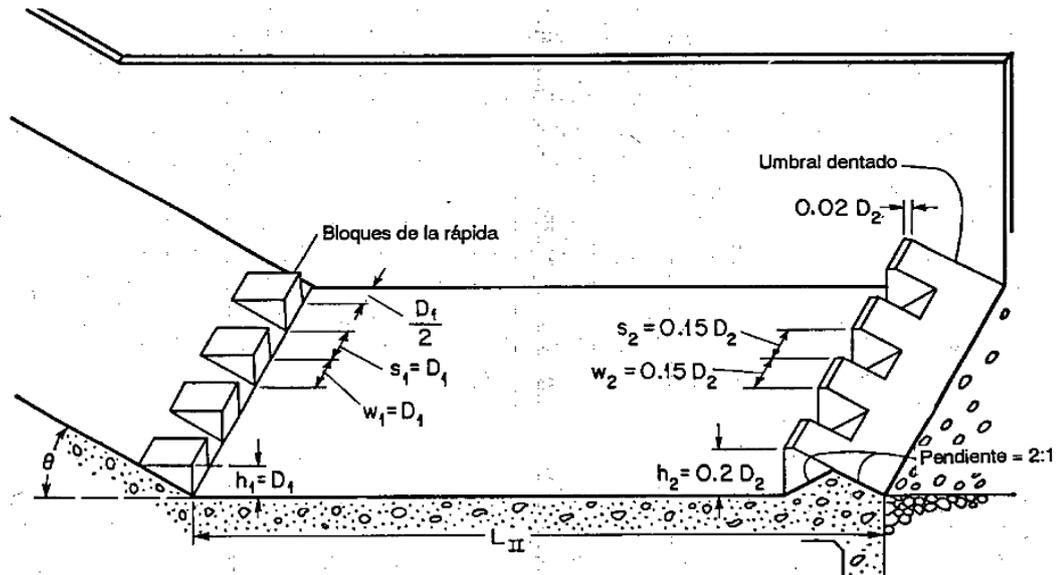


Figura 9. Estanque amortiguador tipo II

Fuente: BUREAU OF RECLAMATION, 1984

a. Metodología del diseño

– Paso 1. Calcular el valor del tirante de agua en el estanque (TA).

$$TA = Y_1 * (1,469 * Fr_1 - 0,318) \quad \text{Ecuación.....(25)}$$

– Paso 2. Cálculo del tirante conjugado

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8 * Fr_1^2 + 1} - 1 \right) \quad \text{Ecuación.....(26)}$$

– Paso 3. Cálculo de la longitud del estanque amortiguador tipo II

$$L_{II} = Y_2 * (3,55 + 0,06 * Fr_1 - 0,00015 * Fr_1^2) \quad \text{Ecuación.....(27)}$$

– Paso 4. Calcular el número de dientes (n)

$$n = \frac{b}{2 * Y_1} \quad \text{Ecuación.....(28)}$$

Aproximar al valor inmediato inferior y entero

– Paso 5. Cálculo de las dimensiones de los dientes deflectores

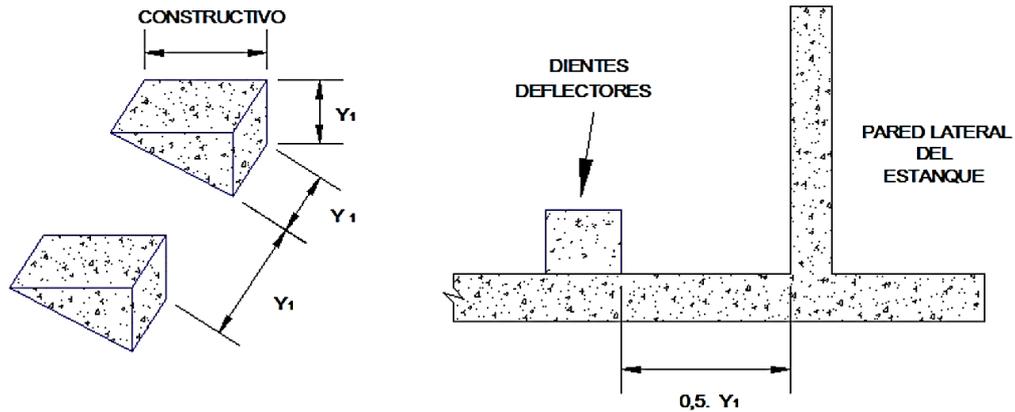


Figura 10. Dimensión de dientes

Fuente: Villamarin, 2013

- Altura de los dientes deflectores = Y_1
- Largo = Largo constructivo pasando una horizontal por la altura del diente hasta la altura de la superficie del cimacio o de la rápida
- Espacio entre dientes = Y_1
- Espacio fraccional = $0,5 * Y_1$

– Paso 6. Cálculo del dimensionamiento del umbral terminal

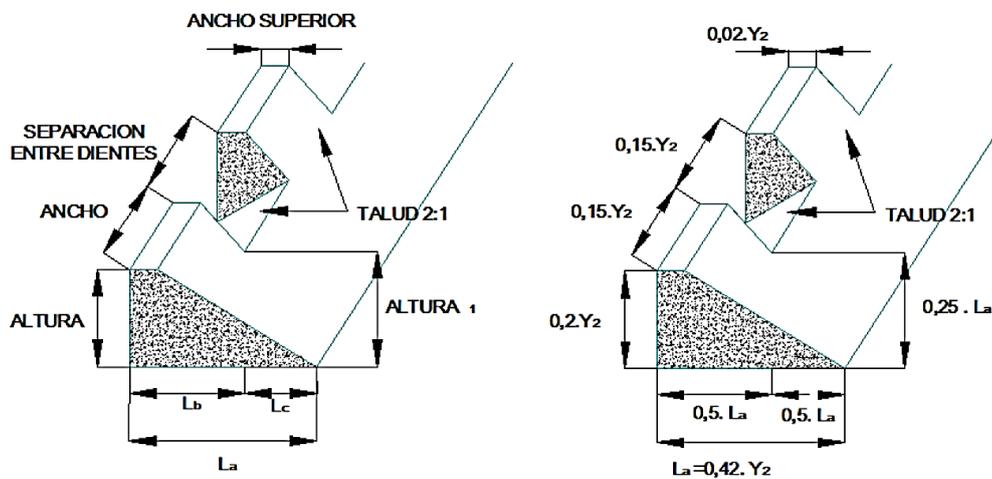


Figura 11. Dimensión del umbral

Fuente: Villamarin, 2013

- Longitud del umbral $L_a = 0,42 * Y_2$
- Longitud $L_b = 0,50 * L_a$
- Altura del umbral $= 0,20 * Y_2$
- Altura 1 $= 0,25 * Y_2$
- Ancho $= 0,15 * Y_2$
- Separación entre dientes $= 0,15 * Y_2$
- Ancho superior del diente $= 0,02 * Y_2$

3.1.4.2 Cuenco dissipador Tipo 3 o SAF

Los estanques amortiguadores tipo III son más cortos que los del tipo II, y poseen un umbral de salida y dados amortiguadores aguas abajo de los bloques de caída.

“Son utilizados en pequeños vertederos, estructuras de salida, y en pequeñas estructuras de canal donde la velocidad no excede de 15 a 18 m/s y el número de Froude $Fr_1 > 4,5$ ” (Chow, 2004, pág. 413)

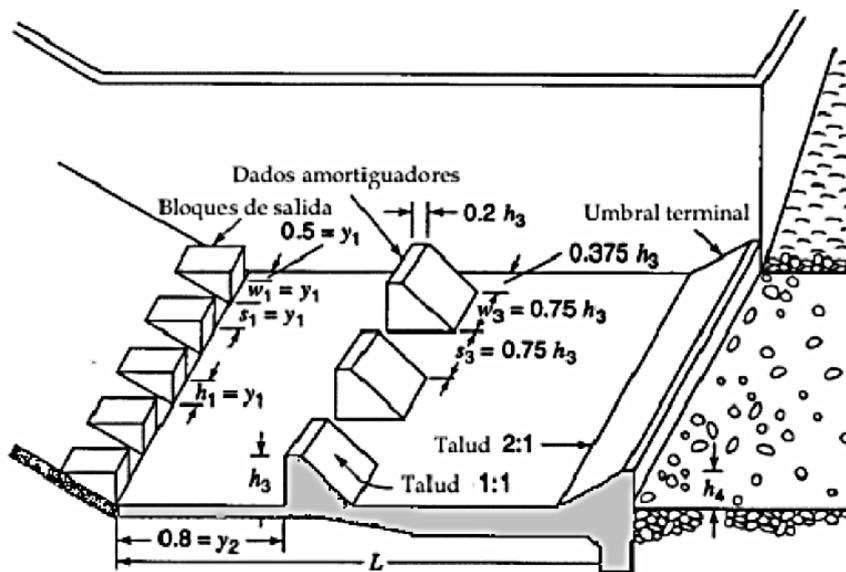


Figura 12. Estanque amortiguador de tipo III

Fuente: BUREAU OF RECLAMATION, 1984

a. Metodología del diseño

– Paso 1. Calcular el valor del tirante de agua en el estanque (TA)

$$TA = Y_1 * (1,42 * FR_1 - 0,604) \quad \text{Ecuación.....(29)}$$

– Paso 2. Cálculo del tirante conjugado

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8 * Fr_1^2 + 1} - 1 \right) \quad \text{Ecuación.....(30)}$$

– Paso 3. Cálculo de la longitud del estanque amortiguador tipo II

$$L_{II} = Y_2 * (1,62 + 1,178 * F_{R1} - 0,007 * F_{R1}^2) \quad \text{Ecuación.....(31)}$$

– Paso 4. Cálculo de las dimensiones de los dientes deflectores

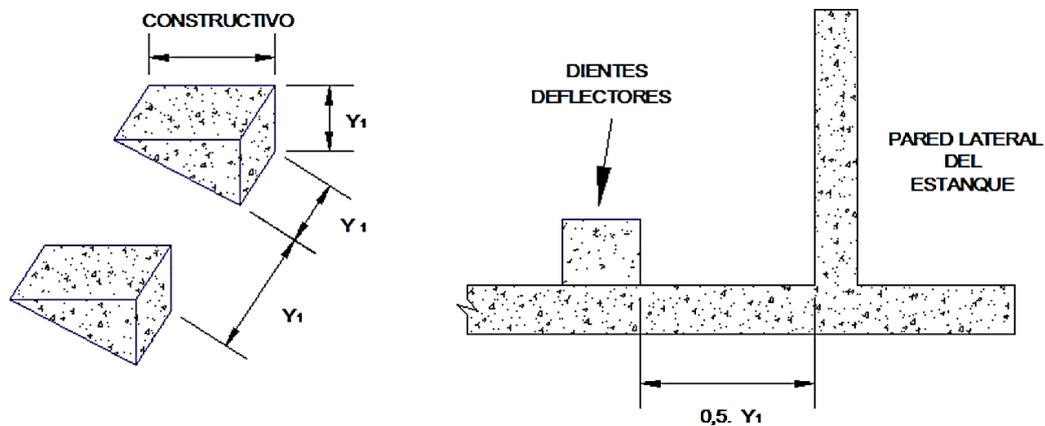


Figura 13. Dimensión de dientes

Fuente: Villamarín, 2013

- Altura = Y_1
- Ancho = Y_1
- Largo = Constructivo pasando una horizontal por la altura del diente hasta la altura de la superficie del cimacio o de la rápida.
- Espacio entre dientes = Y_1
- Espacio fraccional = $0,5 * Y_1$

– Paso 5. Calcular el número de dientes (n)

$$n = \frac{b}{2 * Y_1} \quad \text{Ecuación.....(32)}$$

– Paso 6. Cálculo de las dimensiones de los dados amortiguadores

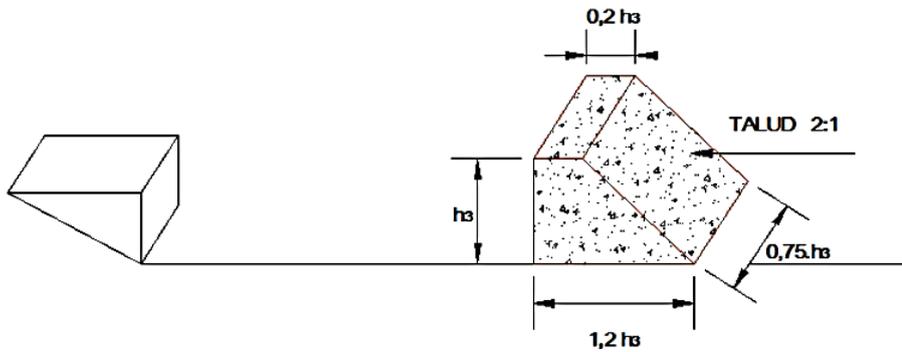


Figura 14. Dimensión de dados

Fuente: Villamarín, 2013

Cálculo de h_3 (altura):

$$h_3 = Y_1 * (0,545 + 0,175 * F_{R1}) \quad \text{Ecuación.....(33)}$$

Cálculo de las dimensiones de los dados amortiguadores

$$d_2 = \frac{L_{II}}{1,071 + 0,358 * F_{R1}^2 + 0,00055 * F_{R1}^3} \quad \text{Ecuación.....(34)}$$

- Altura = h_3
- Ancho = $0,75 * h_3$
- Largo = $1,20 * h_3$
- Ancho superior = $0,20 * h_3$
- Espacio entre dados = $0,75 * h_3$

- Espacio fraccional = $0,375 * h_3$
- Ubicación = $0,80 * d_2$

– Paso 7. Calcular el número de dados(n)

$$n = \frac{b}{1,5 * h_3}$$

Ecuación.....(35)

Donde:

b = ancho del estanque

– Paso 8. Cálculo del dimensionamiento del umbral terminal

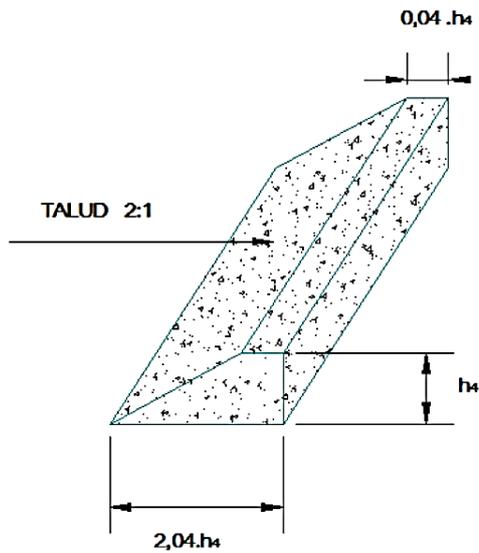


Figura 15. Dimensión de umbral

Fuente: Villamarín, 2013

- Altura: h_4

$$h_4 = Y_1 * (0,956 + 0,063 * F_{R1})$$

Ecuación.....(36)

- Cara superior del umbral = $0,04 * h_4$
- Largo = $2,04 * h_4$

3.1.4.3 Cuenco dissipador Tipo 4 o USBR IV

“Cuando el número de Froude está comprendido entre 2,5 y 4,5, se producirá un resalto oscilante en el estanque amortiguador, el cual genera una onda que es difícil de atenuar” (Chow, 2004, pág. 413)

El estanque amortiguador tipo IV se diseña para combatir este problema eliminando la onda en su fuente.

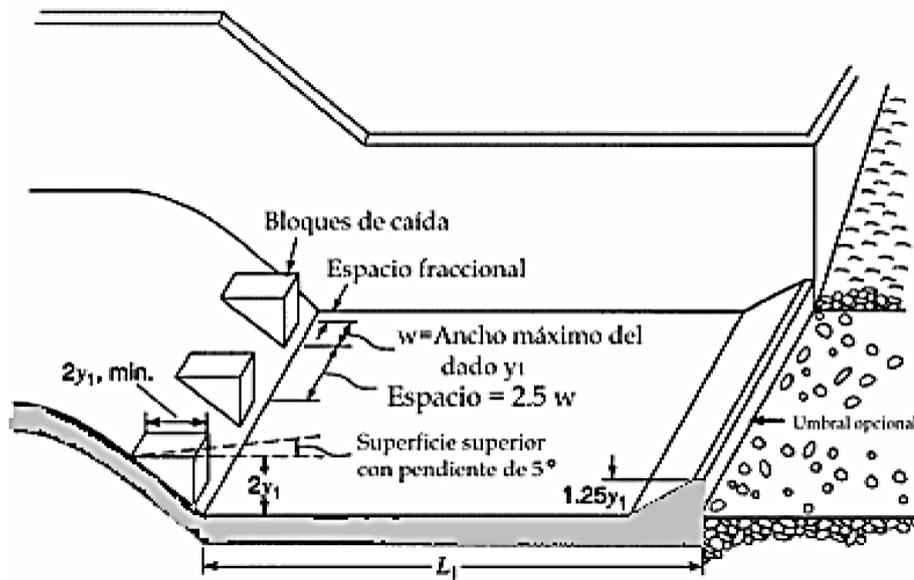


Figura 16. Estanque amortiguador tipo IV

Fuente: BUREAU OF RECLAMATION, 1984

a. Metodología del diseño

– Paso 1. Calcular el valor del tirante de agua en el estanque (TA)

$$TA = Y_1 * (1,539 * Fr_1 - 0,471) \quad \text{Ecuación.....(37)}$$

– Paso 2. Cálculo del tirante conjugado

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8 * Fr_1^2 + 1} - 1 \right) \quad \text{Ecuación.....(38)}$$

– Paso 3. Cálculo de la longitud del estanque amortiguador tipo IV

$$L_1 = Y_2 * (1,5 + 1,768 * F_{R1} - 0,471 * F_{R1}^2) \quad \text{Ecuación.....(39)}$$

– Paso 4. Calcular el número de dientes (n)

$$n = \frac{(b + 2,5 * Y_1)}{3,5 * Y_1} \quad \text{Ecuación.....(40)}$$

Aproximar al valor inmediato inferior y entero

– Paso 5. Cálculo de la dimensión de los dientes deflectores

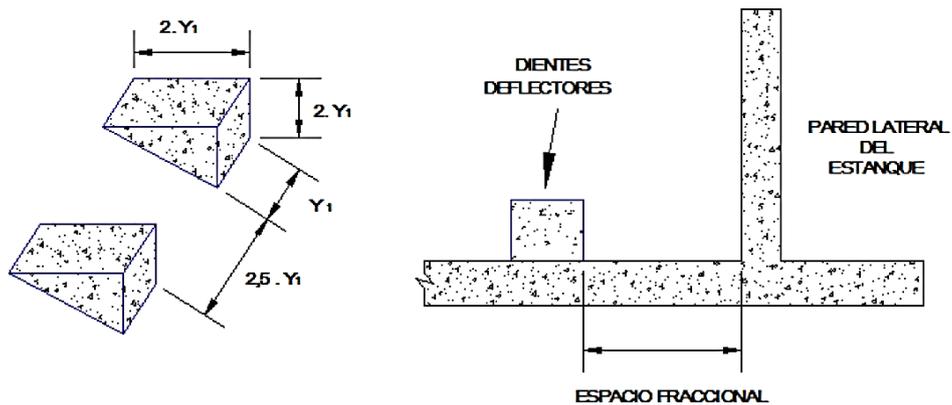


Figura 17. Dimensión de dientes

Fuente: Villamarín, 2013

- Altura = $2,0 * Y_1$
- Ancho = Y_1
- Largo = $2,0 * Y_1$
- Espacio entre dientes = $2,5 * Y_1$
- Espacio fraccional = $\frac{[b - (3,5 * Y_1 * n - 2,5 * Y_1)]}{2,0}$

– Paso 6. Cálculo del dimensionamiento del umbral terminal

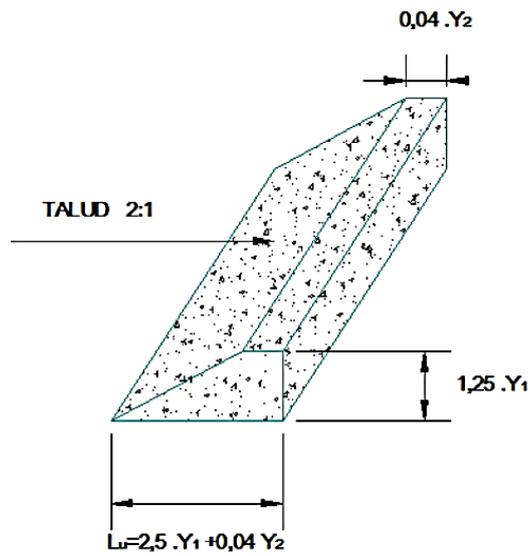


Figura 18. Dimensión de umbral

Fuente: Villamarín, 2013

- Altura = $1,25 \cdot Y_1$
- Ancho superior = $0,04 \cdot Y_2$
- Ancho inferior = $L_u = 2,5 \cdot Y_1 + 0,04 \cdot Y_2$

3.2 Caso práctico

Para la aplicación del tema se eligió el diseño de una rápida como estructura de disipación. Los datos fueron tomados del canal ubicado en el Sifón Tumilaca correspondiente al Proyecto Especial Regional Pasto Grande, para lo cual se solicitó información acerca de la rápida con el objetivo de evaluar y comparar resultados.

Para realizar el diseño vamos a tomar primeramente los factores topográficos, geológicos e hidráulicos, posteriormente realizaremos el diseño geométrico y estructural.

3.2.1 Factores topográficos

Se visitó el proyecto para hacer el reconocimiento del terreno y tomar muestras del suelo para ser ensayadas en laboratorio.

Primeramente se realizó el ensayo de granulometría en el laboratorio de suelos denominado “AB y G”, posteriormente se realizaron los ensayos para determinar el límite líquido y límite plástico, cuyos resultados se mostrarán en el Apéndice A.



Figura 19. Ensayo de límite líquido

Se procedió a clasificar el suelo, según el sistema de clasificación S.U.C.S., el nivel está conformado por arena limosa con grava, de color beige, partículas subangulares a subredondeadas, de nula plasticidad, de compacidad media, el suelo se muestra en la figura 20.



Figura 20. Terreno natural

3.2.2 Factores geológicos

Para poder realizar un diseño óptimo es necesario obtener un gasto máximo de diseño correcto. Este gasto lo podemos hallar con el método directo usando la fórmula de Manning, que se realiza visualizando el área máxima mojada después del paso de una avenida; o con el método racional el cual involucra datos de las precipitaciones ocurridas en la región y el periodo de retorno correspondiente al tipo de estructura.

Para el caso práctico estudiado, el gasto máximo de diseño, según la información que fue otorgada del P.E.R.P.G., es de 5 m³/s (5000 L/s).

3.2.3 Factores hidráulicos

Una vez realizado el factor geológico, se continuó con los factores hidráulicos, tomándose para este caso un tramo del canal del Proyecto Especial Regional Pasto Grande como se muestra en la figura 21.



Figura 21. Canal de PERPG

Se procedió a tomar las medidas del canal rectangular aguas arriba de la estructura con la ayuda de una caña, lo suficientemente grande para realizar las medidas, en la figura 22 se muestra la medida tomada de la base del canal.



Figura 22. Medición de la base del canal

La figura 23 muestra la medición del tirante del canal y la figura 24 el espesor de las paredes del canal.



Figura 23. Medición del tirante del canal



Figura 24. Medición del espesor de las paredes del canal

3.2.4 Determinación del caudal

Para la determinación del caudal de diseño se usó el método del flotador como lo muestran las figuras 25 y 26, para acercarnos más al valor real del caudal, se promediaron las dos velocidades obtenidas de las pruebas, usando primeramente como cuerpo flotante una botella de plástico, continuamente se realizó la segunda prueba con una naranja. La longitud del tramo en el que se realizó la prueba fue de 5,00 m.



Figura 25. Método del flotador con cuerpo flotante

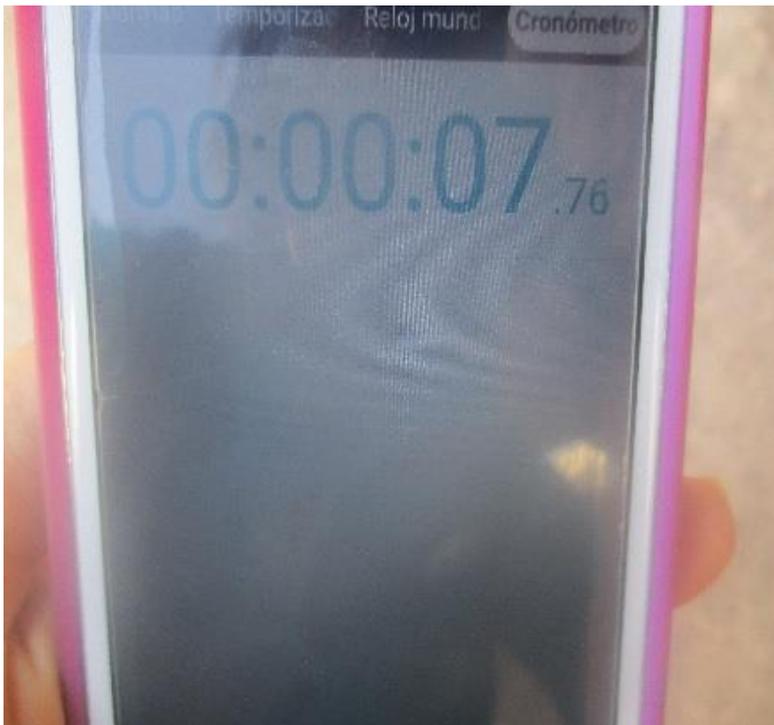


Figura 26. Tiempo de la prueba

Medidas del canal:

- B = 2,70 m.
- Y = 0,22 m.
- E = 0,20 m.

Datos promedio obtenidos con el método del flotador:

- Longitud: 5,00 m.
- Promedio de Tiempo: 8,20 s.

Por lo que se estima una velocidad de:

$$V = 0,60 \text{ m/s}$$

$$Q = V * A$$

Ecuación.....(41)

Aplicando la ecuación 41, se obtiene el caudal:

$$Q = 350 \text{ L/s}$$

El P.E.R.P.G. del Gobierno Regional brindo información y planos de la estructura estudiada (ver Apéndice A y B) que sirvieron de mucha ayuda para realizar el diseño de la rápida, como también para comparar resultados.

3.2.5 Diseño geométrico.

– Paso 1. Diseño del canal aguas arriba

Tenemos los siguientes datos para el canal, usaremos la fórmula de Manning

$$b = 3,10 \text{ m}$$

$$n = 0,03$$

$$S = 0,001$$

$$Q = 5,00 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Cota A} = 1581 \text{ m.s.n.m}$$

$$Q = \frac{A * R^{2/3} * S^{1/2}}{n} \quad \text{Ecuación.....(42)}$$

$$Q * n / (s^{1/2}) = A * (R^{2/3}) = [A^{5/3}] / [P^{2/3}]$$

Si se sabe que:

$$A = (b * Y_n)$$

$$P = b + (2 * Y_n)$$

$$Y_n = 1,75 \text{ m}$$

Con este tirante reemplazamos en las fórmulas y obtenemos:

$$\text{Área} = 5,425 \text{ m}^2$$

$$\text{Perímetro} = 6,600 \text{ m}$$

$$\text{Radio} = 0,822 \text{ m}$$

Espejo = 3,100 m

V = 0,922 m/s

h_v = 0,043 m

E=Y_n+h_v = 1,793 m

Cálculo de borde libre:

$BL = 0,3 * Y_n$ *Ecuación.....(43)*

BL = 0,58 m = 0,60 m

Resultados:

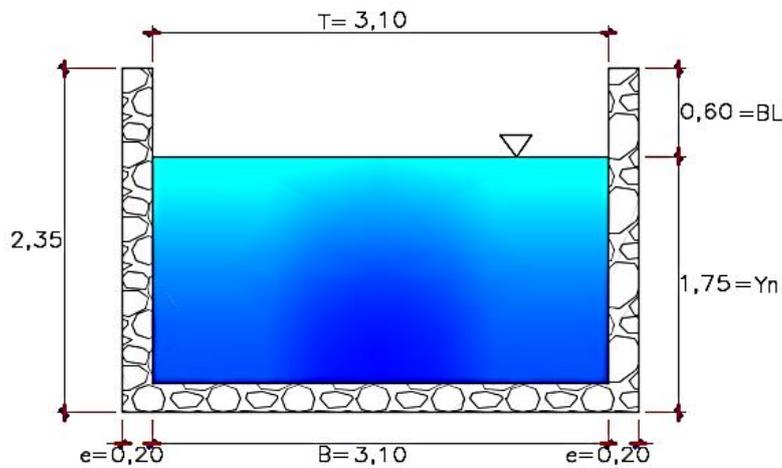


Figura 27. Medidas del canal

– Paso 2. Diseño de la transición entre canal y rápida

Longitud de Transición de entrada

Determinación del gasto unitario

$q = 1,71 * H^{3/2}$ *Ecuación.....(44)*

$q = 4,107 m^3/s * m$

Ancho de la caída

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

Ecuación.....(45)

$$B = 1,22 \text{ m}$$

Transición de entrada

$$B_1 = 3,10 \text{ m}$$

$$B_2 = 1,22 \text{ m}$$

$$X_1 = \frac{B_1 - B_2}{2}$$

Ecuación.....(46)

$$X_1 = 0,941 \text{ m}$$

$$LT_e = \frac{X_2}{\tan 25}$$

Ecuación.....(47)

$$Lte = 4,246 \text{ m.} = 4,20 \text{ m}$$

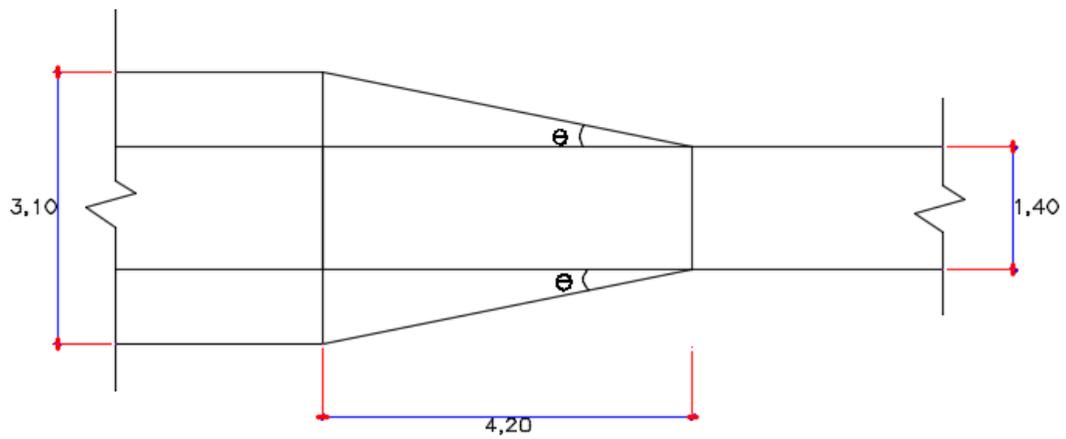


Figura 28. Vista en planta de zona de transición de canal

– *Paso 3. Diseño hidráulico de la rápida*

– *Características de la rápida*

Con la ayuda del perfil del terreno se definieron las siguientes características:

$$\text{Pendiente } S1 = 0,710$$

$$\text{Pendiente } S2 = 0,710$$

$$\text{Tramo } L = 26,500 \text{ m}$$

$$n = 0,030 \quad (\text{revestido con concreto})$$

$$b = 1,400 \text{ m}$$

$$z = 0,00 \quad (\text{sección de la rápida rectangular})$$

Entonces:

$$Y_c = 1,091$$

$$A_c = 1,528 \text{ m}^2$$

$$V_c = 3,272 \text{ m/s}$$

$$H_{vc} = 0,546$$

$$E_c = 1,637 \text{ m}$$

$$T = 1,400 \text{ m}$$

– *Cálculo de los tirantes de escurrimiento en la rápida*

A la longitud horizontal de 26,50 m se la divide en 10 tramos iguales de 2,65 m

Las longitudes inclinadas serán:

Para pendientes $S_1 = 0,71$

$$\Delta h_1 = 1,882$$

$$L = \sqrt{(\Delta h_1^2 + \Delta L^2)} \quad \text{Ecuación.....(48)}$$

$$L = 3,25 \text{ m}$$

Se aplica el teorema de Bernoulli, mediante el método de incrementos finitos:

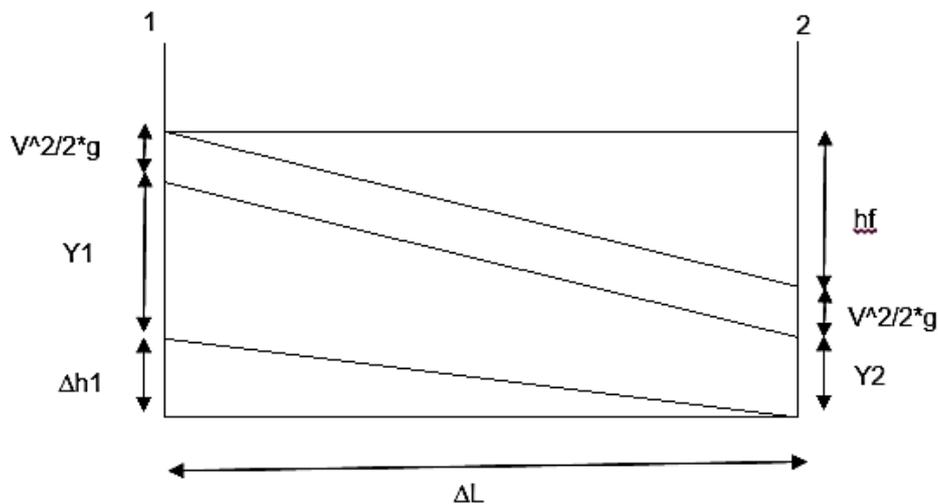


Figura 29. Gradiente de energía

Confeccionamos la tabla 1, teniendo en cuenta que:

$$\Delta h_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2} * g = Y_2 + V_2^2/2 * g + (V_n/R^{(2/3)})^2 * \Delta L \quad \text{Ecuación.....(49)}$$

El valor de la energía es:

$$E = Y + V^2/2 * g \quad \text{Ecuación.....(50)}$$

Por lo tanto el Bernoulli debe cumplirse para la igualdad:

$$\Delta h_1 + E_1 = E_2 + hf(1 - 2)$$

Ecuación.....(51)

Plasmando el perfil del terreno, obtenemos la gráfica 30

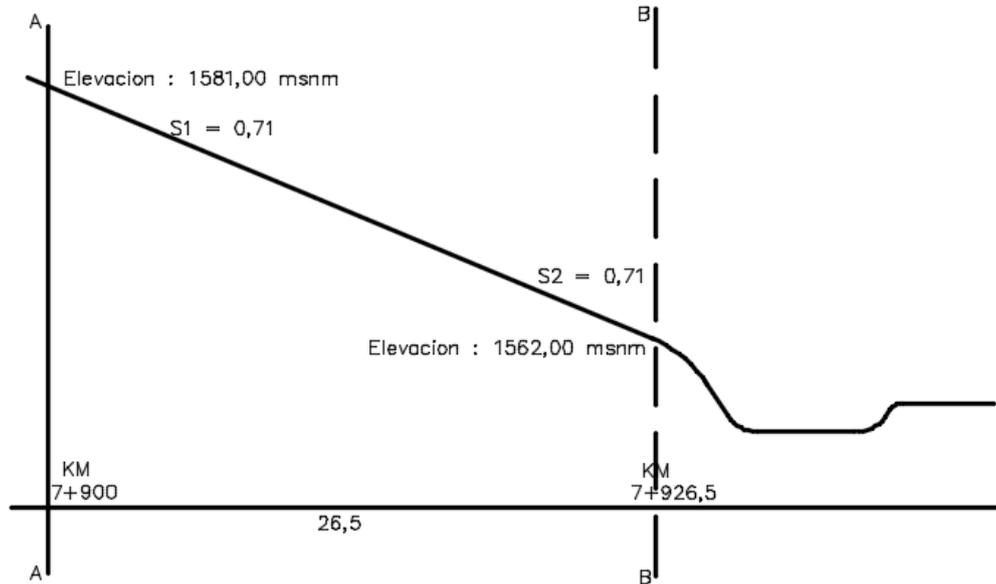


Figura 30. Perfil del terreno

Tabla 1
Teorema de Bernoulli para tramos finitos para $S1 = 0,71$

Y	A	P	R	$R^{(2/3)}$	V	$V^2/2g$	E	hf1	E + hf1
0,100	0,140	1,600	0,088	0,197	35,714	65,077	65,177	96,043	161,220
0,200	0,280	1,800	0,156	0,289	17,857	16,269	16,469	11,149	27,618
0,300	0,420	2,000	0,210	0,353	11,905	7,231	7,531	3,321	10,852
0,400	0,560	2,200	0,255	0,402	8,929	4,067	4,467	1,445	5,913
0,500	0,700	2,400	0,292	0,440	7,143	2,603	3,103	0,772	3,875
0,600	0,840	2,600	0,323	0,471	5,952	1,808	2,408	0,467	2,875
0,700	0,980	2,800	0,350	0,497	5,102	1,328	2,028	0,309	2,337
0,800	1,120	3,000	0,373	0,518	4,464	1,017	1,817	0,217	2,034
0,900	1,260	3,200	0,394	0,537	3,968	0,803	1,703	0,160	1,863
1,000	1,400	3,400	0,412	0,553	3,571	0,651	1,651	0,122	1,773

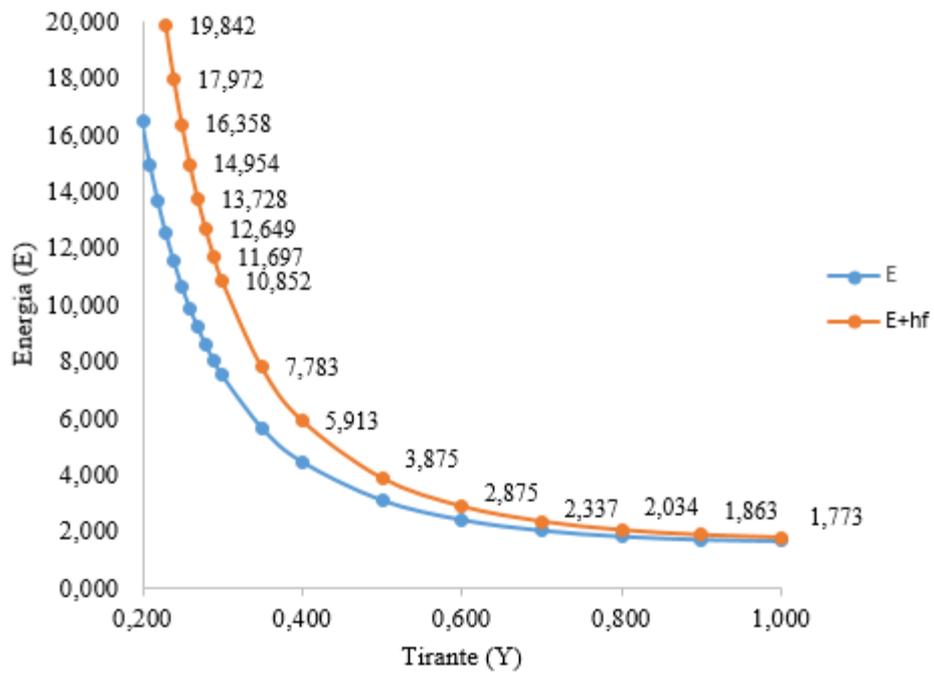


Figura 31. Energía vs tirante

Entonces obtendremos 9 tirantes:

$$Y1 = 0,550 \text{ m}$$

$$Y2 = 0,380 \text{ m}$$

$$Y3 = 0,340 \text{ m}$$

$$Y4 = 0,320 \text{ m}$$

$$Y5 = 0,310 \text{ m}$$

$$Y6 = 0,300 \text{ m}$$

$$Y7 = 0,290 \text{ m}$$

$$Y8 = 0,280 \text{ m}$$

$$Y9 = 0,275 \text{ m}$$

$$Y_c = 1,091 \text{ m}$$

$$\Delta h_1 = 1,88 \text{ m}$$

$$\Delta L = 2,65 \text{ m}$$

$$1,88 + 1,091 + 0,546 = 0,550 + 2,151 + 0,816$$
$$3,517 = 3,517$$

– ***Paso 4. Cálculo del colchón amortiguador***

– ***Cálculo de la curva I***

Donde se produce el tirante $Y_{10} = 0,275\text{m}$, se tiene:

$$Y_9 = 0,275 \text{ m}$$

$$\text{Estación} = 7+926,5$$

$$A = 0,385 \text{ m}^2$$

$$V = 12,99 \text{ m/s}$$

$$V^2/2 \cdot g = 8,605$$

$$\text{cota fondo} = 1562,00 \text{ m.s.n.m}$$

$$E = 8,880$$

La elevación de la línea de energía en la estación 7+926,5 será:

Cota de fondo + Energía específica

$$1562,00 + 8,88 = 1570,88$$

Asumiendo tirantes menores a Y9, calculamos a la energía específica para los tirantes asumidos y luego sus respectivas elevaciones respecto a la línea de energía de la estación 7+926,5.

Tabla 2
Elevaciones – tirantes en el canal de la rápida

Y(m)	A (m ²)	V (m/s)	V ² /2g (m)	Y+ V ² /2g	elevación
0,275	0,385	12,987	8,596	8,871	1562,0088
0,270	0,378	13,228	8,918	9,188	1561,6924
0,265	0,371	13,477	9,257	9,522	1561,3577
0,260	0,364	13,736	9,617	9,877	1561,0033
0,255	0,357	14,006	9,998	10,253	1560,6274
0,250	0,350	14,286	10,402	10,652	1560,2285
0,245	0,343	14,577	10,831	11,076	1559,8046

– Cálculo de la curva II:

Elaboramos tabla 3, a partir de la ecuación de la cantidad de movimiento.

Donde:

$$Q * V / g + A\ddot{Y} = M \quad \text{Ecuación.....(52)}$$

$$\ddot{Y} = (Y/3) * ((2 * b + T) / (b + T)) \quad \text{Ecuación.....(53)}$$

Tabla 3
Tirante – fuerza específica

Y	A	V = Q/A	QV	QV/g	T	Ÿ	A*Ÿ	M
0,05	0,070	71,429	357,143	36,443	1,40	0,0250	0,0018	36,445
0,10	0,140	35,714	178,571	18,222	1,40	0,0500	0,0070	18,229
0,30	0,420	11,905	59,524	6,074	1,40	0,1500	0,0630	6,137
0,40	0,560	8,929	44,643	4,555	1,40	0,2000	0,1120	4,667
0,50	0,700	7,143	35,714	3,644	1,40	0,2500	0,1750	3,819
0,60	0,840	5,952	29,762	3,037	1,40	0,3000	0,2520	3,289
0,70	0,980	5,102	25,510	2,603	1,40	0,3500	0,3430	2,946
0,80	1,120	4,464	22,321	2,278	1,40	0,4000	0,4480	2,726
0,86	1,207	4,143	20,716	2,114	1,40	0,4310	0,5201	2,634
0,90	1,260	3,968	19,841	2,025	1,40	0,4500	0,5670	2,592

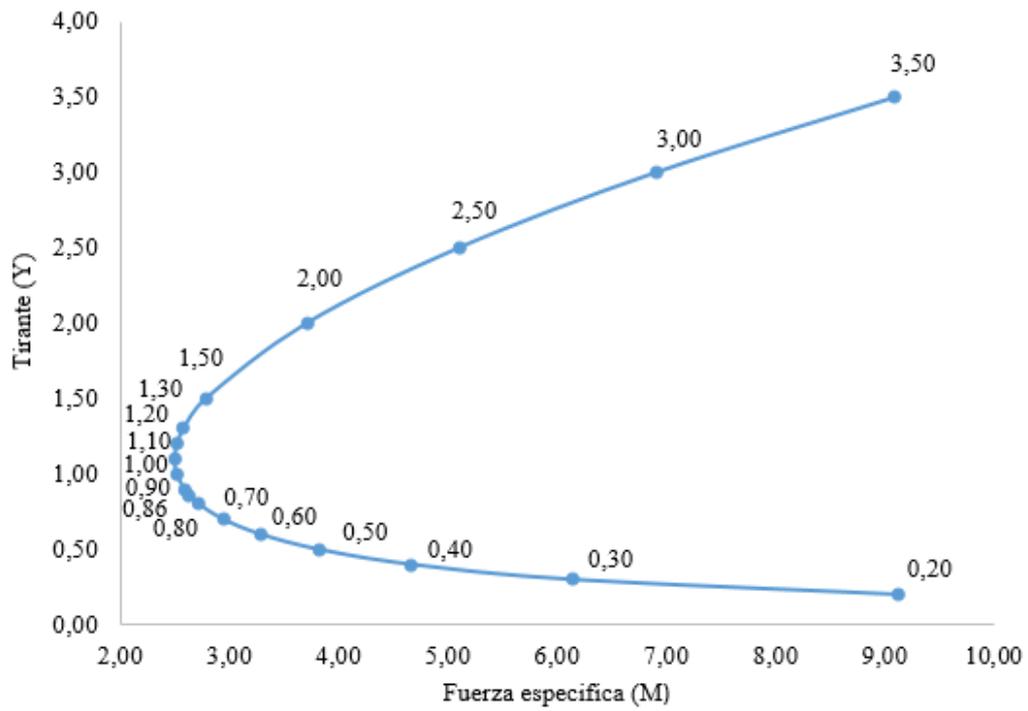


Figura 32. Fuerza específica vs tirante

cota de fondo = 1560,000 m.s.n.m

$V^2/2 \cdot g = 0,043 \text{ m}$

Y = 1,75 m

Nivel de energía = 1562,00 m.s.n.m

Tabla 4
Elevación – Tirantes conjugados menores

Y1	Y2	A2	V2 = Q/A	V2 ² /2g	Y2+V2 ² /2g	Elev. Del fondo del
0,1	1,4	1,960	2,551	0,332	1,732	1560,061
0,2	1,20	1,680	2,976	0,451	1,651	1560,141
0,3	1,10	1,540	3,246	0,537	1,637	1560,155
0,4	1,05	1,470	3,401	0,590	1,640	1560,153
0,5	0,80	1,120	4,464	1,016	1,816	1559,976
0,6	0,75	1,050	4,761	1,156	1,906	1559,886
0,7	0,55	0,770	6,493	2,151	2,701	1559,092

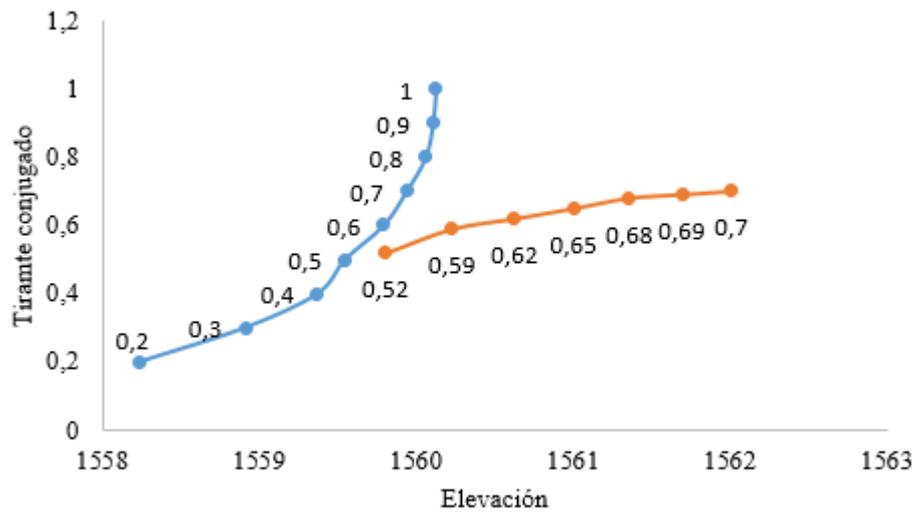


Figura 33. Elevación vs tirante

Entonces de la tabla 4, obtenemos:

$$Q^2/(g * A1) + A1 * \hat{Y}1 = Q/(g * A) + A2 * \hat{Y}2 \quad \text{Ecuación.....(54)}$$

Para Y1:

$$Y1 = 0,5 \text{ m}$$

$$A1 = 0,700 \text{ m}^2$$

$$V1 = 7,143 \text{ m/s}$$

$$T = 1,40 \text{ m}$$

$$E1 = 3,10 \text{ m}$$

$$\hat{Y}1 = 0,250$$

Para Y2:

$$Y_2 = 1,20 \text{ m}$$

$$A_2 = 1,680 \text{ m}^2$$

$$V_2 = 2,976 \text{ m/s}$$

$$T = 1,40 \text{ m}$$

$$\ddot{Y}_2 = 0,600 \text{ m}$$

Con la fórmula de ecuación de movimiento, tenemos:

$$\tau_1 = \tau_2$$

$$3,819 = 1,31 \longrightarrow \text{No cumple}$$

Si :

$$Y_3 = 2,30 \text{ m}$$

$$A_3 = 3,22 \text{ m}^2$$

$$V_3 = 1,55 \text{ m/s}$$

$$T = 1,40 \text{ m}$$

$$E_3 = 2,42 \text{ m}$$

$$\ddot{Y}_3 = 1,15$$

En la ecuación de cantidad de movimiento:

$$\tau_1 = \tau_2$$

$$3,819 = 3,861 \longrightarrow \text{Sí cumple}$$

Por lo tanto los tirantes conjugados son:

$$Y1 = 0,5 \text{ m}$$

$$Y2 = 2,30 \text{ m}$$

Se debe cumplir también la siguiente relación:

$$Y2 + \frac{V2^2}{2 * g} \leq \text{Altura del colchón} + Yn + \frac{Vn^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación.....(55)}$$

$$Y2 = 2,30 \text{ m}$$

$$V2 = 1,55 \text{ m}$$

$$\text{Altura} = 2,00 \text{ m}$$

$$Yn = 1,75 \text{ m}$$

$$Vn = 0,92 \text{ m/s}$$

Luego reemplazamos en la ecuación anterior:

$$2,423 \leq 3,793 \quad \text{OK !}$$

Se cumple la relación, pero para dar mayor seguridad al funcionamiento hidráulico del colchón, consideramos un 40% de ahogamiento por lo que se tendrá que bajar el nivel del colchón

La profundidad final del colchón será:

$$0,4 * E2 = 0,9692$$

$$E2 + 0,4 * E2 = 3,3922 \text{ m}$$

$$\text{Cota del colchón} = 1561,7933 - 3,39 = 1558,401 \text{ msnm}$$

$$\text{Profundidad} = 1,60 \text{ m}$$

Porcentaje de Ahogamiento:

$$\% \text{ Ahog} = 0,40 = 40,0\%$$

Finalmente el diseño geométrico del colchón amortiguador será:

$$Z = 1,5 : 1$$

$$\text{Prof} = 1,60 \text{ m}$$

$$\text{Cota} = 1560,00 \text{ msnm}$$

$$Y_n = 1,8 \text{ m}$$

$$Y_2 = 2,30 \text{ m}$$

$$E_2 = 2,42 \text{ m}$$

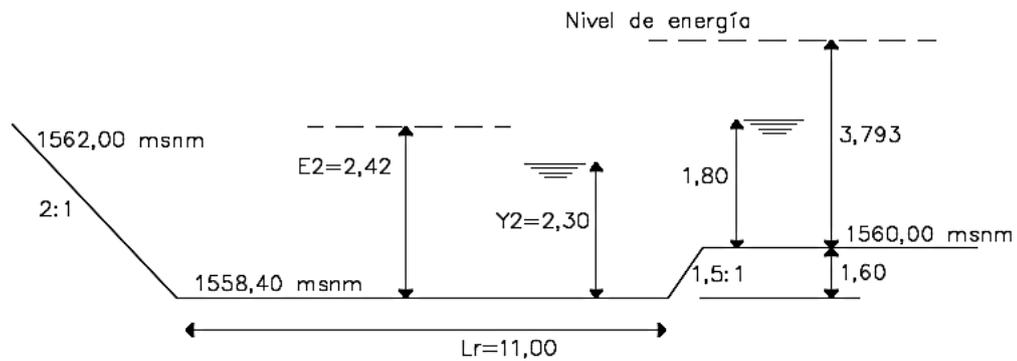


Figura 34. Medidas de colchón amortiguador

3.2.6 Comentarios del diseño

El diseño de la estructura tipo rápida, se desarrolló con resultados aceptables; el Proyecto Especial Regional Pasto Grande brindó planos de la estructura y, haciendo una comparación de resultados, existen variaciones pequeñas, pero que no modificarían el diseño.

3.3 Representación de resultados

Resultados del canal con el diseño propuesto

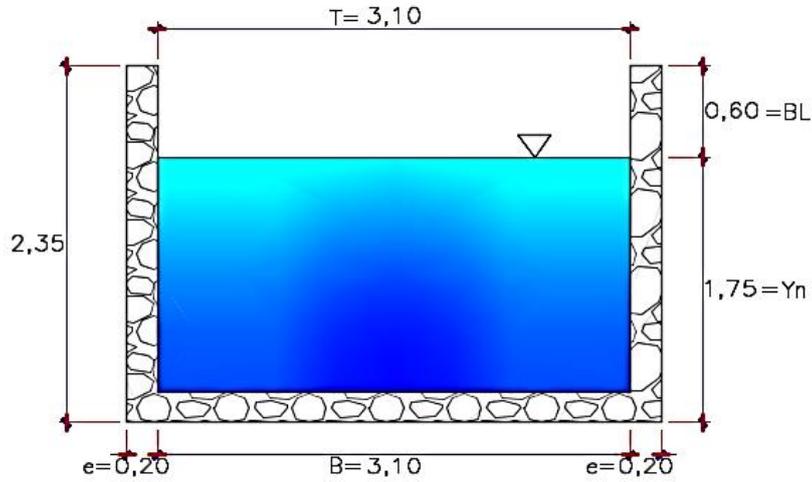


Figura 35. Diseño de canal

Diseño de canal según planos del PERPG

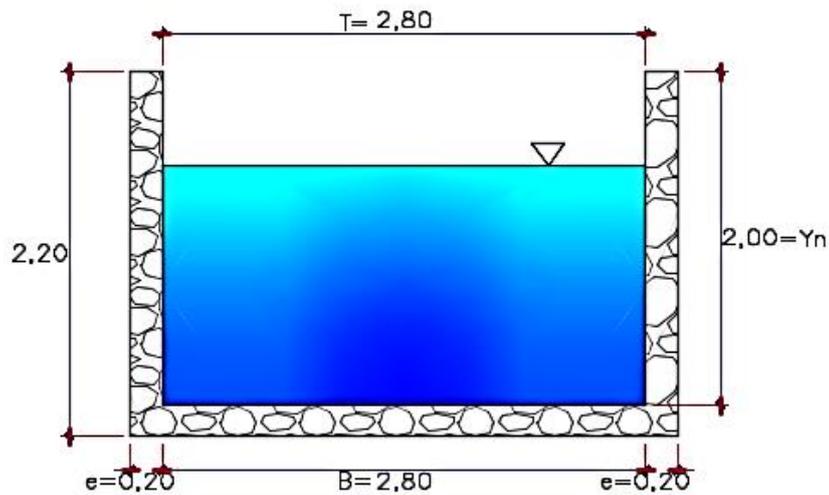


Figura 36. Canal según planos del PERPG

– **Comentario**

Existen algunas variaciones en la dimensión de las partes del canal, pero no son significativas.

Resultado del diseño del colchón amortiguador

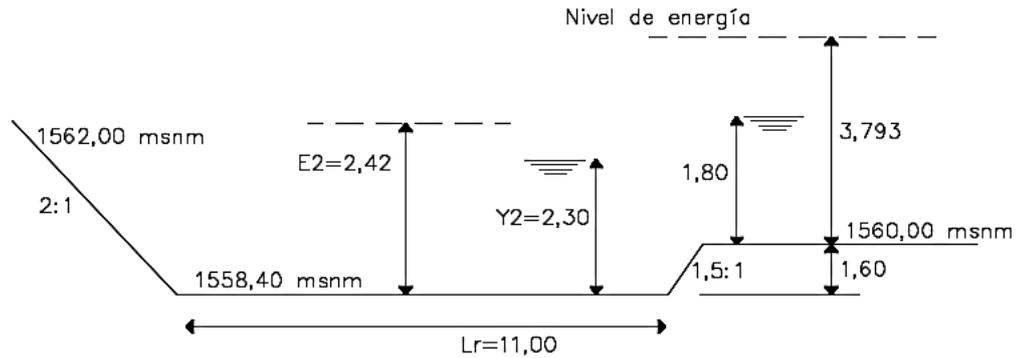


Figura 37. Diseño del colchón amortiguador

– *Comentarios*

La estructura existente del canal de Pasto Grande, tiene una rápida con pantallas transversales, las cuales tienen la función de disipar la energía, por lo cual no se necesitó un colchón amortiguador.

Se debe tener en cuenta que al diseño de la rápida se le añadió el diseño de un colchón amortiguador, con el objetivo de mostrar un caso aplicativo más eficiente que sirva de material de apoyo a estudiantes.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Primera. Se proporcionaron los parámetros más simples posibles para diseñar las estructuras de disipación más comunes añadiéndole a cada tipo de estructura, recomendaciones de diseño.

Segunda. Se describieron los criterios básicos para el diseño de las estructuras de disipación de energía.

Tercera. Se brindaron conceptos teóricos recopilados de diferentes autores de la manera más entendible posible.

Cuarta. Se realizó el diseño de una estructura hidráulica, en este caso una rápida construida en la región Moquegua, cuyos resultados los pudimos comparar y comentar apropiadamente.

4.2 Recomendaciones

Primera. Se debe buscar la simplicidad para diseñar las estructuras de disipación, de preferencia los canales deben ser rectangulares.

Segunda. No todos los conocimientos deben ser teóricos, se recomienda estudiar estructuras ya realizadas para aprender con la práctica.

Tercera. Los conceptos teóricos deben ser estudiados y comprendidos para lograr tener criterios al momento de diseñar las estructuras de disipación.

Cuarta. Se recomienda hacer un estudio geológico de la región, debido al crecimiento del caudal de los ríos en temporada de lluvia, para lograr diseñar con el gasto máximo adecuado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autoridad Nacional del agua. (2010). *Manual: Criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulacion de proyectos hidraulicos*. Obtenido de <http://www.ana.gob.pe/media/389716/manual-dise%C3%B1os-1.pdf>
- Billón, M. (2005). *Hidráulica de canales*. Lima - Perú: Tecnológica de Costa Rica.
- BUREAU OF RECLAMATION. (1984). *Hydraulic Design of stilling basins and energy dissipators*. Estados Unidos: Denver Colorado.
- Diseño de Estructuras Hidráulicas*. (s.f.). Obtenido de <https://es.scribd.com/document/98888887/DISENO-ESTRUCTURAS-HIDRAULICAS>
- Gálvez, H. (2006). *Modernizacion de la enseñanza aprendizaje en la asignatura de hidraulica II*. Cochabamba.
- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2012). *Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y AliDisipadores de energía*. Obtenido de http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FICHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/FICHA%20TECNICA_DISIPADORES
- Torres Herrera. (2010). *Obras Hidraulicas I*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
- Villamarín, S. (2013). *Manual basico de diseño de estructuras de disipacion de energia hidraulica*. Sangolquí.