



XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018.

ESTRUCTURA ESCALONADA CON FLUJO RASANTE PARA REALIZAR LA ENTREGA DE UN AFLUENTE A UN CANAL REALINEADO

Ing. Héctor Alfonso Rodríguez Díaz, M.Sc.

*Profesor Titular, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C. - Colombia,
alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co*

Ing. Andrés Humberto Otálora Carmona, M.Sc.

*Profesor Instructor, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C. - Colombia,
andres.otalora@escuelaing.edu.co*

RESUMEN:

El manejo ambiental de un proyecto de explotación minera a cielo abierto en Colombia, exige el desarrollo de acciones que aseguren mantener y preservar las condiciones del medio natural. La empresa Drummond Ltd. realiza actualmente una explotación minera en el sur del departamento del Cesar y dentro de su plan de manejo ambiental debe construir diferentes obras de ingeniería que aseguren la restauración de la cuenca, especialmente en la zona intervenida. Parte de las obras a desarrollar incluyen el diseño y construcción del realineamiento del cauce principal y por tanto el correspondiente manejo de las entregas de los afluentes al mismo, teniendo en cuenta las mejores prácticas ambientales e hidráulicas adecuadas para solucionar los cambios en las nuevas cotas de entrega al río, que aseguren el adecuado funcionamiento del sistema de drenaje de la cuenca y adicionalmente garantizar el libre movimiento de su fauna acuática por el sistema de drena.

ABSTRACT:

The environmental management of an open pit mining project in Colombia, requires the development of actions that ensure to keep and preserve the conditions of the natural environment. The company Drummond Ltd. is doing a mining operation in the southern department of Cesar and continuing its environmental management plan, must construct different engineering structures that ensure the restoration of the basin, especially in the intervened zone. Part of the works to be developed include the design and construction of the realignment of the main channel and therefore the corresponding management of the deliveries of the tributaries, given the best environmental and hydraulic practices to solve the changes in the new levels of delivery to the river, to ensure the right functioning of the drainage system of the basin and additionally allow the free movement of its aquatic fauna by the drainage system.

PALABRAS CLAVES: *Estructura Escalonada, Flujo Rasante, Disipación de Energía.*



INTRODUCCIÓN

En este artículo se presentan las consideraciones técnicas y conceptuales correspondientes al diseño de una estructura de entrega y disipación de energía que permite de manera segura descargar las aguas de la corriente natural denominada “Caño Piedras” al nuevo canal de realineamiento del arroyo San Antonio, en el departamento del Cesar, canal artificial diseñado para modificar el alineamiento del cauce natural, con el propósito de permitir una explotación minera a cielo abierto, explotación que realiza la empresa minera Drummond Ltd.

Con el objetivo de reducir al máximo la energía residual entre la corriente del Caño Piedras y el canal del realineamiento del arroyo San Antonio debido a la diferencia topográfica presente entre las dos corrientes y teniendo en cuenta las características geomorfológicas de la entrega se ha proyectado una estructura escalonada con flujo rasante y unas obras anexas que complementan adecuadamente dicha entrega.

Para la definición de las dimensiones de la estructura fue necesario el análisis de las diferentes variables hidrológicas, tales como la escurrimiento y la precipitación de la zona, con el propósito de estimar los caudales máximos instantáneos que definen el tamaño, tipo y detalles de la estructura. Fue necesario el levantamiento topográfico del último tramo de la corriente, información que fue procesada y analizada a partir de la herramienta de procesamiento de información geográfica, ArcGis, generando un modelo simplificado de terreno.

Con base en las condiciones hidrológicas de la zona, se evaluó y determinó el caudal de diseño de la estructura. Se definió el área de drenaje a partir del modelo de terreno generado con la topografía disponible y complementada con fotorrestituciones. Adicionalmente se definieron las características de la lluvia de diseño a partir del modelo hidrológico disponible por Drummond Ltd. y desarrollado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Centro de Estudios Hidráulicos, 2016).

Para la definición de las dimensiones de la estructura fue necesario considerar distintas limitaciones propias del terreno, las características geomorfológicas de la zona, las características de las corrientes, tales como su sección transversal, la dinámica fluvial de la corriente, el presupuesto y los materiales disponibles, para finalmente seleccionar la estructura cuya geometría permitiese controlar la mayor cantidad de energía para las condiciones particulares de eventos extremos.



ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Este trabajo tiene en cuenta los estudios previos detallados ejecutados sobre este realineamiento, que incluyen la revisión de la información hidrológica, el tránsito hidrológico mediante el modelo HEC–HMS. Utiliza como referencia principal las condiciones, parámetros y modelos planteados y desarrollados en el estudio de “Consultoría para la evaluación de estudios hidrológicos e hidráulicos en las cuencas en estado natural que conforman el área minera del centro del Cesar. Caudales máximos y mínimos” - realizado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Se seleccionó la estructura tipo escalonada de flujo rasante como la estructura de disipación de energía para la entrega del Caño Piedras al canal de realineamiento. Esta estructura se seleccionó después de un análisis de diferentes estructuras de disipación teniendo en cuenta la topografía y como se disipa la energía cinética, las facilidades constructivas y las particularidades topográficas de la corriente.

En este trabajo se incluye un análisis detallado del trazado en planta y en perfil de la estructura, el dimensionamiento correspondiente a las secciones transversales, que han permitido proponer una transición entre el cauce natural y la estructura para asegurar una condiciones adecuadas de flujo en esta zona.

MODELO SIMPLIFICADO DEL TERRENO

Con base en el levantamiento topográfico realizado en la zona del Caño Piedras, se analizó, filtró y depuró la información correspondiente a los puntos topográficos levantados.

Posterior a la depuración de los datos topográficos, se construyó un modelo de terreno de la zona correspondiente a la entrega de la corriente y se generaron las correspondientes curvas de nivel.

Con base en la topografía disponible se estableció de manera preliminar el eje principal de la estructura, tomando como referencia los puntos más bajos del cauce. También fue posible establecer la sección dominante, para analizar las características hidráulicas de la corriente y las posibles dimensiones de la estructura.

El Caño Piedras es una corriente intermitente y por tanto su alineamiento en planta cambia dependiendo de la condición hidrológica de la cuenca. Establecer la sección del cauce correspondiente a la condición dominante, genera incertidumbre en los procesos dinámicos y dificulta definir la configuración en planta de una estructura de entrega.

Definido el cauce principal de la corriente y analizadas todas las variables geomorfológicas de la zona, fue posible definir el eje de la obra de disipación, las secciones transversales y el perfil longitudinal a partir del modelo de terreno, permitiendo obtener las características topográficas necesarias para el dimensionamiento de la estructura de entrega del Caño Piedras al realineamiento definitivo.

En la Figura 1 se presenta la topografía de la zona de entrega del Caño Piedras al realineamiento #4 del Arroyo San Antonio.

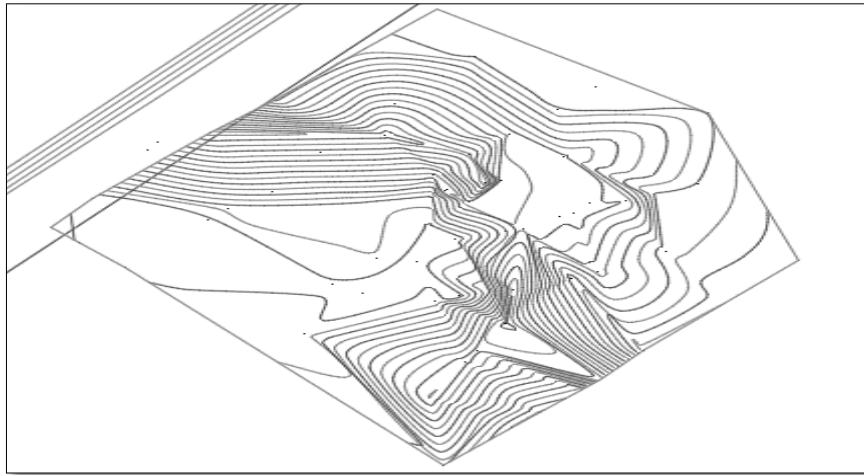


Figura 1.- Modelo de Terreno Simplificado del Caño Piedras en la zona de entrega al realineamiento #4 del Arroyo San Antonio.

CAUDAL DE DISEÑO

Para la determinación del caudal de diseño se utilizaron los estudios realizados por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito “Estudio y diseño Hidrológico e Hidráulico Arroyo San Antonio No. 4”. En este estudio se determinaron los caudales máximos instantáneos para distintos periodos de retorno.

Para establecer el periodo de retorno del caudal de diseño de la estructura, se analizó en detalle la ubicación de la estructura, el riesgo de colapso y la vida útil del proyecto. Se seleccionó 50 años, como el periodo de recurrencia del evento extremo. A partir del estudio descrito anteriormente y del modelo hidrológico desarrollado para la zona se obtuvo un caudal de 55 m³/s, como caudal máximo para 50 años de periodo de retorno.

DISEÑO HIDRÁULICO DE LA ESTRUCTURA ESCALONADA. FLUJO RASANTE

Establecidos los caudales de diseño y las características topográficas de la zona se seleccionaron diferentes estructuras de disipación de energía y se estableció que una estructura tipo escalonada con flujo rasante podría ser la más apropiada, teniendo en cuenta las características propias del proceso constructivo en la zona y las características establecidas para el flujo en la zona de entrega.

Inicialmente se planteó el diseño de una estructura flexible utilizando elementos tales como bolsacretos o enrocados, teniendo en cuenta que dichos elementos se adaptan a la dinámica propia de este tipo de corrientes y al material de cimentación. Debido a la dificultad de disponer de estos materiales en la zona, se optó por una estructura tipo escalonada de concreto, rígida. El empalme entre el cauce natural y la estructura de disipación se ha previsto utilizando material pétreo debidamente dispuesto.

El diseño de la estructura escalonada se ha definido a partir de la selección de las dimensiones de la huella y contrahuella más adecuadas, teniendo en cuenta el perfil del terreno y la metodología propuesta por Ohtsu, I; Yasuda, Y; Takahashi, M. (2004). Esta metodología permite evaluar las dimensiones de los escalones para asegurar las condiciones del flujo rasante más apropiadas y para la máxima disipación de energía.

DIMENSIONES DE LOS ESCALONES

Con base en las consideraciones planteada en el párrafo anterior, en la Tabla 1 se presenta un resumen de las magnitudes de las diferentes variables utilizadas en el dimensionamiento de la estructura escalonada. Las dimensiones definitivas se obtuvieron a partir de un proceso de ensayo y error que permitió analizar distintas combinaciones de pendiente, valores de huella y contrahuella, para garantizar, de acuerdo con la metodología de flujo rasante, una disipación adecuada de energía. En este análisis también se consideraron teniendo en cuenta las limitaciones propias del proceso constructivo de la estructura.

Tabla 1.- Diseño de la estructura escalonada de flujo rasante para el Caño Piedras. Parámetros de diseño y dimensiones. Metodología Ohtsu, I; Yasuda, Y; Takahashi, M. (2004).

| | | | |
|---------------|-------|---------|---|
| $H_{total} =$ | 2.17 | m | Altura de caída, desnivel |
| $Q =$ | 55.10 | m^3/s | Caudal de diseño |
| $B =$ | 8.0 | m | Ancho canal de aproximación |
| $\theta =$ | 8.13 | º | Angulo del seudofondo (acomodar según topografía) |
| $g =$ | 9.81 | m/s^2 | Aceleración de la gravedad |

| Canal con Flujo Rasante | | | | |
|----------------------------|--|--------|---|------------------------------|
| Variable | Símbolo | Unidad | Expresión Usada | Cálculo |
| Altura del escalón | S | m | De Tabla 9.1 (interpolado) | 0.30 |
| Profundidad crítica | y_c | m | $y_c = \left[\frac{(q)^3}{g} \right]^{1/3}$ | 1.69 |
| Condición de flujo rasante | | | $\left[\frac{S}{y_c} \right] = \frac{7}{6} [\tan(\theta)]^{2/6}$ | 0.84 OK |
| Tipo de Flujo | --- | --- | Si $\theta > 19^\circ$ | NO |
| | --- | --- | $\frac{S}{y_c} \leq \left[\frac{S}{y_{cB}} \right]$ | No |
| | --- | --- | | |
| | --- | --- | | |
| | --- | --- | $\left[\frac{S}{y_{cB}} \right] = [13(\tan\theta)^2 - 2.73(\tan\theta)] + 0.373$ | 0.25 |
| | --- | --- | Flujo tipo B (otros casos) | No |
| | --- | --- | Flujo tipo | El flujo es tipo A |
| Energía residual | $\left(\frac{E_{res}}{y_c} \right)_u$ | m/m | Para Flujo Tipo A $\left(\frac{f}{8\text{sen}\theta} \right)^{(1/3)} \cos\theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8\text{sen}\theta} \right)^{(-2/3)}$ Para Flujo Tipo B $\left(\frac{f}{8\text{sen}\theta} \right)^{(1/3)} + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8\text{sen}\theta} \right)^{(-2/3)}$ | 2.86 |
| | E_{res_cub-} siuniforme | m | Para $5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$ $D=0.300$ Para $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ $E_{res} = 2.86 * y_c$ | 4.83 |
| | E_{res_NOcub-} siuniforme | m | $5.0 \leq \frac{H_{total}}{y_c} \leq \frac{H_s}{y_c}$ $\frac{E_{res}}{y_c} = 1.5 + \left[\left(\frac{E_{res}}{y_c} \right)_u - 1.5 \right] \left[1 - \left(1 - \frac{H_{total}}{H_s} \right)^{0.25+4} \right]$ | OK 2.06 |

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ESTRUCTURA. DIMENSIONES

A continuación, se presenta un resumen de las consideraciones de diseño que han permitido establecer las dimensiones de diferentes elementos de la estructura, diferentes a su huella y contrahuella.

La estructura de entrega del caño Piedras para una sección transversal rectangular de 8.00 m de ancho, con una altura de escalón de 0.3 m, una huella de 2.10 m y un escalón final de 0.37 m de contrahuella, que permite el remate en un tanque de amortiguamiento. En la Figura 2 se presentan las dimensiones descritas de la estructura.

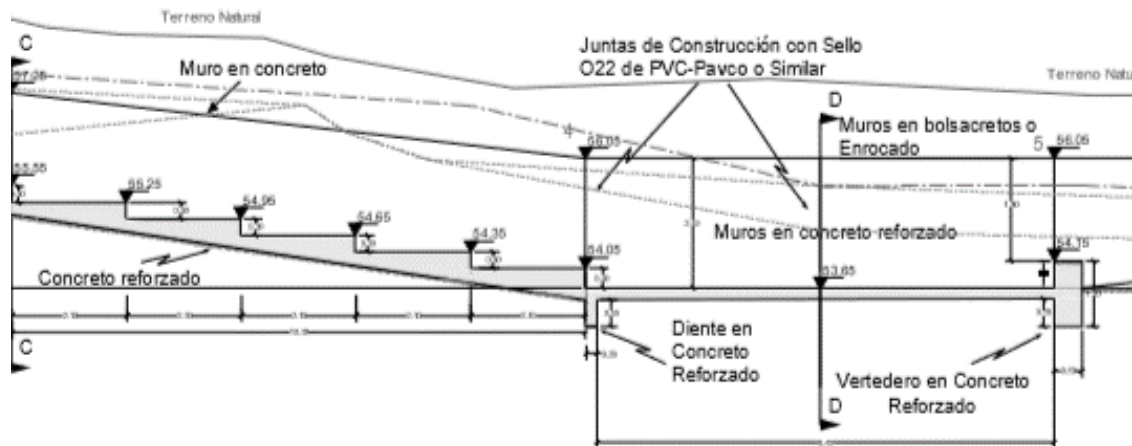


Figura 2.- Perfil longitudinal de la estructura de disipación. Caño Piedras.

Teniendo en cuenta las características del material aluvial sobre el cual está cimentada la estructura, se definieron juntas de construcción para asegurar que, ante posibles desplazamientos, la estructura se mantiene impermeable.

Tanque de amortiguamiento

Con el propósito de disipar la energía residual aguas abajo de la estructura fue necesario el diseño de un tanque de amortiguamiento para asegurar condiciones de flujo subcrítico en la entrega al canal de realineamiento. La formación del resalto hidráulico dentro del tanque se garantiza mediante un vertedero frontal. En la Figura 3 se presenta un esquema general del tanque propuesto.

Debido a que estas estructuras de disipación están sujetas a permanentes esfuerzo de impacto y a flujos secundarios, se proyectaron dos elementos de anclaje de 0.5 m de altura, ubicados bajo la placa.

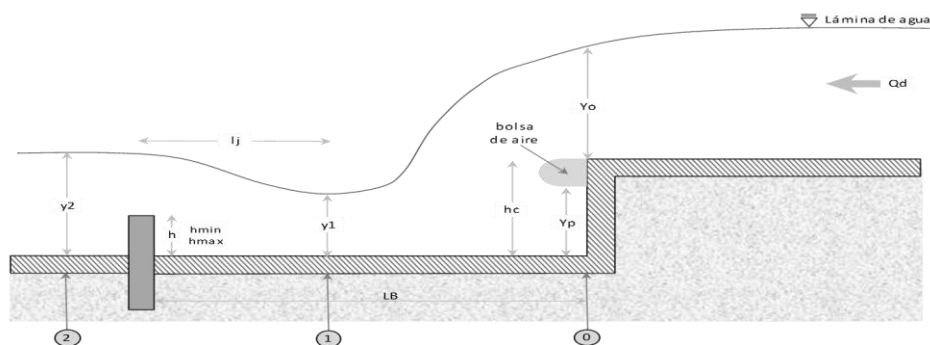


Figura 3.- Esquema General de un Tanque Disipador de Energía con Resalto Hidráulico.

Muros Laterales

La altura de los muros de la estructura escalonada y el tanque de amortiguamiento, se definieron con base en la lámina de agua máxima obtenida de los diferentes análisis. Teniendo en cuenta el aire contenido en el flujo rasante, se ha definido una altura de los muros laterales considerando la lámina de agua con un 40% adicional a la altura estimada.

Adicionalmente la altura definitiva de los muros tuvo en cuenta las características topográficas de la zona de tal manera que se genere una transición entre la estructura y el terreno natural.

A lo largo de la estructura de disipación y del tanque amortiguamiento se proyectaron muros en concreto reforzado.

Finalmente es necesario “peinar” los taludes del valle actual con ayuda de material enrocado, con una pendiente recomendada de 2H: 1V.

Transiciones

Teniendo en cuenta que las estructuras escalonadas no tienen el mismo ancho de la sección transversal de la corriente fue necesario proyectar transiciones entre la sección original del cauce y la estructura de entrega tanto a la entrada como a la salida.

Esta transición se definió con muros 2H: 1V en enrocado y bolsacretos o gaviones, por facilidad de construcción, permitiendo una mejor adaptación a las condiciones dinámicas de las corrientes.

Con el propósito de crear una mayor estabilidad, se diseñaron dos dientes laterales en cada uno de los extremos de los muros, con el propósito de crear un anclaje adicional, permitiendo soportar los altos esfuerzos cortantes que pueden desestabilizar la estructura.

En la Figura 4 se presenta la vista en planta de la estructura definitiva teniendo en cuenta todas las anteriores consideraciones.

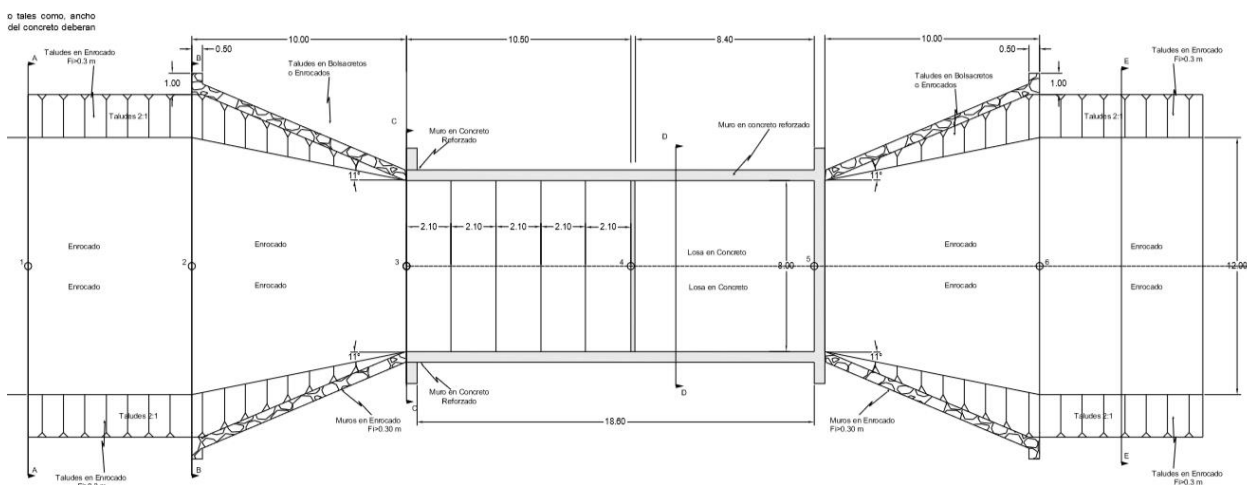


Figura 4.- Vista en planta de la estructura de disipación de energía del Caño Piedras

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se muestran las secciones transversales de la estructura escalonada, de las transiciones y del tanque de amortiguamiento agua debajo de la estructura.

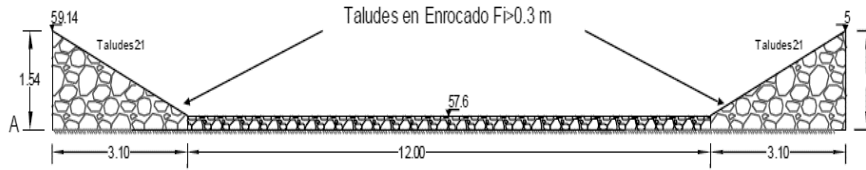


Figura 5.- Sección transversal aguas arriba de la estructura de disipación de energía del Caño Piedras. Corte A-A.

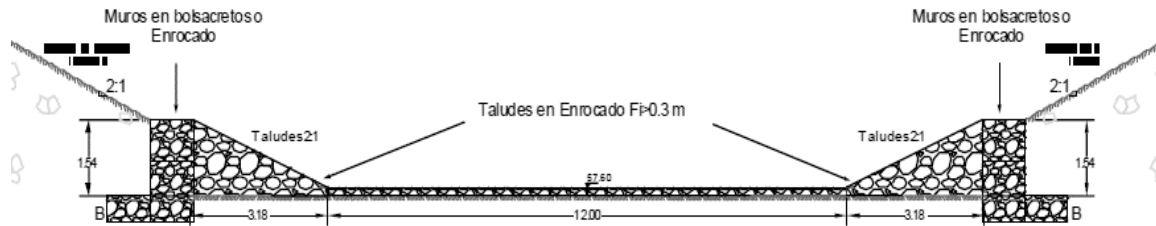


Figura 6.- Sección transversal al inicio de la estructura de disipación de energía del Caño Piedras. Corte B-B.

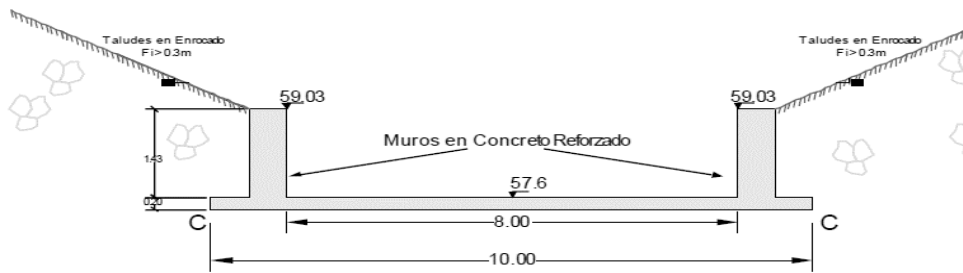


Figura 7.- Sección transversal típica en la estructura de disipación de energía del Caño Piedras. Corte C-C.

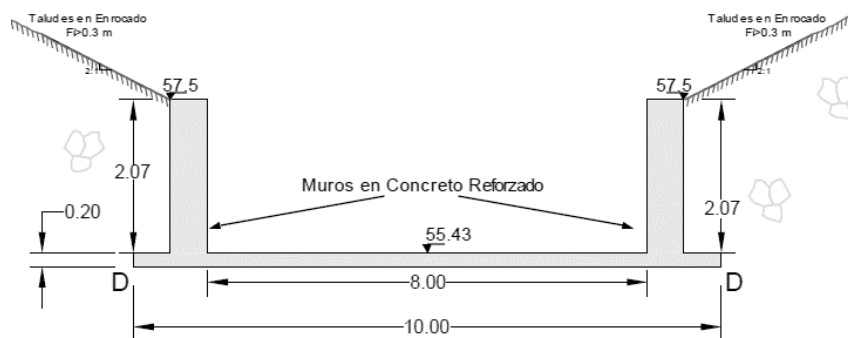


Figura 8.- Sección transversal en el tanque amortiguador aguas abajo de la estructura de disipación de energía del Caño Piedras. Corte D-D.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Para superar una diferencia de altura en un tramo muy corto en la descarga del Caño Piedras al canal de realineamiento del arroyo San Antonio, se proyectó una estructura tipo escalonada con flujo rasante y un tanque de amortiguamiento en concreto reforzado. Este sistema permite disipar adecuadamente la energía cinética adicionada al flujo, debido a fuerte pendiente del cauce. Lateralmente se ha proyectado un recubrimiento con enrocado, de tal manera que la obra se adapte a las condiciones topográficas existentes. Como alternativa se ha propuesto construir esta estructura con bolsacretos y piedra pegada con el fin de disponer de una estructura un poco más flexible.

Desde el punto de vista de las condiciones de flujo se proyectó una estructura escalonada muy corta asumiendo que al final de la misma se obtienen condiciones de flujo uniforme correspondiente a la mezcla de agua y aire, con lo cual es necesario su remate mediante un tanque de amortiguamiento.

La ubicación de la estructura se hizo teniendo en cuenta el alineamiento natural de la corriente y conservando los puntos bajos de la corriente de tal manera que se puedan reducir los movimientos de tierra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Centro de Estudios Hidráulicos. (2016). “Consultoría Para El Diseño del Realineamiento No. 4 y Factibilidad del Realineamiento Definitivo del Arroyo San Antonio en el Departamento del Cesar”. Bogotá, Colombia. Escuela Colombiana de Ingeniería.

González, C. Chanson, H. (2007). “Diseño hidráulico de vertederos escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental”. Universidad de Queensland, Australia.

Ohtsu, I; Yasuda, Y; Takahashi, M. (2004). “Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 9, September 2004, pp. 860-869.